## Вступне слово. Декілька слів про конференцію

«Наука — це спосіб життя» — В.І. Старостенко

#### Шановні колеги!

Міжнародна наукова конференція «АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ГЕОФІЗИКИ» (22—23 квітня 2025 р.) присвячена 90-річному ювілею видатного українського геофізика, геолога, фахівця в галузі теорії інтерпретації потенційних полів, двічі лауреата Державної премії України в галузі науки і техніки, заслуженого діяча науки УРСР, лауреата премії імені С.І. Субботіна НАН України, директора Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (1992— 2021), доктора фізико-математичних наук, професора, академіка НАН України Віталія Івановича Старостенка.

В.І. Старостенко — автор понад 900 наукових праць, в тому числі багатьох монографій, що є результатом напруженої наполегливої роботи талановитої людини. Роботи були видані, крім України, в Англії, Індії, Італії, Китаї, Польщі, США, Франції, Нідерландах, Словаччині, Чехії, Швеції, Швейцарії та інших країнах.

Віталій Іванович щедро ділиться своїми знаннями та досвідом. Він виховав і дав путівку у велику науку багатьом учням, які, в свою чергу, захистили кандидатські і докторські наукові дисертації і успішно працюють як в Україні, так і за її межами.

Наукова тематика конференції присвячена актуальним проблемам наук про Землю, яким присвятив все своє наукове життя Віталій Іванович, а саме: вивченню геофізичних полів; комплексуванню геофізичних методів для вивчення глибинної будови Землі; побудові та інтерпретації геолого-геофізичних моделей земної кори і мантії з метою пошуку корисних копалин.



До Оргкомітету надійшло 64 наукових статей від вчених з України (Київ, Івано-Франківськ, Львів, Дніпро, Полтава, Берегове, Дрогобич) і країн ближнього та далекого зарубіжжя (Англія, Словаччина, Чехія, Італія, Польща, Латвія), які після рецензування опубліковані в «Геофізичному журналі» № 2, 2025 р.

Загальна кількість учасників конференції — понад 140 науковців, які представляють: дев'ять академічних установ (зокрема, чотири закордонні), 13 закладів вищої освіти (п'ять закордонних), 11 промислових підприємств (одне закордонне).

Надіслані матеріали свідчать про високий рівень наукової активності та зацікавленості в розширенні методів аналізу

Citation: Legostaeva, O.V., & Orlyuk, M.I. (2025). Opening remarks. A few words about the conference. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 69—70.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

геологічних процесів, вивченні глибинної будови, тектоніки, структури, геодинаміки континентальної та океанічної літосфери методами геофізики (сейсмічні, гравіметричні, магнітометричні та електрометричні дослідження) з метою прогнозу пошуків родовищ корисних копалин, пошуку фізичних закономірностей у просторово-часовому еволюційному геодинамічному процесі, оцінюванні екологічних наслідків війни і шляхів їх подолання та ін.

Висловлюємо щиру подяку членам Організаційного комітету конференції, співробітникам Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна, Відділенню Наук про Землю НАН України, Національній академії наук України, в.о. головного вченого секретаря Національній академії наук України, академіку НАН України В.Л. Богданову, директору товариства з обмеженою відповідальністю «Науково-технічна компанія «ДЕПРОІЛ ЛТД» (м. Івано-Франківськ) професору О.П. Петровському, які надали спонсорську підтримку та допомогу у проведенні конференції.

Наукова громадськість, колеги, друзі та учні щиро вітають Віталія Івановича з ювілеєм, бажають йому міцного здоров'я, творчої наснаги, незгасаючої енергії та здійснення майбутніх творчих планів!

Заступники голови Оргкомітету

Легостаєва Ольга Вадимівна, доктор фізико-математичних наук, заступник директора з наукової роботи ІГФ НАН України

Орлюк Михайло Іванович, член-кореспондент НАН України, доктор геологічних наук, професор, завідувач відділом ІГФ НАН України УДК 551:004.89

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322463

## Artificial intelligence in geophysics: opportunities and risks

#### N.I. Bakhova, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The article briefly reviews some artificial intelligence methods successfully used to process and interpret logging data and for seismology and geothermy. The possibilities of artificial neural networks, the Support Vector Machines, the Random Forest method, and genetic algorithms are highlighted. The basic information about the advantages and limitations of artificial intelligence tools is given.

AI is not self-sufficient for geological and geophysical research. It is important to adapt its algorithms to work with large volumes of geophysical data. If the algorithm has too high computational complexity, calculations can be simplified by manually processing the input data or using conventional software. Sometimes, several algorithms are used to solve a single problem. In such cases, each network is trained several times. When comparing the results with approximately equal control errors, a computationally simpler neural network is chosen.

For the purpose of better orientation in the computing world, information is provided on the computational adaptation of artificial intelligence to geophysical data.

Attention is drawn to the possibility of financial risks associated with the use of an insufficiently powerful network when modeling a particular dependence.

**Key words:** artificial intelligence, algorithm, seismology, geothermy, interpretation of logging data.

**Introduction.** The development of artificial intelligence (AI) methods is inextricably linked with the emergence of information theory. Although references to the first prototypes of modern machine intelligence date back to the ancient period. In the relict works of physicists and mathematicians of the last century, one can find many valuable recommendations and tips necessary for orientation in the modern information world, where AI technologies occupy a strong position.

The practical application of information theory in Earth sciences has paved a barely noticeable path to geoecology. And this path took almost three decades. The rational use of information theory in any field of science is possible if one prerequisite is met — a clear understanding of the mathematical essence of the fundamental category «information» and its computational apparatus.

Having access to huge amounts of data, allows scientists to find dependencies and anomalies in experimental materials faster, and then put the results into practice in a shorter time period. It is not necessary for a researcher to have an exhaustive knowledge of the fundamentals of computational mathematics. However, he must have a sense of mathematical order, namely, to easily identify single facts and pay close attention to the hidden dependencies of «distant» facts from each other. The «soul» of a fact, as pointed out by the French mathematician A. Poincare, will forever remain outside the

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Bakhova, N.I. (2025). Artificial intelligence in geophysics: opportunities and risks. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 71—74. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322463.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

«activity field» of the machine intelligence.

This paper is devoted to an analytical review of some artificial intelligence methods that have successfully proven themselves in the process of processing and interpreting experimental geophysical material.

A brief description of some AI methods and an analysis of their effectiveness. Direct applicability of AI methods to Earth sciences is insufficient. The biggest difficulty is the choice and combination of tools. It is necessary to carefully analyze which methods and why should be used to study a particular phenomenon.

An interesting combination of two machine learning algorithms (GAN and Random Forest) was developed by the authors [Li et al., 2018] to solve the noise problem.

GAN is a neural network, the subject of which is the basic distribution of data. The input data for the generator is a random distribution, including noise. Next, the generator examines the display function, with which the data is transformed into the desired result. At this stage of the work, it is not yet known whether the generated data is real. Here, a discriminator is needed, the key role of which is to evaluate the output data of the generator. The discriminator is a binary classifier that takes the output data from the generator and evaluates the probability of the data being fake or real.

The device proposed by [Li et al., 2018] is trained to recognize the characteristics of P-waves data. This eliminates the need to manually define and select waveform characteristics. Random Forest uses the main characteristics of these functions and classifies the types of signals with high accuracy. Both algorithms were trained on a large volume of seismic data: 300000 *P*-waves and more than 300000 noise signals recorded in Southern California and Japan.

By combining GAN and Random Forest, Li et al. [2018] achieved excellent results in recognizing earthquakes against the background of other pulsed noise signals, which can significantly reduce the number of false alarms of the EEW (Earthquake Early Warning) system. The method development for the automatic identification of earthquakes based on large amounts of data is the primary seismological research task. To accurately identify seismic events, Liu et al. [2022] proposed a combined GAN and SVM model. 52537 recordings of strong earthquakes in Japan were used to train GAN and extract the *P*-wave characteristics. Next, the SVM algorithm is used to detect earthquakes and micro-earthquakes. The results show that the combined model provides an accuracy of 99.74 % for *P*-waves and 99.93 % for micro-vibrations.

The study [Wang et al., 2019] suggests an innovative and constructive solution for the identification of sedimentation microformations based on the SVM algorithm application. The accuracy of the algorithm reaches 84 %. This technology will help save the cost of core analysis and increase the profitability of oil and gas exploration.

The ecology of our planet sets its priorities in the choice of energy sources. For several decades, scientists have been improving the technologies for the development of «green energy». This type of energy is a renewable energy resource that is inexhaustible for humans and can serve for many years. The main difficulty in using «green energy» is the selection of suitable areas of the earth's surface and their integration into the local infrastructure.

There are many technological problems in the operation of the thermal power plant. The choice of a geothermal plant construction site ultimately determines its future reliable and uninterrupted operation. AI offers a wide range of effective tools to solve this problem processing a sufficiently large experimental array of geothermal data. Next, geoinformation data is analyzed: access to infrastructure, potential risks of equipment malfunctions, assessment of the impact of the station's activities on the environment.

Based on generalized reviews [Kong et al., 2016; Rouet-Leduc et al., 2017; Perol et al., 2018], some important performance characteristics of AI methods in geological and geophysical conditions were identified. The information is given in Table.

Conclusions. In the last few years, re-

The algorithm name	Sample size for training	Tasks	Computational complexity
Support Vector Machines	The definitive answer depends on the specific task. You can use data with a lot of noise	Tasks of linear and nonlinear classification, regression, and detection of abnormal data	Linear in the number of support vectors
Random Forest	Moderate. Increasing the amount of data will lead to ig- noring some important features	Forecasting lithology based on logging data	Depends on the data set
Genetic algorithms	Sample size for training	Any type of optimization tasks. Electromagnetic sensing	High optimal accuracy increases with calculation time

#### Brief characteristics of artificial intelligence algorithms

searchers have been using AI algorithms with ensemble learning. This approach helps to increase the accuracy and objectivity of interpretation results, but it can significantly increase the financial cost of computational calculations.

The practice of implementing algorithms in geological and geophysical conditions has shown the adaptability of machine learning

#### References

- Li, Z., Meier, M.-A., Hauksson, E., Zhan, Z., & Andrews, J. (2018). Machine Learning Seismic Wave Discrimination: Application to Earthquake Early Warning. *Geophysical Research Letters*, 45(10), 4773—4779. https://doi.org/10. 1029/2018GL077870.
- Liu, H, Song, J., & Li, S. (2022). Seismic Event Identification Based on a Generative Adversarial Network and Support Vector Machine. *Frontiers in Earth Science*, 10, 814655. https:// doi.org/10.3389/feart.2022.814655.
- Kong, Q., Allen, R.M., Schreier, L., & Kwon, Y.-W. (2016). MyShake: A Smartphone Seismic Network for Earthquake Early Warning and beyond. *Science Advances*, 2(2), e1501055. https:// doi.org/10.1126/sciadv.1501055.

methods. In other words, self-tuning is takingplace when the geological and geophysical environment changes.

One of the main characteristics of AI is computational complexity. There are no universal methods, so the information given in Table is concise on the one hand, and on the other hand, it may suggest the way to the required method or a combination of them.

- Perol, T., Gharbi, M., & Denolle, M. (2018). Convolutional neural network for earthquake detection and location. *Science Advances*, 4(2), e1700578. https://doi.org/10.1126/sciadv.170 0578.
- Rouet-Leduc, B., Hulbert, C., Lubbers, N., Barros, K., Humphreys, C.J., & Johnson, P.A. (2017). Machine learning predicts laboratory earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 44, 9276—9282. https://doi.org/10.1002/ 2017GL 074677.
- Wang, D., Peng, J., Yu, Q., Chen, Y., & Yu, H. (2019). Support vector machine algorithm for automatically identifying depositional microfacies using well logs. *Sustainability*, 11(7). https://doi.org/10.3390/su11071919.

## Штучний інтелект у геофізиці: можливості та ризики

#### Н.І. Бахова, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Наведено короткий аналітичний огляд деяких методів штучного інтелекту, які успішно застосовуються в процесі обробки та інтерпретації даних каротажу, а також у сейсмології та геотермії. Висвітлено можливості штучних нейронних мереж, методу опорних векторів, методу випадкового лісу, генетичних алгоритмів. Надано основні відомості про переваги та обмеження інструментів штучного інтелекту.

Для геолого-геофізичних досліджень штучного інтелекту не є самодостатнім. Важливо пристосувати його алгоритми до роботи з великими обсягами геофізичних даних. Якщо використовуваний алгоритм має надто високу обчислювальну складність, можна спростити обчислення за допомогою ручної обробки вхідних даних або звичайного програмного забезпечення. Іноді застосовуються кілька алгоритмів для вирішення одного завдання. У таких випадках кожну мережу навчають кілька разів. При порівнянні отриманих результатів із приблизно рівними контрольними помилками вибирають простішу в обчислювальному відношенні нейронну мережу.

З метою кращої орієнтації у світі обчислень наведено інформацію про обчислювальну адаптацію штучного інтелекту до геофізичних даних.

Звернено увагу на можливості фінансових ризиків, пов'язаних із використанням недостатньо потужної мережі при моделюванні тієї чи іншої залежності.

Ключові слова: штучний інтелект, алгоритм, сейсмологія, геотермія, інтерпретація каротажних даних.

УДК 550.832.5

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322464

# Development and implementation of «logging-while-drilling» technology in Ukraine. Methods and tools for determination of petrophysical parameters of reservoirs while drilling vertical, deviated, and horizontal oil-and-gas boreholes

## M.S. Bondarenko<sup>1</sup>, V.V. Kulyk<sup>1</sup>, S.M. Danyliv<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine <sup>2</sup>LLC «Ukrspetsprylad», Kyiv, Ukraine

Logging-while-drilling (LWD) oil-and-gas boreholes is an advanced technology that improves the efficiency of drilling-and-logging operations. The cost of services and the

Citation: Bondarenko, M.S., Kulyk, V.V., & Danyliv, S.M. (2025). Development and implementation of «loggingwhile-drilling» technology in Ukraine. Methods and tools for determination of petrophysical parameters of reservoirs while drilling vertical, deviated, and horizontal oil-and-gas boreholes. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 74—79. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322464.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

technological monopoly of foreign firms, and their leaving from Ukraine in 2022, make urgent the development of domestic apparatus-and-methodological complexes for LWD. The Group of Nuclear Geophysics of the Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, together with LLC «Ukrspetsprylad», have created a number of methods and tools for determining the petrophysical parameters of reservoirs during LWD. The effectiveness of the developments has been confirmed by borehole tests and comparison with independent data.

**Key words:** oil-and-gas borehole, logging-while-drilling, combination of logging methods, set of apparatus devices, interpretation methodology, petrophysical parameter.

**Introduction.** Logging-while-drilling (LWD) is an advanced technology in geophysical well logging used to determine the petrophysical and other parameters of rocks during drilling vertical, deviated, and horizontal oil-and-gas boreholes.

Western companies began commercial implementation of LWD technology in the late 80's — early 90's of the twentieth century. Leading companies have achieved significant results in the field of LWD and its wide application. Modern LWD systems are ultimately designed not only to minimize traditional geophysical surveys (logging after drilling vertical and moderately deviated boreholes) but also allow to expand their usage to deviated (deviation angle greater than 50°) and horizontal boreholes.

The main factors that have stimulated the development of LWD measurements include: a significant reduction in cost and a general increase in the promptitude, effectiveness, and productivity of drilling-and-logging operations, a significant increase in hydrocarbon production in horizontal boreholes, as a result of which their proportion has grown greatly; favorable conditions for obtaining petrophysical parameters — centered system of measurement (standoff), practically no influence of invasion, mud cake and colmatation, minimal influence of rugosity, increased statistical accuracy of radioactive logging (RL), transmission of the necessary parameters in real time.

In Ukraine, non-traditional drilling was insignificant in volume. LWD was based on expensive services of foreign companies. At the same time, they do not share either information about the features of the apparatus or the interpretation methodology with consumers. With the beginning of a full-scale war, these works were stopped, and the equipment was removed. Thus, it is necessary to develop and implement domestic apparatus-and-methodical complexes of LWD.

Since 2017, the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGPh) partnered with LLC «Ukrspetsprylad» (USP) to create and implement an original RL module for the LWD survey under a scientific-and-technical partnership agreement. Recently, the LWD combination of «RL+induction-type logging (ITL)» has been developed to extend the set of petrophysical parameters important for practice.

Work on metrological support of the RL module is carried out on the created fullscale models of reservoirs; new methods for determining petrophysical parameters and corresponding devices are being developed; the methodology for interpreting LWD measurements is being improved. Testing of the developments is carried out in horizontal and vertical oil boreholes; the LWD results are confirmed by comparison with logging data run by well-known companies in same but uncased boreholes.

A number of the obtained results have been published as articles, patents, patent applications, and reports at international conferences (see References).

Subject and methods of investigation when LWD. Features of LWD measurements. The subject of investigation in LWD are rocks in the section of oil-and-gas boreholes; more specifically, it is the petrophysical parameters of oil and gas reservoirs while drilling. The employed logging methods allow to measure through special thick-walled steel drill pipes. In our developments, radioactive logging (RL) is used, namely gamma-ray logging (GR), neutron-neutron logging (NNL), neutrongamma logging (NGL), gamma-gamma logging (GGL), as well as induction-type logging (ITL) (through non-magnetic pipes).

During LWD measurements, the logging sensors are in special drill pipes of different diameters and wall thicknesses (drill collar, DC). Drill collars are located immediately behind the drilling system and have an increased diameter compared to the next string of drill pipes.

Transmitters and receivers of high-frequency electromagnetic waves are mounted in the DC (prepared based on steel (at the first stage) or non-magnetic steel pipes) closest to the bit for making induction-type measurements (propagation resistivity), as well as a sensor of natural gamma-ray and other devices for measuring drilling parameters (measurement-while-drilling, MWD). The MWD system is used, in particular, for navigation in horizontal formations (geosteering). The LWD system with RL devices (usually NNL, GGL) built-in the DC is right behind. The devices are used to obtain the parameters of oil and gas reservoirs while drilling.

Individual logging methods for LWD. Parameters of shaliness. Shaliness is animportant lithological property; it should also be taken into account when obtaining petrophysical parameters using logging methods. To determine the shale content of terrigenous rocks, empirical relationships between shale material according to laboratory data and GR readings are most often used. We proposed a method for quantitative estimation of the content of clay minerals (clay) based on GR [Bondarenko, Kulyk, 2024] to improve the accuracy of estimating the reservoir properties, particularly the total porosity based on NNL data.

The gamma-ray index is an interpretation parameter of the GR. Using numerous borehole examples, it was proved invariant for a given borehole section at open-hole logging and in the presence of a steel (drill or casing) string. GR index is also practically independent of the borehole diameter, etc. Taking this into account, the corresponding dependencies for determining the shale and clay contents with the help of the GR are universal, and we use them during LWD [Bondarenko, Kulyk, 2024].

*LWD propagation resistivity.* An elementary sonde (array) for the ITL consists of one transmitter (T) and two receivers (R). The latter are relatively close to each other and together are the sensor of the tool; the distance between the midpoint of the two R and the T serves as the sonde spacing. The compact ITL tool for LWD consists of two R and two T, i.e., it uses two sonde spacings (60 cm and 100 cm long). The frequencies of electromagnetic wave radiation are 2 MHz and 400 kHz.

We operate with the resistivity of rocks obtained by measuring the **p**hase **s**hift of waves propagated in the rock (propagation resistivity,  $R_{ps'}$ , Om·m). Thus, the ITL tool for LWD makes it possible to obtain four  $R_{ps}$  parameters (for two sondes and two frequencies) with different, high enough (in the order of 75 cm), depths of investigation. This provides for high informativity of the ITL when LWD.

**Combination logging methods for LWD.** *Total porosity of reservoirs.* The NNL method is implemented as compensation neutron logging (CNL), which uses the ratio of neutron detector readings at two source-detector spacings to determine *neutron porosity*. Moreover, the CNL significantly reduces the influence of a number of factors: mineralization of pore fluid, borehole parameters and its filling, the tool, etc.

In low-shaly water-oil reservoirs, neutron porosity is close to the true one. In the general case of shaly reservoirs, the porosity determined by the CNL is apparent one due to the hydrogen in clay minerals. To determine the *total (true) porosity of water-oil reservoirs* based on CNL for LWD, we proposed to make a correction for the hydrogen index of clay minerals using GR (CNL+GR) [Kulyk, Bondarenko, 2024].

For gas-saturated reservoirs, the total (true) porosity by CNL+GR is underestimated due to the reduced amount of hydrogen per unit volume of rock, and the porosity by  $GGL_D$  is overestimated due to the reduced total density of the reservoir. Determining the total porosity of gas-saturated reservoirs

is only possible by combining these two approaches. We have developed a method for determining *the true porosity of gas-saturat- ed formations* as the weighted mean of the porosities by CNL+GR and GGL<sub>D</sub> (with appropriate weighting factors) [Bondarenko, Kulyk, 2017].

**Density of rocks.** The set of RL methods for LWD measurements usually includes gamma-gamma logging to obtain rock density (GGL<sub>D</sub>). The disadvantage of the traditional implementation of GGL<sub>D</sub> during LWD is the disregard for the influence of the natural gamma-ray of rocks on the readings of the 2GGL tool, which can lead to significant errors in the determined density. To more accurately determine the *density of reservoirs by GGL<sub>D</sub>* for LWD, we proposed to make a correction for gamma-background (GB) [Kulyk, Bondarenko, 2024].

The wall thickness of the drill collar must be limited due to the shallow depth of the  $GGL_D$  method (~ 12 cm) for its effective usage. The LWD conditions of horizontal boreholes and a <sup>60</sup>Co gamma source in the 2GGL<sub>D</sub> tool meet these requirements [Kulyk, Bondarenko, 2023].

To determine the density of rocks during LWD of all types of boreholes without restrictions on the diameter and wall thickness of the DC, we proposed a method of neutron-gamma density logging (NGL<sub>D</sub>). The NGL<sub>D</sub> method has the maximum possible depth of investigation of RL methods (several times greater than the  $GGL_{D}$ ). The contribution of GB to the readings of the  $2NGL_{D}$  (or  $1NGL_{D}$ ) tool is subtracted. The influence of the clay content of rocks, which essentially underestimates their density by NGL<sub>D</sub>, can be eliminated using our correction semi-empirical formula that takes into account the content of clay minerals, porosity, and lithotype of the rock [Kulyk et al., 2023; Kulyk, Bondarenko, 2024].

*Oil and gas saturation factors.* Resistivity  $R_{\rm ps}$  (propagation resistivity) is closely, although in general not simply and ambiguously, related to other petrophysical parameters of reservoirs — shaliness, effective porosity, density, lithology, etc. For example, the *oil saturation factor S*<sub>o</sub> is determined through

the parameter  $R_{\rm ps}$  for a given porosity and low shale content. Interestingly, according to LWD measurements in carbonate oil-saturated formations, there is a correlation between porosity and the factor  $S_{\rm o}$ : the higher the porosity, the higher the  $S_{\rm o}$ .

According to the method we have developed, the gas saturation factor  $S_g$  can be obtained using the CNL+GR+GGL<sub>D</sub> combination as a value that is proportional to the ratio of the difference in density and neutron porosities to the true porosity determined by the same combination [Bondarenko, Kulyk, 2017].

Apparatus modules for LWD. The IGPh and USP have proposed several fundamentally new approaches to creating devices for the MWD and LWD systems. Instead of mounting the devices in each DC, universal modules of small diameter are used. The modules are inserted into the corresponding DC before carrying out work. Besides, in the LWD system, the RL module is supplemented with an NGL device and gamma-background detector (GB) (aka as a gamma-ray logging detector) [Bondarenko et al., 2019, 2023; Danyliv et al., 2021, 2022; Kulyk, Bondarenko, 2021, 2023]. An addition to the LWD system with the compact device of induction-type logging (ITL) is being developed, too. These LWD systems allow for a much more accurate and extensive determination of petrophysical parameters of oil and gas reservoirs based on individual methods (GR, ITL) and using combinations (CNL+GR, GGL<sub>D</sub>+GB, NGL<sub>D</sub>+GB+GR, CNL+ GR+GGL<sub>D</sub>, RL+ITL).

**Examples of using** the author's developments (methods, tools, interpretation methodology) while drilling horizontal boreholes have shown their high technological effectiveness and efficiency. The parameters of the reservoirs obtained when LWD are confirmed by independent measurements by the PEX tool (Schlumberger) in the same open boreholes after drilling [Kulyk, Bondarenko, 2023].

**Conclusions.** The results show the potential of the developed methods, devices, and methodology for LWD in Ukraine. An important factor is that domestic inventors have the necessary set of ideas and know-how and all the opportunities to improve the development

#### References

- Bondarenko, M., & Kulyk, V. (2017). Determination of basic gas reservoir parameters from RL taking into account PT-conditions. *Nafta-Gaz*, (3), 11—17. https://doi.org/10.18668/NG.2017.03.
- Bondarenko, M.S., & Klyk, V.V. (2024). New capabilities of application of gamma-ray logging in borehole geophysical investigations through steel string. *Journal of Geology, Geography and Geoecology, 33*(3), 453—462. https://doi.org/10.15421/112442.
- Bondarenko, M.S., Kulyk V.V., & Danyliv S.M. (2023). Universal apparatus module of RL for LWD.XVII Intern. Sci. Conf. «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», Kyiv, Ukraine, 7—10 November 2023. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520173.
- Bondarenko, M.S., Kulyk, V.V., Yevstakhevych, Z.M., Danyliv, S.M., Zinenko, V.V., & Los, M.V. (2019). Apparatus and methodical complex for determination of oil-gas reservoirs parameters while drilling horizontal wells. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, (4), 20–25. http://doi. org/10.17721/1728-2713.87.03 (in Ukrainian).
- Danyliv, S.M., Karmazenko, V.V., Stasiv, O.S., Bondarenko, M.S., & Kulyk, V.V. (2021). Apparatus-methodical complexes to determine petrophysical parameters of hydrocarbon reservoirs while drilling and in cased boreholes. *Ukrainian Geologist*, (1-2), 84—92. https://doi.

and adapt it to specific requirements and subsequent implementation.

org/10.53087/ug.2021.1-2(44-45).238935 (in Ukrainian).

- Danyliv, S.M., Kulyk, V.V., Bondarenko, M.S., Dmytrenko, O.V., Los, M.V., & Zinenko, V.V. (2022). Module of radioactivity logging for investigating the oil-and-gas reservoirs while drilling. Ukr. Patent for invention № 125356 (in Ukrainian).
- Kulyk, V.V., & Bondarenko, M.S. (2021). Combined module of radioactivity logging for determining the parameters of oil-and-gas reservoirs while drilling horizontal boreholes. *Ukr. Patent for a useful model № 146993* (in Ukrainian).
- Kulyk, V.V., & Bondarenko, M.S. (2024). Method for determining petrophysical parameters of reservoirs with the help of RL while drilling of vertical, deviated and horizontal oil-and-gas boreholes. *Ukr. Patent application for a useful model № u2024059233* (in Ukrainian).
- Kulyk, V.V., & Bondarenko, M.S. (2023). Universal apparatus module of radioactivity logging for the investigation of oil-and-gas reservoirs while drilling. *Geophysical Journal*, 45(6), 50—66. https://doi.org/10.24028/gj. v45i6. 293307.
- Kulyk, V.V., Bondarenko, M.S., Danyliv, S.M., & Karmazenko V.V. (2023). Method for determining the bulk density of oil-and-gas reservoirs when logging-while-drilling and the tool for its realization. *Ukr. Patent application for an invention* № *a202300803* (in Ukrainian).

# Розвиток і впровадження в Україні технології «каротаж в процесі буріння». Методи і пристрої для визначення петрофізичних параметрів колекторів при бурінні вертикальних, похилих і горизонтальних нафтогазових свердловин

## М.С. Бондаренко<sup>1</sup>, В.В. Кулик<sup>1</sup>, С.М. Данилів<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна <sup>2</sup>ТОВ «Укрспецприлад», Київ, Україна Каротаж в процесі буріння (logging-while-drilling — LWD) є передовою технологією, яка підвищує ефективність бурильно-каротажних робіт. Вартість послуг і технологічна монополія іноземних фірм, а у 2022 р. — їхній вихід з України, актуалізують розробку вітчизняних апаратурно-методичних комплексів LWD. Групою ядерної геофізики Інституту геофізики НАН України разом з ТОВ «Укрспецприлад» створено ряд способів і пристроїв для визначення петрофізичних параметрів колекторів при LWD. Ефективність розробок підтверджена свердловинними випробуваннями і порівнянням з незалежними даними.

**Ключові слова:** нафтогазова свердловина, каротаж в процесі буріння, комплекс методів, сукупність апаратурних пристроїв, методика інтерпретації, петрофізичний параметр.

УДК 5.504

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322465

## Assessment of pollutants emissions into the atmosphere due to the fire at the Kalynivka oil depot caused by a missile strike in March 2022

## S.G. Boychenko<sup>1,2</sup>, V.I. Karamushka<sup>1</sup>, Ie.V. Khlobystov<sup>1</sup>, 2025

<sup>1</sup>National University of Kyiv-Mohyla Academy, Kyiv, Ukraine <sup>2</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The study assessed the scale of atmospheric pollution as a result of the fire at the Kalynivka oil depot in March 2022 due to missile shelling, which led to the burning of 6124.6 tons of gasoline and diesel fuel. Using an approved method, the volumes of pollutants emitted into the atmosphere due to the fire were calculated, namely:  $CO_2$  (14.3 tons), particulate matter  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  and soot (27.4 tons),  $NO_x$  (5.8 tons),  $SO_2$  (0.05 ton) and also  $H_2O$  (6.5 tons), etc. Burning truck tires additionally caused emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons, metalcompounds, and other toxic substances. Extinguishing the fire using fluorinated foam (AFFF, AFFF AR) caused additional emissions of fluorinated surfactants. The fire extinguishing area was about 1.4 hectares, and the volume of foam used was 12—15 thousand liters. The discharged substances pose serious risks to ecosystems, including toxicity, climate impacts, and threats to human health.

Key words: oil depot fire, atmospheric pollution, emission assessment.

**Introduction.** On March 24, 2022, a massive fire broke out at the AC-Investment Ltd Kalynivka oil depot (Kyiv region, Ukraine) due to missile fire from the aggressor country, resulting in massive environmental pollution [Karamushka et al., 2024]. Diesel and gasoline combustion produces a wide

range of pollutants that enter the atmosphere. These are carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), nitrogen dioxide (NO<sub>x</sub>), carbon monoxide (CO), particulate matter of mean aerodynamic diameter 10  $\mu$ m (PM<sub>10</sub>) and 2.5  $\mu$ m (PM<sub>2.5</sub>), soot, dioxins, benzo(a)pyrene (B[a]P), polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHnon-methane

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Boychenko, S.G., Karamushka, V.I., & Khlobystov, Ie.V. (2025). Assessment of pollutants emissions into the atmosphere due to the fire at the Kalynivka oil depot caused by a missile strike in March 2022. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 79—84. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322465.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

volatile organic compounds (NMVOC), metals and their oxides, sulfur oxides (SO<sub>x</sub>), etc. [Bernodusson et al., 2018].

According to [Bernodusson et al., 2018], burning 1 kg of gasoline ( $C_7H_{16}$ , normal gasoline) involves, on average, 3.5 kg of oxygen. The emissions contain, on average, 3.1 kg of CO<sub>2</sub> and 1.4 kg of H<sub>2</sub>O.When 1 kg of diesel fuel is burned, about 3.5 kg of oxygen is involved, releasing about 3.18 kg of CO<sub>2</sub> and 1.25 kg of H<sub>2</sub>O. The estimates are for ideal engine conditions, but in an emergency resulting from a fire, these values can be different.

The purpose of the study is to estimate the volumes of pollutant emissions from the fire caused by a missile strike at the Kalynivka oil depot.

**Methods and materials.** To assess the atmospheric emissions and the extent of damage caused, we used the methodology approved by the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine [Order..., 2022]. For each substance or mixture of substances, the released mass  $M_{\text{emis}(i)}$  was calculated using the formula:

$$M_{\rm emis} = E_{f(i)} \rho_0 M_{bs(i)}, \text{ton}$$
(1)

where (*i*) is the pollutant or mixture (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, etc.);  $E_{f(i)}$  is emission factor for a given fuel, c<sub>o</sub> is coefficient of the average density of the fuel substance;  $M_{bs(i)}$  is mass of the burned substance, ton. If the volume of the burned substance is known, its mass is calculated using the density c<sub>o</sub> (c<sub>o(Gasoline)</sub> is 0.68 and c<sub>o(Diesel)</sub> is 0.78).

The cost of damage (CD) caused by the emissions during martial law was calculated using the formula:

$$AD = M_{emis(T)} \times$$
  
$$TR \cdot C_{PH} \cdot C_{EI} \cdot C_{SE} \cdot C_{TE} \text{ in UAH,} \qquad (2)$$

where  $M_{\rm emis(T)}$  is the mass of a pollutant released into the atmosphere; TR is the tax rate for emissions of pollutants into the atmosphere (in accordance with Article 243 of the Tax Code of Ukraine), UAH/ton; CPH is the coefficient of pollutant hazard class; C<sub>EI</sub> is the coefficient of environmental impact depending on event duration (for events lasting

less than12 hours it is 4, 12 to 24 hours, 5, over 24 hours, 6);  $C_{SE}$  is the coefficient depending on the scale of the event (till 50 is 1.2; from 50 to 149 is 2; from 150 to 449 is 3; from 500 to 999 is 4; 1000 tons and more is 5);  $C_{TE}$  is the coefficient of event type (for martial law it is 10, for the state of emergency without the possibility of living on the territory, 5, for the state of emergency, 3).

Research results. Emissions of pollution into the atmosphere during the combustion of petroleum products. According to the administration of the oil depot, at the time of the missile strike, 4515.5 tons of diesel fuel and 1603.2 tons of gasoline were stored there. Also, 9 DAF FT and MAN TGA tractors and trucks were located on the territory of the oil depot with about 3.2 tons of fuel in the tanks and 2.7 tons of diesel fuel remaining. The estimated amount of fuel lost was 6124.6 tons. Emissions were estimated taking into account the amount of fuel burned, and the emission factor of pollutants used for «open burning» according to the methodology of [Order..., 2022].

At the same time, there are a number of uncertainties associated with emission estimates regarding the values of emission factors of a pollutant for a certain fuel, the volume of fuel stored, and the part that burned. Some fuel could have seeped into the soil and groundwater, and some remaining spilled on the territory of the oil depot after the fire was extinguished. Therefore, for further assessment of pollutant emissions into the atmosphere, we assume that 90 % of the available mass of fuel was completely burned.

According to our calculations using the methodology of [Order..., 2022] given the emission factors and fuel type, the emissions included:  $CO_2$ —14326.9 tons,  $H_2O$ —6470.2 tons, particulate matters ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ) and soot — 27.6 tons and  $NO_x$  — 5.8 tons, and  $SO_2$ —0.05 tons (Table 1). As we can see, the largest share of emissions is carbon dioxide ( $CO_2$ ), followed by significant but noticeably smaller emissions of carbon monoxide (CO), suspended particles (PM), and soot.

**Emissions of pollutants into the atmosphere from burning car tires.** At the time of

>

the missile attack, nine tractors and gas trucks with trailers were on the territory of the oil depot. They burned down, polluting the environment. Each vehicle had ten wheels with tires, with a total weight of approximately 6.3 tons.

Chemicals in car tires include polycyclic aromatic hydrocarbons, metals, and other toxic and carcinogenic compounds [Mohamad et al., 2016]. On average, a truck tire consists of natural and synthetic rubber (40—45 %), carbon black (20—30 %), acid clays and metal oxides (10—27 %), cord metal and textile threads (2—10 %), silicon dioxide (5—15 %), various additives (7—10 %), and oils, resins, and adhesive mixtures (7—10 %) [Klockner et al., 2020] (figure).

As shown in [Mohamad et al., 2016], the solid residue after burning tires is about 51 % of the initial mass. Table 2 shows the percentage of chemicals remaining in the tire ash according to [Mohamad et al., 2016] and the calculated masses of pollutants thathy-

pothetically could have remained in the ash (i.e., 3.213 tons, or 51 % of the total mass). The residue of the substance in the ash from tires burned at the Kalynivka oil depot on March 24, 2022, is shown on Fig. 1.

Emissions of pollutants into the atmosphere from the use of fluorinated foam for fire extinguishing. Fluorinated foams (fluor synthetic film-forming agent type AFFF, AFFF AR) are used to extinguish light petroleum products. The standard coverage of the fire area with a foam layer is  $5 \text{ l/m}^2$ , but the amount of foam used can be greater. Fluorinated foams consist of an average of water (80%), solvents (propylene glycol, 10%), fluorinated surfactants (CFCs, 3%), hydrocarbon surfactants (2 %), foaming agents (4 %), and stabilizers (1 %). These components are resistant to biodegradation and can be accumulated in living organisms, provoking oncological diseases and endocrine disruption [Sunderland et al., 2019].

Substance	$E_{f(i)}$	Diesel, ton $M_{ m emis(D)}$	Gasoline, ton $M_{ m emis(G)}$	Total, ton $M_{ m emis(T)}$
Nitrogen oxides (NO <sub>x</sub> )	0.0014	4.441	1.374	5.814
Ammonia (NH <sub>3</sub> )	0.000003	0.010	0.003	0.012
Benzo(a)pyrene (C <sub>2</sub> OH <sub>15</sub> )	3.02E-11	9.58E-08	2.96E-08	1.25E-07
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	3.4498184	10942.142	3384.740	14326.882
Carbon monoxide (CO)	0.0063	19.982	6.181	26.164
Cadmium (Cd)	0.00002	0.063	0.020	0.083
Copper (Cu)	0.0000016	0.005	0.002	0.007
Arsenic, inorganic compounds (AsIII, AsV)	0.0000038	0.012	0.004	0.016
NMVOC	0.0018	5.709	1.766	7.475
Nickel (Ni)	0.000038	0.121	0.037	0.158
Mercury (Hg)	0.0000047	0.015	0.005	0.020
Lead (Pb)	0.0000049	0.016	0.005	0.020
Sulfur dioxide (SO <sub>2</sub> )	0.000013	0.041	0.013	0.054
PM <sub>2.5</sub>	0.0026	8.247	2.551	10.798
PM <sub>10</sub>	0.0026	8.247	2.551	10.798
Soot (56 % from PM <sub>2.5</sub> )	0.001456	4.618	1.429	6.047
Selenium (Se, mg/m <sup>3</sup> )	0.0000004	0.001	3.92E-04	0.002
Chromium (Cr VI)	0.0000013	0.004	0.001	0.005
Zinc (Zn)	0.00052	1.649	0.510	2.160

Table 1. Calculated emissions of pollutants due to the combustion of petroleum products (gasoline and diesel fuel)



The residues of the substance in the ash from tires burned at the Kalynivka oil depoton March 24, 2022.

Almost 1.4 hectares of the oil depot area were subject to fire extinguishing. This means that at least up to 15 thousand liters of fluorinated foam were used. Fluorinated surfactants enter the atmosphere through evaporation and, due to their stability, can remain there for a long time [Krafft, Riess, 2015]. In the troposphere, they have the properties of greenhouse gases due to their spectral characteristics, but within a few weeks, they can be washed out of the atmosphere by dry or wet sedimentation and then accumulated in water bodies, soils, and living organisms in the process of biomagnification [Saxena, 2019]. However, CFCs can remain in the stratosphere for several years [IPCC, 2021]. Under the influence of UV radiation, they are destroyed. The fluorine residues catalyze the destruction of stratospheric ozone (one fluorine molecule can destroy from  $10^3$  to  $10^5$  ozone molecules). Thus, using special mixtures to extinguish fires has an additional negative impact on the environment.

The costof damage caused by emissions of pollutants or mixtures of substances into the atmosphere. The destruction of the Kalynivska oil depot caused significant material losses for businesses and environmental losses. To assess environmental losses, we used the same methodology approved by the Ministry of Environment [Order ..., 2022], namely formula (2). According to our estimates, the total of losses from atmospheric pollution as a result of the combustion of only diesel and gasoline is about 184 million UAH or 4.5 million USD. If we take into account emissions from the combustion of other objects and materials and the pollution of the ground and groundwater, the losses will be significantly higher.

**Conclusions.** The fire at the Kalynivka oil depot burned about 6124.6 tons of fuel, which resulted in significant emissions of carbon

Substance	Ratio of substances, %	Mass of substance, kg
Carbon Dioxide (CO <sub>2</sub> )	0.1	6.3
Silicon Dioxide (SiO $_2$ )	12.7	800.1
Aluminium Oxide $(Al_2O_3)$	0.51	32.13
Copper (II) Oxide (CuO)	0.21	13.23
Sulfur Trioxide (SO <sub>3</sub> )	16.9	1064.7
Calcium Oxide (CaO)	3.54	223.02
Potassium Oxide (K <sub>2</sub> O)	0.36	22.68
Chlorine (CI)	0.19	11.97
Zinc Oxide (ZnO)	14.6	919.8
Iron(III) Oxide ( $Fe_2O_3$ )	1.38	86.94
Bromine (Br)	0.34	21.42
Cobalt (II)Oxide (CoO)	0.14	8.82

Table 2. The amount of chemicals remaining in the tire ash and residues after the fire at the Kalynivka oil depot

dioxide (14.3 tons), water vapor (6.5 tons), particulate matter (27.6 tons), and other toxic substances, including  $\rm NO_x$  (5.8 tons) and  $\rm SO_2$  (0.05 ton). Burning truck tires additionally released polycyclic aromatic hydrocarbons, heavy metals, and other toxic compounds.

#### Referents

- Bernodusson, J. (2018). Combustion of Fossil Fuels. Icelandic Transport Authority, 18 p. Retrieved from https://www.samgongustofa.is/ media/siglingar/skyrslur/Combustion-of-fossil-fuels-2018-en-1.pdf (accessed on 15 January 2025).
- IPCC 2021: Summary for Policymakers. (2021). In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Bass.* Cambridge University Press. Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/(accessed on 15 January 2025).
- Karamushka, V., Boychenko, S., & Havryliuk, R. (2024). Environmental consequences resulted from the oil depots' deterioration by the RF's missile attacks. *EGU General Assembly 2024*, *Vienna, Austria*. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-478.
- Klockner, P., Seiwert, B., Eisentraut, P., Braun, U., Reemtsma, T., & Wagner, S. (2020). Characterization of tire and road wear particles from road runoff indicates highly dynamic particle properties. *Water Research*, 185, 116262. https://doi.org/10.1016/j. watres.2020.116262.
- Krafft, M., & Riess, J. (2015). Per- and polyfluorinated substances (PFASs): Environmental

When extinguishing the fire at the oil depot with fluorinated foams, fluorinated surfactants (FSPs) were also released into the atmosphere. The released substances pose serious risks to human health and ecosystems, including toxicity and climate impact.

challenges. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 20(3), 192—212. https://doi. org/10.1016/j.cocis.2015.07.004.

- Mohamad, S., Shahidan, S., Leman, A., & Hannan, N. (2016). Analysis of Physical Properties and Mineralogical of Pyrolysis Tires Rubber Ash Compared Natural Sand in Concrete material. *Materials Science and Engineering*, *160*, 012053. https://doi.org/10.1088/1757-899X/ 160/1/012053.
- Order of 13.04.2022 No. 175 of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine (2022). Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-22#Text(in Ukrainian).
- Sunderland, E., Hu, X., Dassuncao, C., Tokranov, A., Wagner, C., & Allen, J. (2019). A review of the pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 29, 131—147. https://doi. org/10.1038/s41370-018-0094-1.
- Saxena, P., & Sonwani, S. (2019). Criteria Air Pollutants and Their Impact on Environmental Health. Singapore: Springer, 157 p. https:// doi.org/10.1007/978-981-13-9992-3.

# Оцінка обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферу внаслідок пожежі на нафтобазі в Калинівці через ракетний обстріл у березні 2022

## С.Г. Бойченко<sup>1,2</sup>, В.І. Карамушка<sup>1</sup>, Є.В. Хлобистов<sup>1</sup>, 2025

<sup>1</sup>Національний університет «Києво-Могилянська Академія», Київ, Україна <sup>2</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

У дослідженні оцінюються масштаби забруднення атмосфери внаслідок пожежі на нафтобазі «Калинівка» у березні 2022 р. через ракетний обстріл, що призвело до

спалювання 6124,6 т бензину та дизельного палива. З використанням затвердженої методики було обраховано обсяги забруднень, викинутих атмосферу через пожежу. Вони становили:  $CO_2 - 14,3$  т,  $H_2O - 6,5$  т, твердих частинок розмірами  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10} - 27,4$  т,  $NO_x - 5,8$  т,  $SO_2 - 0,05$  т. Горіння шин вантажних автомобілів додатково спричинило викиди полі циклічних ароматичних вуглеводнів, сполук металів та інших токсичних речовин. При гасінні пожежі з використанням фторованої піни (AFFF, AFFF AR) відбулися додаткові викидів фторованих поверхнево-активних речовин. Площа гасіння пожежі становила близько 1,4 га, а обсяг використаної піни становив 12—15 тис. літрів. Викинуті речовини створюють серйозні ризики для екосистем, включаючи токсичність, вплив на клімат та загрозу здоров'ю людей.

**Ключові слова:** пожежа на нафтобазі, забруднення атмосфери, оцінка обсягів викидів.

УДК 5.502.3/.7

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322466

## Spatiotemporal patterns of atmospheric carbon monoxide over the Crimean Peninsula and the Black Sea: Sentinel-5P/TROPOMI data (2019—2024)

S.G. Boychenko<sup>1,2</sup>, D.I. Khlobystov<sup>3</sup>, N.M. Maidanovych<sup>4</sup>, 2025

<sup>1</sup>National University of Kyiv-Mohyla Academy, Kyiv, Ukraine <sup>2</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine <sup>3</sup>Taras Shevchenko National University, Kyiv, Ukraine <sup>4</sup>Leonid Pogorilyy UkrNDIPVT, Doslidnytske, Ukraine

The spatiotemporal distribution of the annual average of atmospheric CO column densities based on TROPOMI data from the Sentinel-5P satellite over the Crimean Peninsula and the Black Sea for 2019—2024 was analyzed. The average annual value over the Crimean Peninsula was  $(3.2-3.6)\cdot10^{-2}$  mol/m<sup>2</sup>, while over the surface of the Black Sea, it was  $(3.0-3.7)\cdot10^{-2}$  mol/m<sup>2</sup>, and in coastal seawater —  $(3.7-4.2)\cdot10^{-2}$  mol/m<sup>2</sup>. Spatial differences in the CO concentration may be associated with the characteristics of atmospheric processes (photochemical processes and atmospheric circulation), microbial oxidation, gas hydrate processes in the sea, and anthropogenic activity.

Key words: carbon monoxide, atmosphere, Sentinel-5P satellite, TROPOMI.

**Introduction.** Carbon monoxide (CO) is a significant atmospheric trace gas. Approximately 40 % of its emissions originate from natural sources and 60 %, from anthropogenic activities [Holloway et al., 2000; IPCC, 2021]. Global annual emissions of

CO are estimated [Conte et al., 2019; Cordero et al., 2019; Zuo et al., 1998; Holloway et al., 2000] at ~2.5 $\cdot$ 10<sup>3</sup> Tg CO/yr, with 30 % (~0.75 $\cdot$ 10<sup>3</sup> Tg CO/yr) from biomass burning, 30 % (~0.76 $\cdot$ 10<sup>3</sup> Tg CO/yr) from methane oxidation, 27 % (~0.68 $\cdot$ 10<sup>3</sup> Tg CO/yr) from the

Citation: Boychenko, S.G., Khlobystov, D.I., & Maidanovych, N.M. (2025). Spatiotemporal patterns of atmospheric carbon monoxide over the Crimean Peninsula and the Black Sea: Sentinel-5P/TROPOMI data (2019—2024). *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 84—89. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322466.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

oxidation of biogenic hydrocarbons, and approximately 12 % ( $\sim 0.3 \cdot 10^3$  Tg CO/yr) from fossil fuel combustion. The average concentration of CO in the atmosphere is about 90 ppbv, corresponding to an atmospheric burden of approximately  $0.4 \cdot 10^3$  Tg CO. The primary sink for CO in the atmosphere is its reaction with hydroxide (OH), which destroys it. The sensitivity of CO to the OH field varies both spatially and seasonally. A 30 % increase in OH concentration results in CO reduction ranging from 4 % to 23 %, with lower sensitivities near emission regions where advection is a strong local sink. The atmospheric lifetime of CO ranges from approximately 10 days in summer over continental regions to over a year at the poles during winter, where lifetime is defined as the turnover time in the troposphere due to reactions with OH. The lifetime of CO in the troposphere averages around two months. Methane  $(CH_4)$  oxidation is the only source of CO across all atmospheric, contributing a total of 0.76·10<sup>3</sup> Tg CO/yr [Zuo et al., 1998; Holloway et al., 2000]. The reaction of methane with the hydroxyl radical produces CO as a byproduct. Therefore, this CO source depends on the distribution of both OH and  $CH_4$  in the atmosphere. Climate conditions can influence the concentration of carbon monoxide in the atmosphere and its degassing from the ocean [IPCC, 2021]. Precipitation and air humidity influence the oxidation processes of CO in the atmosphere and the rate of removal with precipitation, while the reaction with oxygen leads to the formation of CO<sub>2</sub>. Climate conditions also impact biological processes, such as the activity of microorganisms in soil and aquatic ecosystems, which can affect the carbon cycle and the level of CO in the atmosphere. Temperature affects fuel combustion processes and their quantity, and in cold conditions, CO emissions increase. While from arid soil, CO is released directly into the atmosphere.In the arid conditions of Crimea [Boychenko et al., 2022; Maidanovych, Khlobystov, 2023], it can create local maxima in gas concentration.

This study analyzed the spatiotemporal distribution of annual average carbon mo-

noxide (CO) column densities over the Black Sea and the Crimean Peninsula during 2019— 2024, based on data from the TROPOMI instrument aboard the Sentinel-5P satellite.

Methods and materials. The annual average carbon monoxide (CO) column densities  $(10^{-2} \text{ mol/m}^2)$  were derived from the TRO-POMI instrument aboard the Sentinel-5P satellite. Daily global coverage with a high spatial resolution of 7×7 km<sup>2</sup> was aggregated into monthly and yearly averages within grid nodes and administrative boundaries of the Black Sea and the Crimean Peninsula during 2019-2024. Data processing utilized specialized cloud-based tools, including the Google Earth Engine platform, a powerful resource for geospatial analysis and visualization [Earth..., 2023]. Maps were generated using remote sensing data provided by ESA [Gorelick et al., 2017].

Study Region: The Black Sea is an inland continental sea connected via the Bosphorus Strait to the Sea of Marmara and onward via the Dardanelles Strait to the Aegean Sea and the Mediterranean Sea. The latter is connected to the Atlantic Ocean through the Gibraltar Strait and to the Indian Ocean through the Suez Canal, the Red Sea, and the Babel-Mandeb Strait. The Crimean Peninsula is located between the northern part of the Black Sea and the western part of the Sea of Azov in the southern region of Ukraine.

Results. Assessment of the average annual atmospheric CO column density from the Sentinel-5P/TROPOMI instrument over the Crimean Peninsula (2019-2024). Analysis of imagery extracted from Sentinel-5P for 2019-2024 reveals that the average annual column density of CO was  $(3.2-3.4)\cdot 10^{-2}$  mol/m<sup>2</sup> over the Crimean Peninsula (Fig. 1). The minimum CO content, approximately  $(2.7\pm0.2)\cdot10^{-2}$  mol/m<sup>2</sup>, is typically observed in the mountainous regions of Crimea. This can be attributed to the local climate, as the Crimean Mountains receive about 900-1200 mm of precipitation annually, which facilitates the removal of CO from the atmosphere through precipitation. Additionally, the relatively low impact of anthropogenic factors contributes to this reduction

[Maidanovych, Khlobystov, 2023]. The maximum CO content is found in coastal areas and at the junction with the mainland, reaching  $(3.6\pm0.2)\cdot10^{-2}$  mol/m<sup>2</sup>. This elevated concentration is associated with active anthropogenic activities such as urban development, industrial operations, commercial activities, resort infrastructure, and military ranges. Furthermore, biological processes typical for marine ecosystems, arid climatic conditions,

and atmospheric oxidation contribute to increased CO levels. Note that, in 2022, the annual average of CO column densities dropped to approximately  $(2.9\pm0.2)\cdot10^{-2}$  mol/m<sup>2</sup>, primarily due to a decrease in industrial and agricultural production, reduced tourist flows, and a decline in the presence of enemy troops, which had moved further south into Ukraine. The seasonal variation of the CO column density over the Crimean Pen-



Fig. 1. Average annual atmospheric CO column density  $(10^{-2} \text{ mol/m}^2)$  from the Sentinel-5P/TROPOMI instrument over the Crimean Peninsula (Ukraine) in 2019—2024.

insula does not exhibit pronounced fluctuations throughout the year [Maidanovych, Khlobystov, 2023].

Assessment of the average annual atmospheric CO column density from the Sentinel-5P/TROPOMI instrument over the Black Sea (2019—2024). Carbon monoxide in surface sea waters is produced predominantly by photochemical processes, oxidized by microorganisms, and out gassed to the atmosphere. The photoproduction rate of carbon monoxide was found to be well correlated to the concentration of dissolved organic carbon in coastal and open ocean surface waters [Zuo et al., 1998; Conte et al., 2019]. The reaction between  $CH_4$  and the OH leads to the formation of CO [Holloway et al., 2000]. As a result, the CO source is influenced by the distribution of both OH and  $CH_4$  in the atmosphere, which can also be released from



Fig. 2. Average annual atmospheric CO column density  $(10^{-2} \text{ mol/m}^2)$  from the Sentinel-5P/TROPOMI instrument over the Black Sea in 2019—2024.

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

deep-sea waters, including during the decomposition of gas hydrates. The Black Sea region is an oil and gas-bearing area with an extensive network of deep faults and active hydrocarbon degassing, which may affect the distribution of CO concentration in the atmospheric air column under climate change conditions.

Analysis of imagery extracted from Sentinel-5P for 2019—2024 reveals that the average of the total CO column concentration over the surface open sea water was  $(3.1-3.5)\cdot 10^{-2} \text{ mol/m}^2$ . The minimum values of the total CO column concentration fluctuated within the range of  $(2.0-2.2)\cdot 10^{-2} \text{ mol/m}^2$  (with the lowest value in 2022), while the maximum values ranged  $(3.3-3.8)\cdot 10^{-2} \text{ mol/m}^2$  (with the highest value in 2023) (Fig. 2).

An increase in average annual atmospher-

#### Referents

- Boychenko, S., Kuchma, T., & Khlobystov, I. (2022). Changes in the Water Surface Area of Reservoirs of the Crimean Peninsula and Artificial Increases in Precipitation as One of the Possible Solutions to Water Shortages. Sustainability, 14, 9995. https://doi.org/10.3390/ su14169995.
- Conte, L., Szopa, S., Séférian, R., & Bopp, L. (2019). The oceanic cycle of carbon monoxide and its emissions to the atmosphere. *Biogeosciences*, *16*, 881—902. https://doi.org/10.5194/bg-16-881-2019.
- Cordero, P., Bayly, K., Leung, P.M., Huang, C., Islam, Z.F., Schittenhelm, R.B., King, G.M., & Greening, C. (2019). Atmospheric carbon monoxide oxidation is a widespread mechanism supporting microbial survival. *ISME Journal*, *13*(11), 2868—2881. https://doi.org/10.1038/ s41396-019-0479-8.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment, 202*, 18—27. https://doi.org/10.1016/j. rse.2017.06.031.
- Earth Engine Data Catalog. (2023). Retrieved from https://developers.google.com/earth-

ic CO column density over the Black Sea was observed in 2022 and 2024, potentially linked to the peculiarities of atmospheric processes such as photochemical reactions and atmospheric circulation, as well as microbial oxidation, gas hydrate processes in the sea, and anthropogenic activity.

**Conclusions.** The analysis of the spatiotemporal distribution of atmospheric carbon monoxide (CO) based on the Sentinel-5P/ TROPOMI instrument over the Crimean Peninsula and the Black Sea for 2019—2024 reveals that the average annual atmospheric CO column density over the Crimean Peninsula was  $(3.4\pm0.2)\cdot10^{-2}$  mol/m<sup>2</sup>. The average CO concentration overthe surface open Black Sea seawater ranged  $(3.1-3.7)\times$ ×10<sup>-2</sup> mol/m<sup>2</sup> over coastal seawater, it ranged  $(3.7-4.2)\cdot10^{-2}$  mol/m<sup>2</sup>.

engine/datasets/catalog/sentinel (accessed on 15 January 2025).

- Holloway, T., Levy, H., & Kasibhatla, P. (2000). Global distribution of carbon monoxide. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 105, 12123—12147. https://doi.org/10.1029/1999jd 901173.
- IPCC 2021: Summary for Policymakers. (2021). In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Bass.* Cambridge University Press. Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/ (accessed on 15 January 2025).
- Maidanovych, N., & Khlobystov, D. (2023). Assessment of atmospheric CO vertical column density over the Crimean Peninsula (Ukraine) by the TROPOMI instrument on the Sentinel-5 Precursor satellite. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Kyiv, Ukraine, November 2023. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520158.
- Zuo, Y., Guerrero, M., & Jones, R. (1998). Reassessment of the Ocean-To-Atmosphere Flux of Carbon Monoxide. *Chemistry and Ecology*, *14*(3-4), 241—257. https://doi.org/10.1080/027 57549808037606.

## Просторово-часовий розподіл атмосферного оксиду вуглецю над Кримським півостровом та Чорним морем: дані Sentinel-5P/TROPOMI (2019—2024)

## С.Г. Бойченко<sup>1,2</sup>, Д.Є. Хлобистов<sup>3</sup>, Н.М. Майданович<sup>4</sup>, 2025

<sup>1</sup>Національний університет «Києво-Могилянська Академія», Київ, Україна <sup>2</sup>Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна <sup>3</sup>Національний університет імені Тараса Шевченка, Київ Україна <sup>4</sup>УкрНДІПВТ ім. Леоніда Погорілого, смт. Дослідницьке, Україна

Аналіз просторово-часового розподілу оксиду вуглецю (СО) у стовпі атмосферного повітря на основі даних TROPOMI зі супутника Sentinel-5P над Кримським півостровом і Чорним морем за 2019—2024 рр. показав, що його середньорічні значення над Кримським півостровом становили ( $3.4\pm0.2$ )· $10^{-2}$  моль/м<sup>2</sup>, водночас над поверхнею Чорного моря коливалися в межах (3.0-3.7)· $10^{-2}$  моль/м<sup>2</sup>, а у прибережній морській воді — (3.7-4.2)· $10^{-2}$  моль/м<sup>2</sup>. Просторові відмінності у вмісті СО в атмосфері можуть бути пов'язані з особливостями атмосферних процесів (фотохімічні процеси та атмосферна циркуляція), процесами окислення мікроорганізмів, процесами в морі та антропогенною діяльністю.

Ключові слова: оксид вуглецю, атмосфера, супутник Sentinel-5P, TROPOMI.

УДК 550.334

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322467

# Some problems in the interpretation of the seismotomographic model

#### I.V. Bugaienko, L.M. Zaiets, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The paper considers some problems that arise in the analysis of the velocity structure of the mantle. The seismic tomography method developed by V.S. Geyko was used. The analysis of the counter-slope high-velocity layers between the East European and African plates and between the Turanian and Arabian plates was carried out. The greatest attention was paid to the nature of the high-velocity transition zone of the upper mantle between them: when, where and under what conditions it was created. The problematic issues that arose in the interpretation of the velocity structure of the mantle of the Deccan Traps (Indian Plate) were considered, since it contradicts the theory of their origin. **Key words:** seismic tomography, mantle, problems of interpretation.

Citation: Bugaienko, I.V., & Zaiets, L.M. (2025). Some problems in the interpretation of the seismotomographic model. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 89—93. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322467.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

**Introduction.** Seismic tomography is one of the most important methods for studying the Earth's internal structure, in particular the mantle. But various discrepancies may arise when deciphering the same data, which the authors have repeatedly encountered. That is, different scientists can interpret the same results differently.

**Method.** The authors take as a basis the seismic tomography method developed by V.S. Geyko [Geyko, 2004]. This method and technique for building a three-dimensional model of the mantle on the example of Zagros is presented in the work [Tsvetkova et al., 2023].

**Data.** Fig. 1 shows a horizontal section of the three-dimensional model of the mantle at a depth of 75 km in the region, which includes the ancient East European and Turanian plates in the north, the African, Arabian and Indian plates in the south, as well as the younger Alpine-Himalayan mobile belt sandwiched between them in the center. The upper mantle of the ancient plates is highvelocity, and the mobile belt is low-velocity. In the transition zone of the upper mantle, a velocity inversion occurs (Fig. 2). It should be noted that in other tomographic models, velocity inversion usually does not occur, and



Fig. 1. Horizontal section of 75 km of a three-dimensional *P*-velocity model of the mantle of the studied region. Yellow contour line — reference velocity at a given depth. Green lines — spatial location of vertical sections presented below (Figs. 2, 3).

the top and bottom of the transition zone are highlighted as depths at which a velocity jump occurs, for example, in the work [van der Meer et al., 2018].



Fig. 2. Vertical longitudinal sections of  $27^{\circ}$  and  $55^{\circ}$ E of the three-dimensional *P*-velocity model of the mantle of the studied region (to depths of 2500 and 850 km, respectively).



Fig. 3. Vertical longitudinal section  $75^{\circ}E$  of the threedimensional *P*-velocity model of the mantle of the studied region to a depth of 2500 km (from [Zaiets et al., 2021]).



Fig. 4. Prominent structural-tectonic features of southern Asia and the Indian Ocean basin (based on [Mahoney et al., 2002]).

The most interesting and ambiguously resolved even among the authors is the question of the nature of the high-velocity transition zone of the young Alpine-Himalayan mobile belt. Fig. 2 shows two vertical sections, on which there are counter-slope high-velocity layers spreading towards each other. Perhaps these inclined layers created the high-velocity transition zone of the upper mantle (the section at 27°E shows the modern subduction of the African plate under the Aegean microplate)? Some seismotomographic works show that slabs spread from the surface into the transition zone of the upper mantle. For example, in the work [van der Meer et al., 2018], the subduction mentioned above extends to a depth of 1400 km (starting from 120 Ma and up to now).

Another variant of the development may be that this high-speed transition zone was created even before the Alpine epoch of mountain formation. And the selected inclined high-speed layers only flow into it. But here the question arises to what depth and how far they spread in it, because it is not possible to distinguish this on the model sections. The authors also believe that the idea that these layers reached the transition zone and stopped without violating its borders is false. But this version still has several guestions that do not have a clear answer. Perhaps this high-speed zone was created by the intraoceanic subduction of Neotethys. But many works, in particular [van der Meer et al., 2018], claim that the high-speed Neotethys slab is separated at the depths of 1100-2200 km. In addition, the aforementioned work indicates that this slab is separated under the Arabian plate. Many questions arise. For example, according to paleoreconstructions, for example [Torsvik et al., 2012], Neotethys 300 Ma was in the southern hemisphere and subducted there. It turns out that not only the so-called lithosphere can move, but also the mantle with it (in the above-mentioned case up to 2200 km). According to paleomagnetic data, the territory of modern Ukraine in the Devonian was located in the southern hemisphere in the region of 10-20°S [Bakhmutov, Poliachenko, 2014]. Let us assume that at that time the velocity character of the mantle under the territory of modern Ukraine was formed. Then this means that after 300 Ma not only the lithosphere, but also the mantle

#### References

Bakhmutov, V.G., & Poliachenko, E.B. (2014). New paleomagnetic data on the Silurian and Devonian sedimentary rocks of Podolia (Ukraine SW) and the kinematics of the East European platform in the Middle Paleozoic. *Geodinamika i Tektonofizika*, 5(4), 1045—1058 (in Russian). (at least up to 1000 km) was moving in the north direction. Fig. 2 (cross section 27°E) in the north shows the velocity mantle structure of the Podolia mantle.

Another interesting example of ambiguity is the velocity mantle structure beneath the Deccan Traps (Fig. 3), one of the largest volcanic formations on Earth. The magmatic province is considered to be the product of a mantle plume and covers a significant part of western peninsular India. The Deccan igneous province is marked by a voluminous basaltic flow, closely related to the drift of the Indian Plate over the Réunion plume (Reunion Island in the Indian Ocean), during which the microcontinent of the Seychelles separated from the western continental margin of India. This drift is demonstrated in Fig. 4. The active volcano on Reunion Island is associated with a mantle hotspot. According to some scientists, it was this mantle hotspot that served as a source of magmatic material for the Deccan Plateau traps about 65 million years ago. The trace of this mantle hotspot on the surface of the earth is also marked by the following structures: the Chagos-Laccadisse Rift, the Mascarene Plateau, and the island of Mauritius (formed 18 and 28 million years ago).

According to seismic tomography data, a high-speed heterogeneity of 50—1900 km is distinguished under the Deccan Traps. How did such an intrusion into the mantle from a depth of 1900 km arise? It turns out that in this case, not only the lithosphere, but also the mantle (at least to a depth of 1900 km) drifts in the northward direction.

**Conclusions.** In this work, the authors considered only a few cases of ambiguity in the interpretation of seismic tomography data, demonstrating that the experience of the researcher and his ability to integrate with other methods are of great importance.

- Geyko, V.S. (2004). A general theory of the seismic travel-time tomography. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 26(1), 3—32.
- Mahoney, J.J., Duncan, R.A., Khan, W., Gnos, E., & McCormick, G.R. (2002). Cretaceous volcanic rocks of the South Tethyan suture zone, Pakistan: implications for the Reunion hotspot

and Deccan Traps. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(1), 295—310. https://doi.org/10. 1016/S0012-821X(02)00840-3.

- Torsvik, T.H., Van der Voo, R., Preeden, U., Niocaill, C.M., Steinberger, B., Doubrovine, P.V., van Hinsbergen, D.J.J., Domeier, M., Gaina, C., Tohver, E., Meert, J.G., McCausland, P.J.A., & Cocks, L.R.M. (2012). Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. *Earth-Science Reviews*, 114, 325–368. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007.
- Tsvetkova, T.O, Gintov, O.B, Bugaienko, I.V, & Zaiets, L.M. (2023). The deep structure of the Zagros mountain system according to Taylor approximation seismic tomography data.

*Geofizicheskiy Zhurnal*, 45(5), 3—23. https://doi.org/10.24028/gj.v45i5.289104.

- van der Meer, D.G., van Hinsbergen, D.J.J., & Spakman, W. (2018). Atlas of the underworld: Slab remnants in the mantle, their sinking history, and a new outlook on lower mantle viscosity. *Tectonophysics*, 723, 309—448. https:// doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.004.
- Zaiets, L., Bugaienko, I., & Tsvetkova, T. (2021). Features of the velocity structure of the mantle under the Precambrian structures on the example of the Indian platform (according to seismic tomography). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(1), 211—226. https://doi.org/10.24028/gzh. 0203-3100.v43i1.2021.225550 (in Russian).

# Деякі проблеми інтерпретації сейсмотомографічної моделі

### I.В. Бугаєнко, Л.М. Заєць, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Розглянуто деякі проблеми, які виникають при аналізі швидкісної структури мантії. Використано метод сейсмічної томографії, розроблений В.С. Гейком. Проведено аналіз зустрічних похилих високошвидкісних шарів між Східноєвропейською й Африканською плитами та між Туранською й Аравійською плитами. Найбільше уваги було приділено природі високошвидкісної перехідної зони верхньої мантії між ними: коли, де і за яких умов вона була створена. Розглянуто проблемні питання, що виникли при інтерпретації швидкісної структури мантії Деканських трапів (Індійська плита), оскільки вона суперечить теорії їх походження.

Ключові слова: сейсмічна томографія, мантія, проблеми інтерпретації.

УДК 553.98:550.8:551.465(262.5)(477)

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.316924

## New 3D seismic data uncover inspiring exploration potential for oil and gas offshore the Dobrogea Foredeep, Ukraine

O.A. Kitchka<sup>1</sup>, M.V. Olshanetskyi<sup>2</sup>, A.P. Tyshchenko<sup>2,3</sup>, A.S. Vyzhva<sup>1</sup>, A.M. Zhadan<sup>2</sup>, O.V. Makovets<sup>1</sup>, P.O. Fenota<sup>2</sup>, A.S. Khmelevskyi<sup>1</sup>, L.P. Melnyk<sup>2,3</sup>, 2025

<sup>1</sup>UkrNDIgaz Kyiv Branch, Kyiv, Ukraine <sup>2</sup>Ukrgasvydobuvannya JSC, Kyiv, Ukraine <sup>3</sup>Naftogaz of Ukraine NJSC, Kyiv, Ukraine

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Kitchka, O.A., Olshanetskyi, M.V., Tyshchenko, A.P., Vyzhva, A.S., Zhadan, A.M., Makovets, O.V., Fenota, P.O., Khmelevskyi, A.S., & Melnyk, L.P. (2025). New 3D seismic data uncover inspiring exploration potential for oil and gas offshore the Dobrogea Foredeep, Ukraine. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 93—98. https://doi. org/10.24028/gj.v47i2.316924.

More than forty promising structures were identified and characterized in the Dolphin 01—10 E&P special-permits area of NJSC Naftogaz of Ukraine within the Inner zone of the northwestern Black Sea shelf based on the latest 3D seismic data processing and analysis of geological and geophysical information. The geological model of the study area was refined and detailed, and the main components of geological risk for prospective oil-and-gas bearing complexes were assessed to form a portfolio of hydrocarbon play-based exploration prospects along with its ranking and due decision-making.

**Key words:** Black Sea, E&P special permits, 3D seismics, geological interpretation, hydrocarbon leads, play-based exploration.

**Introduction.** Play-based exploration, which includes the assessment of probabilities for essential petroleum system components (charge, trap, reservoir, seal) and integration with basin analysis, is crucial for modern oil and gas exploration in regions with limited geological study. More than thirty promising structures were identified and characterized in the Dolphin 01-10 E&P special-permits area of NJSC Naftogaz of Ukraine within the Inner zone of the northwestern Black Sea shelf based on the latest 3D seismic data processing and analysis of geological and geophysical information.

**3D Seismic data acquisition, processing, and interpretation.** The northwestern shelf of the Black Sea mega-basin is the main gas production area within the Southern oil and gas region of Ukraine. This region offers Ukraine great opportunities for hydrocarbon prospecting and in the unexplored area. In 2021, PGS Exploration ASA, under a contract with NJSC Naftogaz of Ukraine, conducted high-resolution and 3D seismic acquisition coupled with detailed bathymetric mapping in a shallow water area of 5000 km<sup>2</sup> in the Inner northwestern shelf of the Black Sea [Tauvers et al., 2022].

This study delineated in detail three prominent thrusted basement steps forming the Krylov sub-basin (the Dniester, Alibey, and Tendra basement steps) and the Vylkove mini-basin, surrounded by Kiliya, Shatskyi, Lebedinyi, and Zmiinyi Island horsts of crystalline basement and filled with seismically translucent south-dipping seismic sequences segmented by inherited normal faults (Fig. 1). Seismic data treatment included state of the art depth processing techniques, namely full-waveform inversion, Kirchhoff pre-stack depth migration, and separated wave field imaging. It was a milestone in the exploration of the region [Tegnander et al., 2024]. Several types of seismic facies of the acoustic basement characterize the deep subsurface of the study area. Tentatively, the acoustic basement includes Neoarchean, Paleoproterozoic, and Neoproterozoic blocks within the Dolphin special permits on the Inner shelf.

Some important geological discoveries were made due to the processing and interpretation of the 3D marine seismic data. One is a previously unknown reflection horizon, which we call the main unconformity (the VI seismic horizon). This horizon is a bright seismic boundary with a distinct 'carved' topography associated with the base of the sedimentary cover occurring with Eo-Cimmerian angular unconformity on a heterogeneous and heterochronous acoustic basement. It is clearly traced over most of the study area [Kitchka et al., 2024].

As a result, the new 3D data was correlated with the 3D seismic cube for the Odeske-Bezymenne gas fields area and onshore 2D seismic and deep well data (in the Dobrogea Foredeep) through the coastal «mute» zone ~10 km wide where no seismic data is available. Structural relationships and elements of petroleum systems were transposed to the adjacent offshore domain, where potential traps were identified in an eroded carbonate platform of the Middle(?) to Late Paleozoic age. Integrating these data yielded a balanced 2D geological model illustrating the



Fig. 1. Tectonic zonation of the area studied upon the reflective horizon VI (acoustic basement) based on 3D seismic data.

structural relationships between the land and marine shelf.

**Hydrocarbon plays recognition.** Based on the interpretation of the latest 3D seismic data and relying on the industrial «standard» for the identification of oil and gas plays, seven promising hydrocarbon plays within the perimeter of Dolphin 01-10 special permits were identified, namely:

1) weathered and fractured rock formations of the Proterozoic-Early Paleozoic consolidation;

2) anticlinal and faulted anticline traps in the Paleozoic strata. Stratigraphic traps (erosional knobs) associated with angular unconformity in the Paleozoic sediments;

3) anticlinal and stratigraphic traps associated with an angular unconformity in the top of the Valanginian-Jurassic sequences;

4) anticlinal traps in Lower Cretaceous (Neocomian-Albian) pre-rift plus syn-rift sediments and stratigraphic traps (with erosional and facies compartmentalization); 5) anticlinal traps in the Upper Cretaceous-Middle Eocene carbonate platform complex: Reef bodies in the Upper Cretaceous (Campanian-Maastrichtian) sediments and stratigraphic traps associated with stratigraphic disconformities in Paleogene-Cretaceous sequence;

6) Upper Eocene-Oligocene-Lower Miocene (Maikopian) anticlines and lithological and stratigraphic traps;

7) Neogene 4-way closures and lithological traps.

The spatial localization of the above-mentioned plays is shown along the model cross section through the Dolphin special permits of the Inner Shelf in Fig. 2.

After analyzing hydrocarbon plays and their segments, it was managed with ranking and geologically derisking of 40 leads (anticline and stratigraphic traps) for the presence of hydrocarbon system elements, eight of which were mapped for the first time within the area based on the processing and



Fig. 2. The main prospective oil and gas plays along the model geological cross-section through the study area.



Fig. 3. Seismofacies prediction map and Composite Common Risk Segment map (or «traffic light map») (*a*), both for the Paleocene segment play (*b*).

interpretation of 3D seismic data. As for the classification by seismic waveform, the wave field along the seismic horizon was used to build seismic facies maps. Assuming that the shape of the reflected wave depends on the elastic properties of the acoustic boundary and on the shape of the seismic signal, it is possible to judge the change in these properties.

**Geological risk assessment.** For each play and its segments, the thermal maturity and seismic facies distribution maps were built applying attribute analysis (by signal shape and the special attribute set) for all reference seismic horizons (Ia, IIa, IIb, III, IIIm, IIIg, IV, V, VI) of the entire sedimentary cover. Derived from those sources, the probability maps of the reservoir and seal quality/presence were compiled, too. To create a spatial model of the thermal maturity of oil and gas host rocks within the work area, we used the dependencies for both the onshore area by the UkrS-GPI study (1992) and for the adjacent offshore area, according to Simon Petroleum Technology Ltd (1994).

Based on expert consensus, probability ratios were established for four components (probability of source/migration/fill—trap reservoir—seal).The composite common risk segment of each of the seven prospective oil-and-gas bearing complexes (plays) was determined. The case for the Paleocene segment of the Krylov sub-basin of the Upper Cretaceous-Middle Eocene play is illustrated in Fig. 3 (maps of its apparent seismofacies distribution and composite common risk segment).

**Conclusions.** The area of study, the conjugation zone between the slope of the Precambrian EEP, Paleozoic-Cimmerian Scythian platform, and younger Meso-Cenozoic Black Sea basin, is surprisingly complex in terms of tectonic structure. Thus, it is the most interesting area from the geological point of view despite the relatively moderate hydrocarbon resources. The extension of the North Dobrogea Foredeep into the Black Sea was confirmed, and elements of its petroleum systems were transferred to the adjacent off-

#### References

- Kitchka, A., Olshanetsky, M., Tyshchenko, A., Vyzhva, A., Zhadan, A., Makovets, O., Fenota, P., Melnyk, L., Vityk, M., & Tauvers, P. (2024).
  Confident progress in understanding geology & hydrocarbon potential of the NW Black Sea Inner Shelf, Ukraine, based on cutting-edge 3D seismic exploration program. *Abs. AAPG Europe Region Conference, May 28—29, Krakow*, P. 78.
- Tauvers, P., Tyshchenko, A., Kitchka, O., Melnyk, L., & Boekholt, M. (2022). Start of major 3D acquisition by Naftogaz in the Western Ukrainian Black Sea — implications for reju-

shore domain, where potential hydrocarbon traps were found in the eroded Paleozoic carbonate platform. The established and traced dependencies made it possible to assess the composite geological risk and prospects for commercial oil and gas potential of the Dolphin special permits in the Inner northwest shelf of the Black Sea and to proceed to assess their resource potential using deterministic and stochastic approaches.

Acknowledgments. The study was done under UkrNDIgaz Contract № 57.0000106. The authors are sincerely grateful to Naftogaz of Ukraine NJSC for permission to publish these results.

venation of offshore exploration for Ukraine. Abs. AAPG Exploration and Production in the Black Sea Region and Super-Basin Thinking GTW, September 6—7, Trabzon, P. 7.

Tegnander, J.F., Kittell, L., Helgebostad, K.S., Tyshchenko, A., Vyzhva, A., Melnyk, L., & Oukili, J. (2024). Efficient 3D Acquisition and Imaging in Ultra-Shallow Water for Frontier Exploration in the Black Sea, Ukraine. Abs. Fourth EAGE Marine Acquisition Workshop, September 2024, Oslo (pp. 1—3). Retrieved from https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202436012.

## Новітня 3D сейсміка розкриває позитивні перспективи на нафту і газ на морському продовженні Переддобруджинського прогину, Україна

О.А. Кичка<sup>1</sup>, М.В. Ольшанецький<sup>2</sup>, А.П. Тищенко<sup>2,3</sup>, А.С. Вижва<sup>1</sup>, А.М. Жадан<sup>2</sup>, О.В. Маковець<sup>1</sup>, П.О. Фенота<sup>2</sup>, А.С. Хмелевський<sup>1</sup>, Л.П. Мельник<sup>2,3</sup>, 2025

<sup>1</sup>Київське відділення Українського науково-дослідного інституту природних газів, Київ, Україна <sup>2</sup>АТ «Укргазвидобування» Київ, Україна <sup>3</sup>НАК «Нафтогаз України», Київ, Україна

На основі обробки даних новітньої 3D сейсморозвідки та аналізу геологогеофізичної інформації виділено й охарактеризовано понад сорок перспективних структур на спецдозволах Дельфін 01-10 НАК «Нафтогаз України» у межах внутрішньої зони північно-західного шельфу Чорного моря. Уточнено та деталізовано геологічну модель району робіт, оцінено основні складові геологічного ризику за перспективними нафтогазоносними комплексами для формування портфеля нафтогазопошукових об'єктів, їх ранжування та прийняття управлінських рішень.

**Ключові слова:** Чорне море, спецдозволи на розвідку і видобування, 3D сейсморозвідка, геологічна інтерпретація, перспективні структури, нафтогазопошукові роботи на основі оцінки нафтогазоперспективних комплексів.

УДК 550.836:553.98(447.5)

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322468

# Geothermobaric criteria for oil-and-gas bearing in the Dnieper-Donets Graben

I.M. Kurovets<sup>1</sup>, I.I. Hrytsyk<sup>1</sup>, O.A. Prykhodko<sup>1</sup>, Z.I. Kucher<sup>1</sup>, S.S. Kurovets<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Institute of Geology and Geochemistry of Fossil Fuels of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine <sup>2</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

To evaluate exploration areas and forecast individual productive horizons of exploration for oil and gas, it is necessary to establish patterns in the location of the already explored hydrocarbon deposits. The analysis has to consider the structural and tectonic build, lithological and stratigraphic features, and hydrogeological and geothermobaric conditions of the oil and gas region. The relationship of geothermobaric parameters with the phase state of hydrocarbons in a vertical section should serve as an important factor for solving the problem. Within the Eastern oil and gas region of Ukraine, gas, oil, and gas condensate deposits are zoned. Vertical zoning of the location of hydrocarbon deposits of oil and gas horizons follows the geothermobaric criteria for the Monastyryshchensko-Sofiyivskyi and Talalaivsko-Rybalskyi oil-and-gas bearing, Hlynsko-Solokhivskyi gas-and-oil bearing and Mashivsko-Shebelinskyi gas-bearing, Rudenkivsko-Proletarskyi oil-and-gas bearing deposits of the Eastern oil and gas region of Ukraine.

Key words: geothermobaric criteria, thermobaric parameters, oil, gas, gas condensate deposits.

**Introduction.** For the evaluation of exploration areas of the Eastern oil and gas region of Ukraine, as well as separate forecasting of individual productive horizons of exploration areas for oil and gas, it is necessary to establish patterns in the location of already explored hydrocarbon deposits, taking into account the structural and tectonic structure, lithological and stratigraphic features, and hydrogeological and geothermobaric conditions.

The solution of the problem. The pressure and temperature regime of the Dnieper-Donets Graben is determined by the magnitude of the deep heat flow coming from the subsoil, the structural and tectonic features of the region, the lithology of the sedimentary complex, the development of a powerful

Citation: Kurovets, I.M., Hrytsyk, I.I., Prykhodko, O.A., Kucher, Z.I., & Kurovets, S.S. (2025). Geothermobaric criteria for oil-and-gas bearing in the Dnieper-Donets Graben. *Geofizychnyi Zhurnal*, *47*(2), 98—102. https://doi. org/10.24028/gj.v47i2.322468.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

complex of chemogenic and volcanic rocks, hydrogeological and other factors, and the presence of hydrocarbon deposits.

The research established the relationship between the geothermal activity of the subsoil and the placement of hydrocarbon deposits [Hrytsyk et al., 1999; Prykhodko et al., 2005; Kurovets et al., 2019]. Within the Eastern oil and gas region of Ukraine, spatial zoning in the location of gas, oil and gas condensate deposits has been established. The northwestern part, the least submerged, contains mainly oil; the southeastern, the most submerged, is mainly gas-bearing; the central oil-and-gas part has a complex ratio of oil-and-gas bearing floors in the section. Similar patterns are observed in other oil-and-gas bearing provinces of the world.

Main results of the study. Analyzing the geothermobaric parameters of the region, we developed vertical zoning and established patterns in the locations of hydrocarbon deposits of the Monastyryshchensko-Sofiyivskyiand Talalayivsko-Rybalskyi oil-and-gas bearing regions, the Hlynsko-Solokhivskyi gas-and-oil bearing region, the Mashivskogo-Shebelinskyi gas-bearing region, the Rudenkivsko-Proletarskyi oil-and-gas bearing region [Prykhodko et al., 2019a, b].

*Monastyryshchensko-Sofiyivskyi oilbearing region.* The explored oil deposits in the vertical section are located in the depth range from 1500.0 to 4921.5 m. The reservoir temperatures vary from 409.0 to 323.0 K, reservoir pressures — from 14.20 to 52.48 MPa, thermobaric coefficient — from 7.50 to 22.75, hydrostatic coefficient — from 1.02 to 1.14.

*Talalaivsko-Rybalskyi oil-and-gas bearing region.* Based on the values of reservoir temperatures, reservoir pressures, thermobaric and hydrostatic coefficients in the vertical section of the studied region, such zones of the phase state of hydrocarbons were identified:

upper (oil-and-gas condensate deposits): reservoir temperatures vary from 312.0 to 366.0 K, reservoir pressures — from 13.6 to 31.0 MPa, thermobaric coefficient — from 11.42 to 22.94, zone depth — from 1312.0 to 2996.0 m;

middle (oil, gas condensate, gas and oiland-gas deposits) — reservoir temperatures vary from 345.0 to 417.0 K, reservoir pressures
from 31.1 to 53.4 MPa, thermobaric coefficient — from 7.47 to 12.07, depth of the zone
from 2998.0 to 4690.0 m;

– lower (gas condensate deposits) — for this zone, the typical values of reservoir temperatures are more than404.0 K; reservoir pressures more than 57.47 MPa, thermobaric coefficient — from 8.02 to 4.97 at depths greater than 4709.0 m.

According to the hydrostatic coefficient, hydrocarbon deposits in the section of the studied area are located as follows: oil within the range from 1.00 to 1.20 at depths of productive horizons from 1472.0 to 5088.0 m; gas condensate — from 1.0 to 1.6 at depths greater than 1312.0 m; gas — 1.05—1.14 at depths from 3271.0 to 4261.0; oil and gas — 1.05—1.06 at depths from 2998.0 to 3152.0 m.

The explored oil deposits (48.1 %) are characterized by the following geothermobaric parameters: reservoir temperatures vary from 313.0 to 397.0 K, reservoir pressures — from 14.20 to 56.15 MPa, thermobaric coefficient — from 6.86 to 22.39, hydrostatic coefficient — from 1.0 to 1.20. The depths of the explored oil deposits vary from 1472.0 to 5088.0 m. Gas deposits (3.4 %) were discovered in the depth range from 3271.0 to 4261.0 m and are characterized by reservoir temperatures from 35.38 to 47.65 MPa, thermobaric coefficient values— from 8.0 to 10.15, hydrostatic coefficient — from 1.05 to 1.14.

For gas condensate deposits (48.5 %) the following geothermobaric parameters have been established: range of reservoir temperatures — from 314.0 to 418.0 K, reservoir pressures from 13.80 to 83.90 MPa, thermobaric coefficient — from 5.01 to 22.94, hydrostatic coefficient — from 1.00 to 1.23. It is worth noting that gas condensate deposits  $C_{1v2}$  Karaikozivka and  $C_{1v2}$ Berezivka gas condensate fields at depths from 4800.0 to 5412.0 m have relatively high values of hydrostatic coefficient — from 1.43 to 1.60 at investigated depths from 1312.0 to 5690.7 m.

According to the thermobaric parameters, the following zones are distinguished in the vertical section of the sedimentary cover of

#### the *Hlynsko-Solokhivsky gas-and-oil bearing region*:

 upper (oil and gas deposits): reservoir temperatures vary from 291.0 to 345.0 K, reservoir pressures — from 8.3 to 23.8 MPa; thermobaric coefficient — from 13.96 to 35.06; zone depth — from 346.0 to 2322.0 m;

middle (oil, gas condensate, gas, and oiland-gas deposits) — reservoir temperatures vary from 336.0 to 400.0 K, reservoir pressures
from 23.8 to 50.7 MPa, thermobaric coefficient — from 6.17 to 15.20, depth of the zone
from 2320.0 to 4720.0 m;

lower (gas condensate and gas deposits) — for this zone, the typical values of reservoir temperatures are >388.0 K, reservoir pressures >50.7 MPa, thermobaric coefficient
 from 7.02 to 3.67 at depths greater than 4720.0 m.

Hydrocarbon deposits in this area are characterized by the following parameters:

Oil deposits (10.3 %) are characterized by reservoir temperatures ranging from 317.0 to 399.0 K, reservoir pressures ranging from 10.40 to 51.90 MPa, thermobaric coefficient ranging from 7.61 to 24.86, hydrostatic coefficient ranging from 1.0 to 1.18. Theyare located in the depth range from 1256.0 to 4896.0 m.

Gas deposits (7.6 %) are characterized by the following geothermobaric parameters in a vertical section: reservoir temperatures ranging from 291.0 to 417.0 K, reservoir pressures ranging from 8.30 to 64.50 MPa, thermobaric coefficient ranging from 6.47 to 35.06, hydrostatic coefficient — from 1.0 to 1.27 within the depth range from 840.0 to 5593.0 m.

The explored gas condensate deposits (80.5 %) are located at depths from 1500 to 6222.0 m at reservoir temperatures from 336.0 to 419.0 K, reservoir pressures from 23.50 to 113.50 MPa, thermobaric coefficient values from 3.67 to 14.68, and hydrostatic coefficient values from 1.0 to 1.24 (the exception is the high values of the hydrostatic coefficient of gas condensate deposits in the C<sub>1t</sub> deposits on the Rudivska area, C<sub>1t</sub> Vasylivka oil and gas condensate, C<sub>1v2</sub> Komyshnyansky, C<sub>1v2</sub> Zakhidno-Koshoviyskiy, Gogolivka gas condensate fields, where at depths from 4713.0 to 5795.0 m they reach from 1.35 to 1.65). In

this oil-and-gas bearing region of the Eastern oil-and-gas bearing region of Ukraine, the deepest gas condensate deposit  $C_{1v2}$  has been discovered at the Perevozovskyi gas condensate field (6300 m).

Oil and gas deposits (1.6 %) are located in the depth range from 2338.0 to 3642.0 m and are characterized by the following geothermobaric parameters: reservoir temperatures vary from 339.0 to 368.0 K, reservoir pressures — from 23.50 to 40.90 MPa, thermobaric coefficient — from 9.00 to 14.68, and hydrostatic coefficient — from 1.02 to 1.28. The large capacities of potentially oil-and-gas bearing deposits of the Lower Carboniferous, which lie at depths of up to 7000 m, open up significant prospects for the search for new hydrocarbon deposits.

The Mashiv-Shebelinskyi gas-bearing region is located in the submerged part of the depression, where the largest gas condensate deposits have been explored and are being developed. The degree of exploration is 88.2 %. The explored gas condensate deposits are discovered in the depth range from 1200.0 to 4290.0 m and are characterized by the following geothermobaric parameters: reservoir temperatures — from 318.0 to 365.0 K, reservoir pressures — from 23.14 to 47.15 MPa, thermobaric coefficient — from 6.73 to 11.17, hydrostatic coefficient — from 1.12 to 1.35. The exceptions are the C<sub>3ar</sub> and C<sub>3ar</sub>-P<sub>kt</sub> deposits of the Melekhivskyi gas condensate field, where at depths from 2780.0 to 3120.0 m it varies from 1.40 to 1.49.

In the vertical section of the **Rudenkivsko**-**Proletarskyi oil-and-gas bearing region**, two zones of the phase state of hydrocarbons are distinguished by thermobaric parameters:

upper (oil, gas condensate and gas deposits), characterized by the following parameters: reservoir temperatures vary from 295.0 to 382.0 K, reservoir pressures — from 4.5 to 40.4 MPa, thermobaric coefficient — from 9.2 to 43.5; zone depths — from 295.0 to 3700.0 m;

lower (gas condensate and gas deposits) — for this zone, the following values are typical: reservoir temperatures morethan 380.0 K, reservoir pressures more than 40.4 MPa, and thermobaric coefficient —

less than 9.2 at depths greater than 3700.0 m.

The values of hydrostatic coefficients for hydrocarbon deposits of the upper zone are from 1.0 to 1.2; lower — less than 1.1.

Oil deposits have been explored at depths from 500.0 to 3810.0 m and are characterized by geothermobaric parameters: reservoir temperatures — from 297.0 to 380.0 K, reservoir pressures — from 4.50 to 41.13 MPa, thermobaric coefficient — from 9.31 to 33.43, hydrostatic coefficient — from 1.01 to 1.12. The exception is the  $C_{1s2}$  oil deposits of the Zachepylivka oil and gas condensate field, where at depths of 750.0 m the hydrostatic coefficient is 1.23.

The area of gas deposits (19.0 %) in the vertical section is traced at depths from 709.0 to 4875.0 m and is characterized by the following thermobaric characteristics: reservoir temperatures vary from 295.0 to 403.0 K, reservoir pressures — from 7.13 to 71.83 MPa, thermobaric coefficient — from 5.61 to 41.37, hydrostatic coefficient — from 1.01 to 1.22. The exceptions are the deposits of C<sub>1s</sub> Reshetnekivske gas and oil at a depth of 2360.0 m and C<sub>1v1</sub> Gorobtsivske gas condensate at a depth of 4875.0 m of the fields, where the coefficient values are 1.29 and 1.50, respectively.

Gas condensate deposits have been ex-

#### References

- Hrytsyk, I.I., Kolodiy, V.V., Osadchy, V.G., Prykhodko, O.A., & Putsylo, V.I. (1999). Geothermal regime of the Dnieper-Donetsk depression at a depth of more than 5 km. *Geology of mineral resources: Coll. of scientific works of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1*, 36—39 (in Ukrainian).
- Kurovets, I., Prykhodko, O., Hrytsyk, I., & Melnychuk, S. (2019). Geothermal conditions of the Eastern oil and gas region of Ukraine. *Geology and geochemistry of fossil fuels*, (2), 47—54 (in Ukrainian).
- Prykhodko, O., Hrytsyk, I., Kurovets, I., & Melnychuk, S. (2019a). Vertical thermobaric zonation of hydrocarbon deposits of the Eastern oil and gas region of Ukraine. *Geology and geochemistry of fossil fuels*, (3), 60—75 (in Ukrainian).

plored at depths from 709.0 to 5208.0 m and are characterized by the following geothermobaric parameters: reservoir temperatures vary from 295.0 to 410.0 K; reservoir pressures — from 6.83 to 94.50 MPa; thermobaric coefficient — from 4.60 to 43.48; hydrostatic coefficient — from 1.00 to 1.17. (The exceptions are the  $C_{1v1}$  and  $C_{1t}$  deposits of the Rudenkiv gas condensate field, where at depths from 2510.0 to 5120.0 m its values vary from 1.22 to 1.73).

Conclusions. Based on the results of the analysis of the geothermal material, geothermal and geothermobaric parameters were determined, which characterize the temperature state of rocks and fluids of various tectonic zones of the Eastern oil and gas region of Ukraine. Lateral and vertical zonation of hydrocarbon deposits was developed. Taking into account the peculiarities of the tectonic structure of the Dnieper-Donets Graben, as the sedimentary complex sinks, oil deposits are gradually replaced by oil and gas deposits, and then by gas deposits from the northwest to the southeast. The determined parameters characterize the geothermal baric activity of the region's subsoil. It should be noted that the temperature and pressure of the studied region are combined in various combinations, which causes the differentiation of hydrocarbon deposits according to their phase state.

- Prykhodko, O.A., Hrytsyk, I.I., Kurovets, I.M., Melnychuk, S.P., & Petelko, L.P. (2019b). Location of hydrocarbon deposits in the Talalaivsko-Rybalsky oil and gas region according to thermobaric parameters. Abstracts of the scientific conference «Achievements and prospects for the development of geological science in Ukraine», dedicated to the 50th anniversary of the founding of the M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation, May 14—15 (Vol. 2, pp. 80—82) (in Ukrainian).
- Prykhodko, O.A., Osadchy, V.G., & Kurovets, I.M. (2005). Thermobaric conditions of productive horizons of hydrocarbon deposits in the northwestern part of the Dnieper-Donetsk depression. *Geology and geochemistry of fossil fuels*, (3-4), 5—12 (in Ukrainian).

# Геотермобаричні критерії нафтогазоносності Дніпровсько-Донецької западини

*I.М. Куровець<sup>1</sup>, I.I. Грицик<sup>1</sup>, О.А. Приходько<sup>1</sup>, 3.I. Кучер<sup>1</sup>, С.С. Куровець<sup>2</sup>, 2025* 

<sup>1</sup>Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна <sup>2</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

Для прогнозної оцінки перспективних пошуково-розвідувальних територій, а також роздільного прогнозування окремих продуктивних горизонтів пошуково-розвідувальних площ на нафту та газ необхідно встановлення закономірностей в розміщенні вже розвіданих покладів вуглеводнів з урахуванням структурно-тектонічної будови, літологостратиграфічних особливостей, гідрогеологічних та геотермобаричних умов нафтогазоносного регіону. Взаємозв'язок геотермобаричних параметрів з фазовим станом вуглеводнів у вертикальному розрізі має слугувати важливим фактором для вирішення поставленої задачі. У межах Східного нафтогазоносного регіону України встановлена просторова зональність в розміщенні газових, нафтових і газоконденсатних покладів. Розроблена вертикальна зональність розміщення покладів вуглеводнів нафтогазоносних горизонтів за геотермобаричними критеріями Монастирищенсько-Софіївського і Талалаївсько-Рибальського нафтогазоносних, Глинсько-Солохівського газонафтоносного і Машівсько-Шебелинського газоносних, Руденківсько-Пролетарського нафтогазоносного району Східного нафтогазоносного регіону України.

**Ключові слова**: геотермобаричні критерії, термобаричні параметри, нафтові, газові, газоконденсатні поклади.

УДК 550.341

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322469

# An attempt to preserve archival analog seismic records from geotraverses in Ukraine

#### D.V. Lysynchuk, K.V. Kolomiyets, V.M. Stepanenko, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Between 1960 and 1990, extensive deep seismic studies were conducted in Ukraine, significantly enhancing the understanding of the Earth's crust and mantle, particularly within the Ukrainian Shield. This paper introduces a methodology for digitizing analog seismic records preserved on photographic paper, representing a crucial step in safeguarding historical data. Test digitization of a section of the Geotraverse IV demonstrated the feasibility of creating vectorized images, enabling the modern interpretation of seismic

Citation: Lysynchuk, D., Kolomiyets, K., & Stepanenko, V. (2025). An attempt to preserve archival analog seismic records from geotraverses in Ukraine. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 102—109. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322469.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

data. The results confirmed the potential to extract new insights, particularly regarding shear waves, and process them further in the SEG-Y format. Comprehensive scanning and systematic organization of these archives could support the reinterpretation and long-term preservation of valuable scientific data.

Key words: Ukraine, geotraverses, deep seismic studies, seismic records.

**Deep Seismic Research in Ukraine (1960**— **1990).** Deep seismic studies (DSS) conducted in Ukraine during 1960—1990 were a pivotal phase in the development of geophysics and geology, uncovering the crust and mantle structure in the region. These studies employed state-of-the-art methods at the time, utilizing seismic waves traveling through different Earth layers [Sollogub, 1982].

One of the key achievements was implementing seismic profiling, enabling the construction of detailed geological models of various Ukrainian regions. Special attention was given to the Ukrainian Shield, one of Europe's oldest geological formations. These studies revealed its deep structure, including crustal thickness, deep faults, and their role in forming mineral deposits [Sollogub et al., 1980; Chekunov, 1988].

In the 1970s—1980s, multichannel seismic methods were introduced, significantly improving data quality. Signal processing techniques such as band pass filtering and automated gain control enhanced the accuracy, allowing researchers to delineate deep layers and analyze tectonic dynamics [Sollogub, Chekunov, 1983; Chekunov, 1987].

Modern Developments and Challenges. The modern phase of deep seismic research in Ukraine began in 1997 with the EURO-



Fig. 1. Location of the Geotraverse IV profile (red lines) and modern refraction seismic profiles (yellow stars — shot points and black dots — recording stations). The big blue star represents shot point 98, the studied seismograms were recorded to the right of shot point 98.

BRIDGE'97 project, employing wide-angle reflection and refraction (WARR) methods using digital recording equipment [Thybo et al., 2003]. Over the next two decades, numerous WARR seismic studies explored the crust and upper mantle across tectonic regions like the Carpathians, Ukrainian Shield, Black Sea Basin, and Dnieper-Donets Basin [Starostenko et al., 2013a, b, 2015, 2016, 2018, 2020, 2024; Janik et al., 2022].

During the same period at tempts were made to reinterpret the available seismic materials, which hallowed obtaining velocity models of the section structure along some geotraverses [Kozlenko, et al., 2009, 2013; Baranova, Yegorova, 2020].

Unfortunately, due to Ukraine's current economic, environmental, and military challenges, continuing such studies using chemical explosions as seismic sources seems impractical. However, the archives of the Institute of Geophysics hold extensive analog seismic records on photographic paper collected during earlier studies. Most of these records are well-documented, with information on project affiliation, geophone placement along profiles, and time markers for seismic wave arrivals.

**Initial Digitization Attempt.** An initial attempt was made to digitize these records, focusing on a portion of Geotraverse IV (Fig. 1). The total length of Geotraverse IV exceeds 1,000 km, with fieldwork conducted over three years (1969—1972). The research employed the DSS methodology with maximum shot-receiver offsets of approximately 200 km and a geophone spacing of 100 m. Fifteen 48-channel analog records from 1969 were selected for digitization. In the processed section, geophones were spaced at 100 m, covering offsets from 25 to 100 km.

This effort highlights the importance of preserving seismic data, enabling reinterpretation using modern computational tools and providing insights into historical seismic research outcomes.

**Digitization Process.** To obtain digital raster images, the authors constructed a specialized tripod for the camera, enabling uniform scaling for all 15 seismograms. The next step involved correcting optical distortions in the photographs, cleaning the background from mechanical damage to the paper montages, and enhancing the contrast and brightness of the seismic channel lines. This preparation facilitated tracing seismic records and their conversion from raster to vector format.

For each of the 15 seismograms, vector images were prepared while preserving temporal and spatial scales. This enabled the compilation of a common shot-point seismogram for all 15 48-channel records, as shown in Fig. 2. This vector image can be freely scaled zoomed on a monitor screen, with advantages visible even on a journal page.



Fig. 2. Common shot-point gather seismogram for all 15 48-channel records.

Interpretation and Findings. The time section in this format allows the identification and correlation of the axes of seismic wave coherence of different types and apparent velocities. It clearly highlights the first arrivals, reflected, and refracted waves in various sections of the Earth's crust, including the Moho reflection. Most corresponding traveltime curves were identified and interpreted during the original research period. However, the computational tools for determining seismic velocities and the depth and geometry of reflecting horizons were significantly less advanced than modern modeling tools for seismic wave propagation in the Earth's crust and upper mantle.


Fig. 3. 48-channel seismogram 6/15: a — scanned raster copy of the recording on photo paper; b — vectorized seismic traces; c — digitized seismic traces in SEG-Y format.

A second major advantage of the seismic section (see Fig. 2) is that it provides interpreters with a comprehensive view of the seismic profile across the entire study area, as opposed to individual 48-channel seismograms, which were 2—4 m long and inconvenient to manipulate due to their 45 cm width.

The third and most intriguing discovery in this seismic section (see Fig. 2) is the detection of transverse waves in the records. These appear as repeated high-energy wavefield arrivals against the background of noise at large times. These arrivals fit a travel-time curve observable on nearly all 48-channel sections. At close distances of 25-30 km, this wave is recorded at 11 seconds, and further along the profile, up to 90 km, it correlates across the entire section with increasing times up to 13 seconds. To our knowledge, identifying and interpreting shear waves in analog seismic observations was not conducted on Geotraverse IV or other projects in Ukraine. This opens significant opportunities for extracting unique new information from seismic archives.

It logically follows that, first, a comprehensive scanning of available analog seismic records stored on photographic paper as 48-channel station records should be undertaken. Second, the raster images should be organized by geotraverses, offsets, observation parameters, and visualizations, creating a corresponding database. Third, raster images should be prepared for vectorization (tracing) of seismic records. Fourth, common shot-point seismograms for all analog records should be created in vector format. In this form, the data will be ready for constructing traveltime systems of useful seismic waves and their interpretation using modern software.

**SEG-Y File Creation.** At this stage, the preservation of analog seismic records can be considered complete. In the second stage, we propose digitizing the traces and converting them into the standard SEG-Y seismic format, as was done by the authors for marine seismic data from Profile 25 [Malovitskiy, Neprochnov, 1972] in the Black Sea for reinterpretation in the DOBRE5 project [Starostenko et al., 2015].

The task of digitizing analog seismograms is not new. Software has been developed for preserving and digitizing historical earthquake data [Ishii et al., 2014], detecting and recognizing seismic waves in raster images [Bogiatzis, Ishii, 2016], and digitizing analog seismograms using combined automatic and manual methods for recognizing seismic signals [Wang et al., 2016]. The creation of digital archives of analog seismograms and the standardization of data formats are discussed in Lee & Benson [2008].

However, in our case, the problem with using these approaches lies in their design for processing a small number of individual traces. Existing commercial software (IM-AGETOSEG-Y), designed for large number of seismic traces, is intended for the CDP method.

We attempted to recognize seismic traces on raster images containing 48 traces with significant overlap. An example of such a seismogram is shown in Fig. 3, *a*, *b* shows the result of vectorizing the raster image of the first seismogram, which was included in the seismogram in Fig. 2 at the corresponding distance and time intervals, albeit at a significantly reduced scale.

For further digitization, the vector image was converted back to the black-and-white raster format, then to a two-dimensional array of zeros and ones, where zero represented white and one represented black. This transformation allowed for cross-correlation of this array with a calculated elementary seismic signal, determining positive and negative maxima, which could be considered signal arrival times, with the correlation coefficient representing the amplitude of the elementary signal. Thus, we determined the signal's time and amplitude.

The next step involved associating arrival points with traces, i.e., determining offsets. It should be noted that offset may affect amplitude since overlapping traces can cause the signal to belong to a neighboring trace, resulting in a significantly higher amplitude. We used an approach that distributes arrivals among traces based on the minimum distance between the nearest trace and the signal arrival point. This approach permits a significant number of errors in amplitude determination but ensures the alignment of maxima on raster and digital seismograms. The result of digitization and SEG-Y file creation is shown in Fig. 3, *c*.



Fig. 4.The general time section containing all 15 digitized and converted to SEG-Yformat seismograms.

The general time section containing all 15 seismograms is presented in Fig. 4. This is a complete SEG-Y that enables all standard seismic data processing procedures used in interpreting deep seismic studies, including velocity reduction, filtering, correlation, and constructing digital travel-time systems for identified waves.

Notably, first arrivals and travel-time curves for reflected waves in the upper/middle crust and even reflections from the crustmantle boundary can be identified in this section. This is a definite positive outcome. However, shear waves present in the initial section in Fig. 2 are largely absent in the digi-

#### References

- Baranova, E.P., & Yegorova, T.P. (2020). The crustal structure of the transition from the East Black Sea Basin to the Shatsky Ridge from the reinterpretation of deep seismic sounding data on profiles 14-15-16. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(3), 59—77 (in Russian). https:// doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020. 204702.
- Bogiatzis, P., & Ishii, M. (2016). DigitSeis: A New Digitization Software for Analog Seismograms. Seismological Research Letters, 87(3), 726– 736. https://doi.org/10.1785/0220150246.
- Chekunov, A.V. (Ed.). (1987). Lithosphere of Cen-

able overlap between adjacent traces, complicating signal arrival identification or causing confusion in assigning arrivals to specific traces. Another drawback of the digital SEG-Y records is the presence of «white spots»

Y records is the presence of «white spots» throughout the section, resulting from difficulties in determining signal arrivals and offsets in areas of significant amplitude growth.

tal SEG-Y records. This is due to significant signal amplitude increases, causing consider-

**Conclusions.** The archives of the Institute of Geophysics contain analog seismic records on large paper media obtained during 1960—1990 for Geotraverses I—VIII and other regional projects. The total length of just Geotraverse IV, part of which is discussed in this study, exceeds 1000 km.

To preserve the archive of analog seismic data, comprehensive scanning of available photomontages with careful identification of project details, excitation point numbers, distances, and time marks is required.

The successful test digitization of a section of Geotraverse IV presented in this study demonstrates that the proposed processing not only preserves the valuable results of previous seismic studies but also enables obtaining entirely new data, such as shear wave investigation.

In the future, digitized old analog seismic records can be reinterpreted using modern computer processing and modeling tools.

tral and Eastern Europe. Geotraverses I, II, III. Kiev: NaukovaDumka, 212 p. (in Russian).

- Chekunov, A.V. (Ed.). (1988). Lithosphere of Central and Eastern Europe. Geotraverses IV, VI, VIII. Kiev: Naukova Dumka, 172 p. (in Russian).
- Ishii, M., Ishii, H., Bernier, B., & Bulat, E. (2014). Efforts to Recover and Digitize Analog Seismograms from Harvard-Adam Dziewoński Observatory. Seismological Research Letters, 86(1), 255—261. https://doi.org/10.1785/ 0220140165.
- Janik, T., Starostenko, V., Aleksandrowski, P.,

- Yegorova, T., Czuba, W., Środa, P., Murovskaya, A., Zayats, K., Mechie, J., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Wójcik, D., Omelchenko, V., Legostaieva, O., Głuszyński, A., Tolkunov, A., Amashukeli, T., Gryn', D., & Chulkov, S. (2022). Lithospheric Structure of the East European Craton at the Transition from Sarmatia to Fennoscandia Interpreted from the TTZ-South Seismic Profile (SE Poland to Ukraine). *Minerals, 12*(2), 112. https://doi.org/10.3390/ min12020112.
- Kozlenko, M.V., Kozlenko, Yu.V., & Lysynchuk, D.V. (2009). Deep structure of the earth's crust of the western part of the Black Sea shelf based on the results of the complex reinterpretation of geophysical data on the GSZ profile 25. *Geofizicheskiy Zhurnal*, *31*(6), 77—91 (in Russian).
- Kozlenko, M.V., Kozlenko, Yu.V., & Lysynchuk, D.V. (2013). The structure of the earth's crust of the north-western shelf of the Black Sea along the profile of GSZ No. 26. *Geofizicheskiy Zhurnal*, *35*(1), 158—168. https:// doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i1.2013. 116345 (in Russian).
- Lee, W.H.K., & Benson, R.B. (2008). Makingnondigitally-recorded seismograms accessible on line for studying earthquakes. In J. Fréchet, M. Meghraoui, M. Stucchi (Eds.), *Historical Seismology: Interdisciplinary Studies of Past and Recent Earthquakes* (pp. 403—424). https:// doi.org/10.1007/978-1-4020-8222-1\_20.
- Malovitskiy, Ya.P., & Neprochnov, Yu.P. (Eds.). (1972). Structure of the Western Part of the Black Sea Basin. Moscow: Nauka, 243 p. (in Russian).
- Sollogub, V.B. (1982). The structure of the lithosphere of the Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 4(4), 3—25 (in Russian).
- Sollogub, V.B., & Chekunov, A.V. (1983). The Lithosphere of the Ukraine. *First Break*, 1(6). https://doi.org/10.3997/1365-2397.1983012.
- Sollogub, V.B., Chekunov, A.V., Shchukin, Yu.K., Guterkh, A., Kondorskaya, N.V., Sidorov, V.P., Kharitonov, O.M., Khomenko, V.I., Grad, M., Matezhok, R., Paichel, Ya., & Perkhuts, E. (1980). The project and the first results of international geophysical studies of the deep structure of the lithosphere along geotravers in South-Eastern Europe. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 2(5), 3—13 (in Russian).

- Starostenko, V., Janik, T., Kolomiyets, K., Czuba, W., Środa, P., Grad, M., Kovács, I., Stephenson, R., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I.M., Omelchenko, V., Gintov, O., Kutas, R., Gryn, D., Guterch, A., Hegedűs, E., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2013a). Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*, 608, 1049–1072. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.008.
- Starostenko, V., Janik, T., Lysynchuk, D., Środa, P., Czuba, W., Kolomiyets, K., Aleksandrowski, P., Gintov, O., Omelchenko, V., Komminaho, K., Guterch, A., Tiira, T., Gryn, D., Legostaeva, O., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2013b). Mesozoic(?) lithosphere-scale buckling of the East European Craton in southern Ukraine: DOBRE-4 deep seismic profile. *Geophysical Journal International*, 195(2), 740—766. https://doi.org/10.1093/gji/ggt292.
- Starostenko, V., Janik, T., Mocanu, V., Stephenson, R., Yegorova, T., Amashukeli, T., Czuba, W., Środa, P., Murovskaya, A., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Okoń, J., Dragut, A., Omelchenko, V., Legostaieva, O., Gryn, D., Mechie, J., & Tolkunov, A. (2020). Rom-UkrSeis: Seismic model of the crust and upper mantle across the Eastern Carpathians From the Apuseni Mountains to the Ukrainian Shield. *Tectonophysics*, 794, 228620. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228620.
- Starostenko, V., Janik, T., Murovskaya, A., Czuba, W., Środa, P., Yegorova, T., Aleksandrowski, P., Verpakhovska, O., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Amashukeli, T., Burakhovych, T., Wójcik, D., Omelchenko, V., Legostaeva, O., Gryn, D., & Chulkov, S. (2024). Seismic lithospheric model across Ukrainian Shield from the Carpathians to the Dnieper-Donets Basin and its tectonic interpretation. *Tectonophysics*, 892, 230540. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230540.
- Starostenko, V., Janik, T., Stephenson, R., Gryn, D., Rusakov, O., Czuba, W., Środa, P., Grad, M., Guterch, A., Flüh, E., Thybo, H., Artemieva, I., Tolkunov, A., Sydorenko, G., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Kolomiyets, K., Legostaeva, O., Dannowski, A., & Shulgin, A. (2016). DOBRE-2 WARR profile: the Earth's crust across Crimea between the pre-Azov

Massif and the northeastern Black Sea Basin. In M. Sosson, R.A. Stephenson, S.A. Adamia (Eds), *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus* (pp. 199—220). Geol. Soc., London, Spec. Publ. 428. https://doi. org/10.1144/SP428.11.

- Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Czuba, W., Środa, P., Lysynchuk, D., Aizberg, R., Garetsky, R., Karataev, G., Gribik, Y., Farfuliak, L., Kolomiyets, K., Omelchenko, V., Komminaho, K., Tiira, T., Gryn, D., Guterch, A., Legostaeva, O., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2018). Lithospheric structure along wide-angle seismic profile GEORIFT 2013 in Pripyat-Dnieper-Donets Basin (Belarus and Ukraine). *Geophysical Journal International*, 212(3), 1932—1962. https://doi.org/10.1093/gji/ggx509.
- Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Farfuliak, L., Czuba, W., Środa, P., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Lego-

staeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 201(1), 406–428. https://doi. org/10.1093/gji/ggv018.

- Thybo, H., Janik, T., Omelchenko, V.D., Grad, M., Garetsky, R.G., Belinsky, A.A., Karatayev, G.I., Zlotski, G., Knudsen, M.E., Sand, R., Yliniemi, J., Tiira, T., Luosto, U., Komminaho, K., Giese, R., Guterch, A., Lund, C.-E., Kharitonov, O.M., Ilchenko, T., Lysynchuk, D.V., Skobelev, V.M., & Doody, J.J. (2003). Upper lithospheric seismic velocity structure across the Pripyat Trough and the Ukrainian Shield along the EUROBRIDGE'97 profile. *Tectonophysics*, 371, 41—79. https://doi.org/10.1016/ S0040-1951(03)00200-2.
- Wang, M., Jiang, Q., Liu, Q., & Huang, M. (2016). A new program on digitizing analog seismograms. *Computers & Geosciences*, 93, 70–76. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.05.004.

## Спроба збереження архівних аналогових сейсмічних записів з геотраверсів в Україні

### Д.В. Лисинчук, К.В. Коломієць, В.М. Степаненко, 2025

#### Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

У період 1960—1990 рр. в Україні було проведено масштабні глибинні сейсмічні дослідження, які значно розширили знання про будову земної кори та мантії, зокрема в межах Українського щита. Стаття присвячена розробці методики оцифрування аналогових сейсмограм, що зберігаються на фотопапері, для їх подальшого аналізу сучасними методами. Пілотний проєкт на ділянці геотреверсу IV підтвердив можливість створення векторизованих зображень, що відкриває нові перспективи для дослідження навіть за поперечними хвилями. Також продемонстровано потенціал перетворення цих даних у формат SEG-Y, що сприяє їх довгостроковому збереженню та повторному аналізу.

Результати підтверджують необхідність систематизації архівних матеріалів, їх сканування та переведення у цифровий формат для подальшого моделювання. Це дасть змогу отримати нову корисну інформацію з архівних даних і застосувати сучасні комп'ютерні методи для їх обробки.

**Ключові слова:** Україна, геотраверси, глибинні сейсмічні дослідження, сейсмічні записи.

УДК 550.34

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322470

## Seismic moment tensor and focal mechanism for earthquake of February 22, 2024 in Eastern Slovakia (12:54:15 UTC, 21.75°E, 49.03°N, depth 9 km, ML3.0)

D.V. Malytskyy<sup>1,2</sup>, L. Fojtikova<sup>2</sup>, J. Malek<sup>2</sup>, O.A. Astashkina<sup>1</sup>, A.R. Gnyp<sup>1</sup>, M.S. Dobushovskyy<sup>1</sup>, R.M. Pak<sup>1</sup>, M.O. Melnyk<sup>3</sup>, V.G. Nikulins<sup>4</sup>, V.V. Ignatyshyn<sup>5</sup>, 2025

<sup>1</sup>Carpathian Branch of S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine
<sup>2</sup>Institute of Rock Structure and Mechanics of the Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic
<sup>3</sup>Lviv Centre of Institute of Space Research of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine
<sup>4</sup>SIA Geo Consultants, Riga, Latvia
<sup>5</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The accuracy of the focal mechanism solution can depend very significantly on the number of stations used, especially in the case of weak earthquakes and sparse networks. We describe the procedure for retrieving the seismic moment tensor for the earthquake of February 22, 2024, which happened in Eastern Slovakia, using a limited number of seismic stations. We use records from only two stations of the Slovakian network: sk19 (49.25 °N, 21.93 °E) and sk20 (49.21 °N, 21.61 °E). The moment tensor inversion of high-frequency seismogram data in this study is based on a point source approach using the matrix method for the direct waves. The process involves generating records in displacements using the frequency and wave-number integration technique for an elastic horizontally layered medium. A method is presented for moment tensor inversion of only direct *P*- and *S*-waves, which is less sensitive to path effects modelling than reflected and converted waves, significantly improving the method's accuracy and reliability. The location and origin time of the event are considered known. Based on forward modelling, a numerical technique is developed for the inversion of observed waveforms for the of moment tensor **M**(*t*) components obtained by generalized inversion.

**Key words**: focal mechanism, waveform inversion, seismic moment tensor, direct waves, seismic stations, earthquakes.

**Introduction.** Determining the mechanism of an earthquake source is probably one of the most difficult problems in seismological research today. To be solved as stated, solutions to a number of other and not less difficult problems must be known first. Originally, the source mechanisms were determined from the polarities of the first *P*-waves at the stations [Aki, Richards, 2002]. Also, it was necessary to know the exact location of the source and to have an adequate velocity model between the source and the stations

Citation: Malytskyy, D.V., Fojtikova, L., Malek, J., Astashkina, O.A., Gnyp, A.R., Dobushovskyy, M.S., Pak, R.M., Melnyk, M.O., Nikulins, V.G., & Ignatyshyn, V.V. (2025). Seismic moment tensor and focal mechanism for earthquake of February 22, 2024 in Eastern Slovakia (12:54:15 UTC, 21.75°E, 49.03°N, depth 9 km, ML3.0). *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 110—115. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322470.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

to calculate the emergence angles of the first *P*-waves from the source. Usually, a sufficient number of reliable polarities is only available for large (*M*>4) earthquakes occurring in areas with dense seismological networks [Dziewonski et al., 1981]. Unlike polarities, waveforms contain much more information about the source, which makes it possible to circumvent the above limitations, use fewer stations, and determine the mechanisms of smaller earthquakes [Dreger, Helmberger, 1993; Malytskyy, 2010, 2016; Malytskyy, D'Amico, 2015; Malytskyy et al., 2024]. This is especially important in Eastern Slovakia [Schlomer et al., 2024].

In the current study, the moment tensor components of an earthquake with a reported magnitude of ML3 that occurred on February 22, 2024 (12:54:15 UTC, 21.75 °E, 49.03 °N, depth 9 km, ML 3.0) in Eastern Slovakia are determined. They were obtained using a method for inverting the moment tensor of only the direct *P*- and *S*-waves, which are much less sensitive to path effects than reflected and converted ones and contain a much less distorted imprint of the source [Malytskyy, 2010, 2016; Malytskyy, D'Amico, 2015]. The use of only direct waves significantly improves the accuracy and reliability of the inversion. For direct modelling, i.e., calculation of synthetic seismograms, the matrix method was used, which enables the analytical isolation of only direct waves.

Theory: waveform inversion. The method presented here enables obtaining the seismic tensor solution by inverting waveforms recorded at a limited number of seismic stations. We consider the propagation of seismic waves in a vertically inhomogeneous media and develop a version of the matrix method for calculating synthetic seismograms on the upper surface of a horizontally layered isotropic medium. The point source is located inside a layer and is represented by a seismic moment tensor. The displacements on the upper surface are presented in matrix form in the frequency and wave number domain, separately for far-field and near-field [Malytskyy, 2016]. Subsequently, only the far-field displacements are considered, and the wavefield from only direct *P*- and *S*-waves is isolated using eigenvector analysis, which reduces the problem to a system of linear equations [Malytskyy, 2016]. Subsequently (inverse modelling), the spectra of the moment tensor components are calculated using the generalized inversion solution and transformed into the time domain by applying the inverse Laplace transform. As a result, the following expressions have been obtained by [Malytskyy, 2010, 2016] in cylindrical coordinates for the displacements  $u_z^{(0)}(t,r,\phi)$ ,  $u_r^{(0)}(t,r,\phi)$  and  $u_{\phi}^{(0)}(t,r,\phi)$ , on the upper surface of the half-space at *z*=0:

$$\begin{pmatrix} u_z^{(0)} \\ u_r^{(0)} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^3 \int_0^\infty k^2 \mathbf{I}_i L^{-1} [m_i \mathbf{g}_i] dk ,$$

$$u_{\phi}^{(0)} = \sum_{i=5}^6 \int_0^\infty k^2 J_i L^{-1} [m_i g_{\phi i}] dk ,$$
(1)

in which

$$m_{1}=M_{xz}\cos\varphi + M_{yz}\sin\varphi, m_{2}=M_{zz'}$$

$$m_{3}=\cos^{2}\varphi \cdot M_{xx} + \sin^{2}\varphi \cdot M_{yy} + \sin^{2}\varphi \cdot M_{xy'}$$

$$m_{4}=-\cos2\varphi \cdot M_{xx} + \cos2\varphi \cdot M_{yy} - 2\sin2\varphi \cdot M_{xy'}$$

$$m_{5}=M_{yz}\cos\varphi - M_{xz}\sin\varphi, \qquad (2)$$

$$m_{6}=\sin2\varphi \cdot M_{xx} - \sin2\varphi \cdot M_{yy} - 2\cos2\varphi \cdot M_{xy'}$$

 $M_{xx'}, M_{xy'}, M_{zz}$  are the Cartesian components of the moment rate tensor **M** in the frequency domain representing the source located at r=0, axis x points North and y points East,  $\varphi$  is the station's azimuth, k is the horizontal wave number, functions  $\mathbf{g}_i = (g_{zi'}g_{ri})^T$ , and  $g_{\varphi i}$  contain propagation effects between the source and the receiver,  $\mathbf{I}_1 = \begin{pmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_0 \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{I}_2 = \begin{pmatrix} J_0 & 0 \\ 0 & J_1 \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{I}_3 = \mathbf{I}_2$ ;  $J_5 = J_0$ ,  $J_6 = J_1$  are the Bessel functions of  $k \cdot r$ , and  $L^{-1}$  is the inverse Laplace transform (from frequency into time domain).

Further, only the far-field displacements are considered, and the wave-field from only direct *P*- and *S*-waves is isolated with eigenvector analysis, reducing the problem to a system of linear equations [Malytskyy, 2016]. Eq. 1 is then expressed in matrix form for only the direct *P*- and *S*-waves on the upper surface of the half-space in frequency and wave number domain ( $\omega$ , *k*) [Malytskyy, 2010]:

$$\mathbf{U}^{(0)} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{M} \,, \tag{3}$$

in which vector  $\mathbf{U}^{(0)} = \left(U_x^{(0)P}, U_x^{(0)S}, U_y^{(0)P}, U_z^{(0)P}, U_z^{(0)S}, U_z^{(0)P}, U_z^{(0)S}\right)^T$  contains the six Cartesian displacement components of direct *P*and *S*-waves, vector  $\mathbf{M} = \left(M_{xz}, M_{yz}, M_{zz}, M_{xx}, M_{yy}, M_{xy}\right)^T$  consists of the six independent Cartesian components of the moment rate tensor **M**, matrix **K** is accounting for path effects and transformations between the Cartesian and cylindrical coordinates. The least-squares solution to the over-determined system of Eq. 3 for **M** can be obtained by generalized inversion [Aki, Richards, 2002]:

$$\mathbf{M} = \left(\mathbf{K}^* \mathbf{K}\right)^{-1} \mathbf{K}^* \mathbf{U}^{(0)} \tag{4}$$

in which the star denotes complex conjugation and transposition.

Thus, since all the six independent components of moment tensor M contribute to the waveforms  $\mathbf{U}^{(0)}$  in the over-determined system of Eq. 3, the inversion scheme of Eq. 4 should make it possible, at least theoretically, to obtain a unique solution for each of them. Within the limitations of current source presentation and path effects modeling, the solution is exact, and convergence is reached after a single iteration. The inverse problem, in this case, consists of determining the parameters of the point source under the condition that the source location and origin time are known, as well as the distribution of velocities of seismic waves between the source and the station.

**Application.** In this section, the efficiency of the proposed inversion method is tested by applying it to the earthquake in Eastern Slovakia. For this research, we selected a weak crustal earthquake that occurred on February 22, 2024 (12:54:15 UTC, 21.75 °E, 49.03 °N, depth 9 km, ML3.0, Catalog Service: EMSC) (http://eida.gfz.de/webdc3/). To test our method, we use records from only two Slovakia network stations: sk19 (49.25 °N, 21.93 °E) and sk20 (49.21 °N, 21.61 °E) (Fig. 1).

The 1D crustal model used in the inversion is listed in Table [Málek et al., 2023]. The source is located at a depth of 9 km. Note that the stationssk19 and sk20 are located in dif-



Fig. 1. Location of the Slovakia network stations sk19 (49.25 °N, 21.93 °E) and sk20 (49.21 °N, 21.61 °E) (triangles) and the epicenter of the earthquake of February 22, 2024 (12:54:15 UTC, 21.75 °E, 49.03 °N, depth 9 km, ML3.0) (star).

ferent quadrants relative to the earthquake's epicenter.

Components of the seismic moment tensor  $\mathbf{M}(t)$  and a version of the focal mechanism calculated by the inversion of waveforms recorded at stationssk19 and sk20 using Eq. 4 are shown in Fig. 2.

**Discussion and conclusion.** The paper presents a method for moment tensor inversion of only direct *P*- and *S*-wave forms registered at only two stations. It is theoretically shown that the displacements at every single point on the upper surface of a horizontally layered and perfectly elastic half-space generated by a point source represented by a time-varying symmetric moment tensor depend on all six of its components.

The method is based on the inversion approach described in [Malytskyy, 2010, 2016],

#### The 1D crustal model used in the inversion

h <sub>s'</sub> km	V <sub>P'</sub> km/s	V <sub>S'</sub> km/s	c, <i>g</i> /cm <sup>3</sup>
1.0	2.5	1.445	2.2
3.0	3.7	2.139	2.44
3.0	5.2	3.006	2.74
10	5.9	3.41	2.88
3	6.4	3.699	2.98
4	6.75	3.902	3.05
	8.0	4.624	3.3



Fig. 2. The components of seismic moment tensor obtained for the earthquake of 2024-02-22 by inversion of its direct waveforms at the stations sk19 and sk20 (*a*); *b* — version of the focal mechanism solution corresponding to the tensor presented in (*a*). The vertical dashed line in (*a*) refers to the origin time at 12:54:14.8UTC.

where a version of the matrix method was developed for calculating direct waves in a horizontally layered half-space from a point source represented by its moment tensor. Using the method presented in the current paper, the focal mechanism of the ML 3.0 earthquake on February 22, 2024 (12:54:15 UTC, 21.75 E°, 49.03 °N, depth 9 km) in Eastern Slovakia is retrieved. Choosing to invert only the direct waves calculated by the matrix method instead of the full field makes it possible to reduce the effects of the half-space model inaccuracy since the reflected and converted phases are much more distorted by it. The assumption of horizontally layered half-space, as well as the distribution of seismic velocities in it, may, however, turn out grossly incorrect in fact. Combined with inaccurate knowledge of the source location and origin time, as well as a number of other uncertainties, such as those introduced by seismic noise in

#### References

- Aki, K., & Richards, P.G. (2002). Quantitative seismology. Sausalito, California: University Science Books, 520 p.
- Dziewonski, A.M, Chou, T.A., & Woodhouse, J.H.

the observed seismograms, etc., it can almost completely obscure the source imprint in the seismograms, and especially in those originating, as it is, from only a limited number of seismic stations, turn the moment inversion ill-defined and lead to an intractable solution. This is why some independent controls for the inversion results are needed. However, such studies are very important in regions with low local seismicity, where records from only a limited number of stations can be used to determine the parameters of the earthquake source, which is important for seismology and geophysics in general.

Acknowledgments. The work presented in this paper was partially supported by the Institutional Research Plan RVO67985891 of the Institute of Rock Structure and Mechanics of the Czech Academy of Sciences and the program CAS Researchers at Risk Fellowship 1598/2024 OMS.

(1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 86,* 2825—2852. https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825.

- Dreger, D.S., & Helmberger, D.V. (1993). Determination of source parameters at regional distances with single station or sparse network data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98*(B5), 1162–1179. https://doi. org/10.1029/93JB00023/
- Málek, J., Brokešová, J., & Novotný, O. (2023). New velocity structure of the Novy Kostel earthquake — swarm region, West Bohemia, determined by the isometric inversion. *Pure* and Applied Geophysics, 180, 2111—2134. https://doi.org/10.1007/s00024-023-03250-w.
- Malytskyy, D. (2010). Analytic-numerical approaches to the calculation of seismic moment tensor as a function of time. *Geoinformatika*, (1), 79–85 (in Ukrainian).
- Malytskyy, D. (2016). *Mathematical modeling in the problems of seismology*. Kyiv: Naukova Dumka, 277 p. (in Ukrainian).
- Malytskyy, D., & Amico, S.D. (2015). Moment tensor solutions through waveforms inversion.

Mistral Service S.a.S., Earth and Environmental Sciences.

- Malytskyy, D., Fojtikova, L., Malek, J., Gnyp, A., Astashkina, O., Nikulins, V., & Pak, R. (2024). Seismic moment tensor and focal mechanism of the October 9, 2023 earthquake in Eastern Slovakia. *Geodynamics*, (1), 5—11. https://doi. org/10.23939/jgd2024.01.005.
- Schlomer, A., Hetenyi, G., Plomerova, J., Vecsey, L., Bielik, M., Bokelmann, G., Csicsay, K., Fojtikova, L., Friederich, W., Fuchs, F., Grad, M., Janik, T., Exnerova, H.K., Kolinsky, P., Malinowski, S., Meier, T., Mendecki, M., Papco, J., Szucs, E., Sule, B., Timko, M., Gyarmati, A., Weber, Z., Wesztergom, V., Zlebcikova, H., & Alp Array-PACASE Working Group (2024). The Pannonian-Carpathian-Alpine seismic experiment (PACASE): network description and implementation. Acta Geodaetica et Geophysica, 59, 249—270. https://doi.org/10.1007/ s40328-024-00439-w.

## Тензор сейсмічного моменту і фокальний механізм землетрусу, який відбувся 22 лютого 2024 р. у Східній Словаччині (12:54:15 UTC, 21,75°E, 49,03°N, *H*=9 км, *ML*3,0)

Д.В. Малицький<sup>1,2</sup>, Л. Фойтікова<sup>2</sup>, Я. Малек<sup>2</sup>, О.А. Асташкіна<sup>1</sup>, А.Р. Гнип<sup>1</sup>, М.С. Добушовський<sup>1</sup>, Р.М. Пак<sup>1</sup>, М.О. Мельник<sup>3</sup>, В.Г. Нікулін<sup>4</sup>, В.В. Ігнатишин<sup>5</sup>, 2025

> <sup>1</sup>Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Львів, Україна <sup>2</sup>Інститут структури і механіки гірських порід Чеської академії наук, Прага, Чеська Республіка <sup>3</sup>Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН України, Львів, Україна <sup>4</sup>SIA Geo Consultants, Рига, Латвія <sup>5</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Точність визначення фокального механізму залежить від кількості сейсмічних станцій, особливо у разі слабких землетрусів. Описано процедуру відновлення тензора сейсмічного моменту для землетрусу, який стався 22 лютого 2024 р. в Східній Словаччині, використовуючи обмежену кількість сейсмічних станцій, а саме записи лише на двох станціях Словацької мережі: sk19 (49.25 °N, 21.93 °E) і sk20 (49.21 °N, 21.61 °E). Отримання тензора сейсмічного моменту для високочастотної сейсмограми в цьому дослідженні базується на підході точкового джерела з використанням матричного методу для прямих хвиль. Процес передбачає створення сейсмічних записів у переміщеннях за допомогою інтегрування за частотою та хвильовим числом у випадку пружного горизонтально-шаруватого середовища. Представлено метод отримання сейсмічного тензора лише для прямих *P*- та *S*-хвиль, який є менш чутливим до поширення відбитих і заломлених хвиль, що значно покращує точність і надійність методу. Місце і час виникнення події вважаються відомими. На підставі прямого моделювання розроблено методику інверсії хвильових форм для компонент тензора моменту **M**(*t*), отриманих шляхом узагальненої інверсії.

Ключові слова: механізм вогнища, інверсія хвилі, тензор сейсмічного моменту, прямі хвилі, сейсмічні станції, землетруси.

УДК 551.24 (477)

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322471

## Architecture of the upper crust along the WARR deep seismic profile SHIELD'21 based on seismic and geological data

A.V. Murovska<sup>1,2</sup>, O.O. Verpakhovska<sup>1</sup>, V.I. Starostenko<sup>1</sup>, T.P. Yegorova<sup>1,2</sup>, T. Janik<sup>3</sup>, P. Aleksandrowski<sup>4</sup>, S.V. Mychak<sup>1</sup>, V.I. Alokhin<sup>5</sup>, 2025

> <sup>1</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine <sup>2</sup>Department of Life Sciences and Environmental Sustainability, University of Parma, Italy

<sup>3</sup>Institute of Geophysics of the Polish Academy of Sciences, Warszawa, Poland <sup>4</sup>Polish Geological Institute — National Research Institute, Warszawa, Poland <sup>5</sup>Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine

We present for the first time a seismic image of the upper crust, obtained by the finitedifference reflection/refraction migration processing of the SHIELD'21 deep profile results and its preliminary geological interpretation, taking into account available geophysical and geological data. The migration image shows a general domal shape of the top surface of the Archean to Palaeoproterozoic crystalline basement, which is devoid of sedimentary cover along the central part of the profile — at the Ukrainian Shield — and sloping to both sides, to the SW and NE below the sedimentary cover succession of the adjoining platform areas. The up-to-3—5-km-thick upper part of the portion of the East European Craton cross-cut by the profile is characterized by well-developed stratification and gentle folding at its flanks, while the central core is more homogeneous. High-angle faults are imaged mainly on the flanks of the Shield and dipping towards its center. The velocity model and migration image patterns agree with extensional tectonic structures identified on the terrain surface by fieldwork at the junction of the Podolian and Ros' domains of the Ukrainian Shield. They allow the idea of a Palaeoproterozoic large-scale extension, providing a crustal heterogeneity that might have later impacted the Dnieper-Donets rift basin opening and evolution in Devonian time.

**Key words:** WARR seismic profile SHIELD'21, migration image, stress field, East European Craton, Volhyno-Podolian Homocline, Ukrainian Shield, Dnieper-Donets Basin.

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Murovska, A.V., Verpakhovska, O.O., Starostenko, V.I., Yegorova, T.P., Janik, T., Aleksandrowski, P., Mychak, S.V., & Alokhin, V.I. (2025). Architecture of the upper crust along the WARR deep seismic profile SHIELD'21 based on seismic and geological data. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 115—119. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322471.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

**Introduction.** Carried out in 2021, the wide-angle reflection-refraction (WARR) SHIELD'21 deep seismic profile crosses the Archaean and Palaeoproterozoic crystalline complexes of the Ukrainian Shield and adjacent platform areas (for the profile location see [Starostenko et al., 2024]).The platform areas are represented by the Volhyno-Podolian Homocline (VPH) in the southwest (composed of Neoproterozoic to Cretaceous successions buried below the Neogene Carpathian Foredeep) and the Devonian to Cenozoic Dnieper-Donets Basin (DDB) in the northeast.

We present a seismic wave image of the upper crust (0—15 km deep) obtained by the finite-difference reflection/refraction migration method [Verpakhovska, 2021] applied to the SHIELD'21 data and its preliminary interpretation (Fig. 1). In addition, we have taken into account the results of previous [Mychak

et al., 2022] and new (2024) geological study of the Precambrian complexes in the vicinity of the profile.

**Results.** The migration image in Fig. 1 (*c*, *d*) clearly displays the dome-like shape of the top surface of the East European Craton (EEC) with the Ukrainian Shield in its central segment.

The central core of EEC along the profile is practically devoid of a sedimentary cover, while its slopes are overlain by successions of deep sedimentary basins: the Carpathian Foredeep with the adjacent VPH and DDB. The 3—5-km-thick upper layer of the Ukrainian Shield shows high stratification and gentle folding, especially at its flanks, while its central core is more homogeneous. Zones of deformation and high-angle faults are most clearly manifested on the flanks and dipping towards its center. The western most



Fig. 1. Tectonic interpretation of the seismic image of upper crust along the SHIELD'21profile: a — gravity and magnetic fields, b — geological cross-section [Starostenko et al., 2024] (black triangles indicate projection of studied outcrops on the profile line), c — migration image with interpretation elements (*P*-waves velocities after [Starostenko et al., 2024]), d — pure migration image.

segment of the profile (km 350-430) is characterized by low-velocity crust [Starostenko et al., 2024], gravity low up to -90 mGal, and magnetic field of close-to-zero magnitudes due to the thick Palaeozoic-Riphean sediments. The migration image reveals a wide zone of increased deformation (km 410-480) steeply dipping beneath the southeastern margin of the East European Craton, covered by the VPH succession. A number of sedimentary complexes can be distinguished in this segment. The upper layer represents the Meso-Cenozoic deep-water turbidites of the Carpathian allochthon and Neogene molasse of the Carpathian Foredeep. They are underlain by a layer comprising Palaeozoic shallowwater and Ediacaran syn-rift deposits. Beneath the Ediacaran sequence, we identified another basin, visible at a depth of 10 km due to a high-reflectivity pattern and potentially corresponding to Riphean metasedimentary and metavolcanic rocks.

On the geological cross-section, the Podolian Domain of the Ukrainian Shield (km 520—680) is limited by the steeply dipping Podolian and Zvizdal-Zalisk faults. On the migration image, the Podolian Domain looks like a gentle «anticline» broken in the southwest by a wide deformation zone; in the northeast, it gradually turns into the Ros' Domain. On the migration image, the transition between the Podolian and Ros' domains (km 620-780) at the subsurface level is represented by a wide zone of increased stratification, while on the SHIELD'21 velocity model the junction is related to an asymmetric trough (km 680-730) as deep as ~10 km with rocks of relatively reduced velocity [Starostenko et al., 2024].

The Ros' and Ingul domains of the Ukrainian Shield and Sevsk Domain of the Voronezh massif form a single block of juvenile Paleoproterozoic crust [Bogdanova et al., 2016]. The block differs from the Podolian Domain on the migration image by its higher reflectivity (heterogeneity). In the northeastern segment of the Ros' Domain (km 790—875), we interpreted a wide zone of deformations and granitization, which includes the Yadlov-Trakhtemyriv southwest-dipping fault (continuation of the Palaeoproterozoic Golovanivsk suture zone) and a series of granite intrusions.

The northeastern segment of SHIELD'21 crosses the DDB. Its uppermost layer represents the Meso-Cenozoic to Permian continental and shallow-water post-rift sediments, underlain by a layer (down to the depth of 5.5 km) comprising Devonian and Carboniferous syn-rift sequences. Under the axial zone of the DDB, a trough with a relatively lower velocity (km 900—970), reaching a depth of 11 km, can be interpreted as a junction of the Ingul and Sevsk domains, inherited from the Sarmatian terrains assembly in Palaeoproterozoic [Bogdanova et al., 2016]. Pre-existing Palaeoproterozoic heterogeneity at the base of the DDB may have determined its emplacement in the Late Paleozoic, as it also supposed by [Stephenson et al., 2021].

**Field geological-and-structural analysis.** The recently studied outcrops are located within the Podolian and Ros' domains. They include the Neoarchean granitoids of the Letychiv dome and Khmilnyk fault, the sites cropped out in the Ros' Domain, including Zvizdal-Zalisk and Brusyliv faults, and the Uman granites (Fig. 1, *b* for the outcrop's location). Most outcrops exhibit a similar structural pattern with structural-textural elements forming gentle folding and a system of steep and gentle faults interpreted as reflecting a compressional and, following it, extensional stress fields.

A flat fault in the biotite granites of Neoarchean Tetiev complex and related kinematic stereogram are presented in Fig. 2. This outcrop is located in the Zvizdal-Zalisk fault zones of N-S strike at the contact of Podolian and Ros' domains (see Fig. 1, *b* for the outcrop location marked by the red triangle). On the base of the slicken-sides set, we have restored the W-E-trending extensional stress field (see Fig. 2). According to Mychak et al. [2022], faults and bands of gneisses dipping 100°/50° and 295°/50° are widely developed in the Zvisdal-Zalisk fault zone and related to the W-E trending extension.

**Conclusions.** The seismic migration image of the upper crust along the SHIELD'21 profile reveals a dome-like structure of the EEC top with the Ukrainian Shield in its center part. The upper layer of the Ukrainian Shield,



Fig. 2. Gentle faults with tectonic breccia and strike-slip surfaces in biotite granites of the Neoarchean Tetiev complex in the Zvizdal-Zalisk fault zone and the reconstructed stress field of W-E extension. The Pogrebishche outcrop is indicated in Fig. 1, *b* by a red triangle.

especially on its flanks, shows increased stratification and gentle folding. The steep faults ( $\sim 50^{\circ}$ — $60^{\circ}$ ) on the flanks of the Ukrainian Shield are inclined towardits central zone. A similar situation of the interplay of gentle and steep structural-textural elements and faults was revealed in the studied terrain outcrops of the Ukrainian Shield in the vicinity of the profile.

#### References

- Bogdanova, S.V., Gorbatschev, R., & Garetsky, R.G. (2016). EUROPE. East European Craton. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (pp. 1—18). https://doi. org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X.
- Mychak, S.V., Bakarzhyeva, M.I., Farfuliak, L.V., & Marchenko, A.V. (2022). The inner structure and kinematics of the Zvizdal-Zalisk and Brusyliv fault zones of the Ukrainian shield by the results of tectonophysical, magnetometrical data. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(1), 83—110.

The migration image pattern, SHIELD'21 velocity model [Starostenko et al., 2024], geological cross-section, reconstructed extension structures at the transition zone of the Podolian and Ros' domains of the Ukrainian Shield make it possible to hypothesize a Proterozoic large-scale extension that could provide crustal heterogeneity on which the DDB originated in Devonian time.

https://doi.org/10.24028/gzh.v44i1.253712 (in Ukrainian).

Stephenson, R., Yegorova, T., & Stovba, S.(2021). An investigation of how intracratonic rifting is «seeded»: Case study of the Late Devonian Dniepr-Donets Basin rift within the East European Craton. *Precambrian Research, 362*, 106305. https://doi.org/10.1016/j.precamres. 2021.106305.

Starostenko, V., Janik, T., Murovskaya, A., Czu-

ba, W., Środa, P., Yegorova, T., Aleksandrowski, P., Verpakhovska, O., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Amashukeli, T., Burakhovych, T., Wójcik, D., Omelchenko, V., Legostaeva, O., Gryn, D., & Chulkov, S. (2024). Seismic lithospheric model across Ukrainian Shield from the Carpathians to the Dnieper-Donets Basin and its tectonic interpretation. *Tectonophys*- *ics*, *892*, 230540. https://doi.org/10.1016/j.tec-to.2024.230540.

Verpakhovska, O.O. (2021). Technique for the imaging crystalline basement according to the DSS data. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(5), 127— 149. https://doi.org/10.24028/gzh.v43i5.244076 (in Russian).

## Архітектура верхньої кори вздовж WARR глибинного сейсмічного профілю SHIELD'21 на основі сейсмічних та геологічних даних

## А.В. Муровська<sup>1,2</sup>, О.О. Верпаховська<sup>1</sup>, В.І. Старостенко<sup>1</sup>, Т. Єгорова<sup>1,2</sup>, Т.П. Янік<sup>3</sup>, П. Александровський<sup>4</sup>, С.В. Мичак<sup>1</sup>, В.І. Альохін<sup>5</sup>, 2025

<sup>1</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна <sup>2</sup>Університет Парми, Департамент наук про хімію, життя та навколишнє середовище, Парма, Італія <sup>3</sup>Інститут геофізики Польської академії наук, Варшава, Польща <sup>4</sup>Польський геологічний інститут — Національний науково-дослідний інститут, Варшава, Польща <sup>5</sup>Донецький національний технічний університет, Дрогобич, Україна

Вперше представлено сейсмічне зображення верхньої частини земної кори до глибини 15 км, отримане за допомогою кінцево-різницевої процедури міграції відбиття/заломлення результатів по глибинному профілю SHIELD'21, та його попередню геологічну інтерпретацію з урахуванням доступних геофізичних і геологічних даних. Міграційне зображення демонструє загальну куполоподібну форму поверхні докембрійського кристалічного фундаменту Східноєвропейського кратону, яка позбавлена осадового чохла вздовж центральної частини профілю — на Українському щиті — і нахилена на флангах щита на південний захід і північний захід під осадовим чохлом прилеглих платформних областей. Верхня частина сегмента Східноєвропейського кратону, який перетинається профілем, потужністю до 3—5 км характеризується добре розвиненою шаруватістю та пологою складчастістю, особливо на флангах щита, тоді як центральне ядро більш однорідне. Круті розломи проявлені на сейсмічному зображені переважно на флангах щита і занурюються до його центру. Структурний рисунок швидкісної моделі та міграційного зображення, а також тектонічні структури розтягу, виявлені на поверхні під час польових досліджень на контакті Подільського та Росинського домейнів Українського щита, дають змогу висунути ідею великомасштабного палеопротерозойського розтягу, внаслідок чого була сформована неоднорідність земної кори, яка могла пізніше вплинути на відкриття та еволюцію Дніпровсько-Донецького рифтового басейну в девонський час.

**Ключові слова**: WARR сейсмічний профіль SHIELD'21, міграційне зображення, поля напруження, Східноєвропейський кратон, Волино-Подільська монокліналь, Український щит, Дніпровсько-Донецький басейн.

УДК 550.383+550.389 (477)

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322472

# Calculation of the power and angular components of the geomagnetic field induction vector in the territory of Ukraine

#### M.I. Orlyuk, A.V. Marchenko, A.O. Romenets, M.I. Bakarzhieva, I.M. Orliuk, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The study calculates the geomagnetic field induction vector power and its angular components for the territory of Ukraine for the 2024.5 epoch. We used a digital map of the  $\Delta B_{\rm a}$  induction module anomalies and  $B_0$ , the Earth's normal magnetic field. To calculate the components of the  $\Delta B_{\rm a}$  (the anomalous magnetic field), a 3D magnetic model of the territory of Ukraine was developed. It reflects regional and large local sources of the Earth's crust. The values of the Earth's normal magnetic field's components,  $B_{0x}$  (northern),  $B_{0y}$  (eastern), and  $B_{0z}$  (vertical), were calculated using the analytical model of the Earth's main magnetic field (IGRF-14). The power  $B_{x}$ ,  $B_{y}$ , and  $B_{z}$  components of the geomagnetic field vector were obtained as the sum of their anomalous and normal values at points along a 10×10 km grid, and the angular, declination D and inclination I, were calculated.

Key words: geomagnetic field, IGRF-14, magnetic model, magnetic declination, Ukraine.

Introduction. The geomagnetic field is one of the main information factors in solving several problems of geomagnetism, Earth physics, the structure and development of the planet's inner and outer shells, forecasting minerals, and assessing environmental ecology. The Earth's inner magnetic field is the main magnetic field  $B_{IGRF}$  vector sum (the Earth's core field (International Geomagnetic Reference Field)) and the anomalous magnetic field  $\Delta B$  (the Earth's lithosphere field). In [Orlyuk et al., 2024a], a map of the geomagnetic field induction module and its anomalies for the epoch 1969.5 was developed, and a method for constructing such maps for an any epoch was proposed. Using this technique, a map of the anomalous magnetic field for the epoch 2005.5 was created. By filtering the output field, it was divided into different wave components that carry information about the magnetic sources of the lower, middle, and upper parts of the Earth's crust [Orlyuk et al., 2024b]. At present, developing maps of the Earth's geomagnetic field's power and angular components (north, east, vertical, horizontal, inclination, and declination) remains extremely relevant; they are used, in particular, for orientation, navigation, and the development of digital topographic maps [Chulliat et al., 2015; Meyer et al., 2017; Orlyuk et al., 2018].

**Object of research:** the magnetic field in the Ukrainian territory.

**Purpose of research:** calculating the Ukrainian territory power and angular elements of the internal geomagnetic field vector at the 2024.5 epoch.

Methods and materials. The internal magnetic field of the Earth is the vector sum of the core field (main magnetic field)  $B_0$  and the anomalous magnetic field  $\Delta B_a$ .

$$B = \sqrt{\left(\Delta B_{ax} + B_{0x}\right)^2 + \left(\Delta B_{ay} + B_{0y}\right)^2 + \left(\Delta B_{az} + B_{0z}\right)^2}.$$

Citation: Orlyuk, M.I., Marchenko, A.V., Romenets, A.O., Bakarzhieva, M.I., & Orliuk I.M. (2025). Calculation of the power and angular components of the geomagnetic field induction vector in the territory of Ukraine. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 120–124. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322472.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

To calculate  $B_{r}B_{\nu}$  and  $B_{r}$  (the power) and D and I (angular) components of the geomagnetic field induction vector  $B_{i}$ , we have the values of the anomalous  $\Delta B_{\rm a}$  and normal  $B_0$  magnetic fields at our disposal.  $B_0$  (the Earth's normal magnetic field induction vector modulus),  $B_{0x'}$ ,  $B_{0v'}$  and  $B_{0z}$  (its northern, eastern, and vertical components) are calculated using IGRF models. Until recently, the IGRF-13 model [Alken et al., 2021] has been available. Currently, the IGRF-14 model is available [Magnetic..., 2025], and it was used in our calculations. The digital map of the  $\Delta B_{a}$ induction modulus anomalies was used to develop a 3D magnetic model of the crust and then calculate the anomalous magnetic field vector from it. In this case, taking into account the inductive and residual magnetization of individual sources, the calculation of the anomalous magnetic field vector is provided. From the Earth's normal magnetic field, the relevant components of the field model  $\Delta B_{mx'}$  $\Delta B_{m\nu'} \Delta B_{mz'} \Delta B_m$  are calculated, which, with some error, consort with the  $\Delta B_{ax'} \Delta B_{ay'} \Delta B_{az'}$ and  $\Delta B_{a}$  components.

The calculation of *B* magnetic field induction vector modulus and the absolute values  $B_x$  of its northern,  $B_y$  eastern and  $B_z$  vertical components is carried out by adding at the calculation points the according components  $(B_{0x'} \ B_{0y'} \ B_{0z})$  of the normal and  $(\Delta B_{ax'} \ \Delta B_{ay'} \ \Delta B_{az})$  anomalous fields

$$B = B_0 + \Delta B_a, B_x = B_{0x} + \Delta B_{ax},$$
  
$$B_y = B_{0y} + \Delta B_{ay}, B_z = B_{0z} + \Delta B_{az}.$$

The horizontal component value and the Earth's magnetic field total vector of the D declination and I inclination angles are calculated by equations

$$B_{H} = \sqrt{B_{x}^{2} + B_{y}^{2}}, D = \arccos \left( B_{x} / B_{H} \right),$$
$$I = \arcsin \left( B_{z} / B \right).$$

**Results.** This work presents the results of calculating the Earth's magnetic field's vector power components, as well as the inclination and declination angles for the Ukrainian territory, considering the influence of the anomalous magnetic field crustal sources. For this purpose, a 3D magnetic model of the Ukrainian territory was created, which was the

basis for the  $\Delta B_{a}$  anomalous field components calculations [Orlyuk et al., 2017]. The model is represented by 230 magnetic sources. The obtained field satisfies the regional component of the anomalous magnetic field with acceptable accuracy ( $\pm 50$  nT), as well as large, intense local anomalies (±150 nT). Sources of magnetic anomalies are located at depths from 1 to 10 km (local magnetic anomalies) and from 7-10 to 30-45 km (regional anomalies). The sources' magnetization ranges from 0.1 to 10.0 A/m. The Kursk and Kryvyi Rih anomalies' sources have a magnetization of more than 10.0 A/m. The  $B_{\gamma'} B_{\gamma'} B_{\gamma'} D_{\gamma}$  and Igeomagnetic field components are calculated for the 2024.5 epoch (Fig. 1-3).

According to the calculations, the *B* geomagnetic field induction modulus for the Ukrainian territory at the2024.5 epoch varies from 47900 to 57400 nT (Fig. 1). At the same time, the background magnetic field varies from 49600 nT in the southwest to 51600 nT in the northeast. The largest anomalies are according to the sources of Kursk and Kryvyi Rih-Kremenchuk magnetic anomaly bands.

The influence of such magnetic anomalies is also reflected in other geomagnetic field induction module *B* components. The  $B_x$  northern component varies from 17500 to 25200 nT with background values from 18100 nT in the north of Ukraine to 22500 nT in the south (Fig. 2, *a*). The greatest influence from the anomalous magnetic field crustal sources was experienced by the  $B_y$  eastern component. It varies from -1800 to 7800 nT



Fig. 1. Digital map of the B geomagnetic field's induction module for the Ukrainian territory at the 2024.5 epoch.



Fig. 2. Northern (*a*), eastern (*b*), vertical (*c*), and horizontal (*d*) geomagnetic field induction vector components for the Ukrainian territory at the 2024.5 epoch.



Fig. 3. The geomagnetic field's declination *D* and the inclination *I* for the Ukrainian territory at the 2024.5 epoch.

with background values of 2300 nT in the west of Ukraine and 3200 nT in the east (Fig. 2, b). The  $B_z$  component is similar to the B geomagnetic field induction modulus. Its values vary from 44000 to 53400 nT against the background of its normal values of 44300 nT in the south and southwest to 48100 nT in the northeast (Fig. 2, c). The  $B_H$  component is within 18252-25712 nT, from south to north, naturally increasing and in intense magnetic anomalies areas (Fig. 2, d).

According to the calculations, the *D* magnetic declination on Ukrainian territory varies from  $-4^{\circ}$  to  $21^{\circ}$  (Fig. 3). For example, for the Odesa Regional Magnetic Anomaly, the intensity of which is up to 700 nT at the maxi-

mum, the *D* anomalies are from  $-2.6^{\circ}$  to  $1.2^{\circ}$ . The inclination at the 2024.5 epoch varies from  $62.1^{\circ}$  to  $69.6^{\circ}$  with background values from  $62.7^{\circ}$  in the south of Ukraine to  $69^{\circ}$  in the north (see Fig. 2, *d*).

Calculated values of the Ukrainian territory geomagnetic field power and angular elements are crucial for solving numerous geology, geophysics, and geomagnetism problems. The digital data of the geomagnetic field vector and its declination induction module plays nowadays a particular role. It is necessary for assessing the environment's ecology and for developing topographic maps.

#### References

- Alken, P., Thébault, E., Beggan, C.D. et al. (2021). International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth Planets Space*, 73, 49. https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x.
- Chulliat, A., Aiken, P., Nair, M., Woods, A., & Maus, S. (2015). The Enhanced Magnetic Model 2015—2020, National Centers for Environmental Information, NOAA. Retrieved from https://www.ncei.noaa.gov/products/enhan ced-magnetic-model
- Magnetic Field Calculators. (2025). Retrieved from https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml?useFullSite=true#igrf grid.
- Meyer, B., Saltus, R., & Chulliat, A. (2017). EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information. https://doi.org/10.7289/V5H70CVX.
- Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., & Bakarjieva, M. (2018). Ukrainian Regional Magnetic Map: the results of calculations of the

**Conclusions.** We calculated the power ( $B_x$  northern,  $B_y$  eastern,  $B_z$  vertical) and angular (declination *D* and inclination *I*) components of the geomagnetic field induction vector for the 2024.5 epoch for Ukrainian territory. The power components vary within the limits:  $B=47900\div57400$  nT;  $B_x=17500\div25200$  nT;  $B_y=-1800\div7800$  nT;  $B_z=44000\div53400$  nT. Declination varies from  $-4^\circ$  to 21°, and inclination from 62.1° to 69.6°. The obtained values of the geomagnetic field induction vector power and angular elements significantly differ from their normal values and the calculations for the 2015 epoch.

geomagnetic field components for the Epoch 2015. *COBS Journal (Special Issue: IAGA Work-shop 2018)*, (5), 40.

- Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., Bakarzhieva, M., & Orliuk, I. (2024a). Development of geomagnetic field induction module maps for the territory of Ukraine. *Geodynamics*, (1), 74—84. https://doi.org/10.23939/jgd 2024.01.074.
- Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., Bakarjieva, M., & Orliuk, I. (2024b). Geomagnetic field of Ukraine.Proc.Of the sci. conf. «Geological structure and history of geological development of the Ukrainian Shield» (Kyiv, 17—18 September 2024) (pp. 285—289) (in Ukrainian).
- Orlyuk, M.I., Marchenko, A.V., Bakarzhiyeva, M.I., & Romenets, A.O. (2017). 3D magnetic modelsfor calculating the components of the Earth'smagnetic field. Proc. of the XIth International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», Kyiv, 11—14 October 2017, Ukraine.CD-ROM, 5 p. (in Ukrainian).

## Розрахунок силових та кутових компонент вектора індукції геомагнітного поля території України

#### М.І. Орлюк, А.В. Марченко, А.О. Роменець, М.І. Бакаржієва, І.М. Орлюк, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

У дослідженні викладено результати розрахунку силових та кутових компонент вектора індукції геомагнітного поля території України на епоху 2024,5 року. Для цьо-

го використано цифрову карту аномалій модуля індукції  $\Delta B_a$  та нормальне магнітне поле Землі  $B_0$ . Для розрахунку компонент аномального магнітного поля  $\Delta B_a$  було розроблено 3D магнітну модель території України, в якій відображено регіональні та великі локальні джерела земної кори. Значення компонент нормального магнітного поля Землі  $B_0$ , його північної, східної та вертикальної складових, були розраховані за аналітичною моделлю головного магнітного поля Землі IGRF-14. Силові  $B_{x}$ ,  $B_y$  та  $B_z$  компоненти вектора геомагнітного поля були отримані як сума їх аномальних та нормальних значень в точках за мережею 10×10 км, а кутові, схилення D та нахилення I— шляхом розрахунку.

Ключові слова: геомагнітне поле, IGRF-14, магнітна модель, магнітне схилення, Україна.

УДК 550.838:551.14

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322564

## Magnetic model and heterogeneity of the crystalline crust of the southwestern boundary of the East European Craton

I.K. Pashkevich, M.I. Orlyuk, M.I. Bakarzhieva, A.V. Marchenko, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The paper presents 3D magnetic modeling of the crystalline crust in the Teissere-Tornquist line (TTL) area and its northwestern branching into the Sorgenfrei and Thor-Tornquist zones. The anomalous magnetic field was analyzed based on ground, airborne, and satellite surveys. The boundaries of the East European Craton segments follow the structure of the TTL, in which we have identified two branches of different strikes; they form a triple articulation with the Fennoscandia-Sarmatia suture zone. The TTL segmentation corresponds to the distribution of magnetic sources along the TTL.

**Key words:** 3Dmagnetic modelling, magnetic field, Teisseyre-Tornquistline, East European Craton.

**Introduction.** As presented in numerous publications, the characterisation of the margins and the type of articulation of the East European Craton (EEC) with the surrounding regions leaves several controversial issues. The southwestern boundary of the EEC has been studied by geological and geophysical methods for more than 100 years and is usually associated with the Teisseyre-Tornquist Line (TTL). However, causal connection between the heterogeneities of different lithospheric layers and the history of its development re-

main a problem. This also applies to the deep magnetic heterogeneities of the crystalline crust, their nature, and their connection with the structure of the crust and mantle.

The object of study is the crystalline crust in the vicinity of the TTL, which separates the three-layer-thick high-velocity crust of the EEC from the thin crust of the West European Platform. A 3D magnetic model of the EEC at 1:5 000 000, built with a spherical Earth in mind [Orlyuk et al., 2017], provides an idea of the distribution and types of deep magnetic

Citation: Pashkevich, I.K., Orlyuk, M.I., Bakarzhieva, M.I., & Marchenko, A.V. (2025). Magnetic model and heterogeneity of the crystalline crust of the southwestern boundary of the East European Craton. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 124—129. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322564.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

sources but requires further detailed modelling in the craton margins.

The research aims to detail the magnetic model of the crystalline crust of the southwestern marginal part of the EEC and to establish a connection with its structure.

The methodology consists of qualitative and quantitative description of the geomagnetic field based on the ground, airborne, and satellite surveys, assessment of the crust magnetization by three-dimensional modelling taking into account a priori seismic data along the DSS profiles, and analyzing the relationship between deep magnetic sources and the crustal structure features.

**Results.** The 3D magnetic model of the TTL crystalline crust and its northwestern branching into the Sorgenfrei (STZ) and Thor-Tornqvist (Thor-TZ) zones is shown in Fig. 1. The upper limits of local sources are attributed to the surface of the crystalline basement, and the lower ones, to the roof of the middle crust. The deep magnetic sources are limited to the roof of the middle crust ( $V_p$ =6.3 km/s) and the Mohodiscontinuity or to the depth of the Curie isotherm of the magnetite.

The model was based on the scheme of the main tectonic elements based on published materials such as [Grad et al., 2002, etc.] and the identification of the transition zone of the EEC crust to Avalonia and Variscids, underlain by the thinned lower crust of the EEC. The main lineament of the TTL<sup>1</sup> region separates the EEC and its segments - Fennoscandia (FSc) and Sarmatia (Sm) with their suture zone (FSS) — from the structure of the Western European Platform (WEP), including the Variscids and the Carpathians. We believe theTTL has two branches: a northwest branch along FSc with a strike of 305° and a southeast branch along Sm (330°). Combined with the FSS, they form a triple joint. The TTL is a complex system with faults adjacent and subparallel to it, which generally corresponds to a right strike. The system of associated faults of the southeastern branch is bounded on the eastern side by the meridional Ukrainian-Baltic activation zone (Uk-BZ).

The area is composed of two main types of crystalline crust: the high-velocity threelayer crust of the EEC and the low-velocity two-layer crust of the WEP. A third type, the 'transitional' crust, can be traced southwest of the TTL and is developed at the contact of the EEC with East Avalonia; to the southeast, it can be traced along the boundary with the FSc with a decrease in thickness to the FSS. Along the Sm it is fixed to the RomUkrSeis profile.

The nature of the faults associated with the TTL and with the 'transitional' crustal type area indicates different geodynamic regimes of formation of the northwestern and southeastern branches of the TTL. Their different ages of activation are also indicated by the distribution of the Vendian Volyn volcanic of Sarmatia and Neoproterozoic volcanic of the Trans-Scandinavian Volcanic Belt (TIB1) of Fennoscandia along the TTL (see Fig. 1).

The described branches of the TTL correspond to the stages of the EEC collision: in the late Ordovician — with the microcontinentAvalonia, in the Late Cretaceous—Early Permian — with the rest of the European Hercynianterranes [Gintov et al., 2022].

In the northwest, the northwestern TTL branch is divided into the Thor-TZ and STZ along the possible southern extension of the submeridional Svecon-Norwegian Front (SNF). The crustal boundary of the EEC is the Thor-TZ zone separating the three-layer high-velocity craton crust from the low-velocity thin crust of Avalonia.

The magnetic model of the region was preceded by an analysis of the anomalous magnetic field at high altitudes (Fig. 2). As is well known, many authors associate the TTL is associated by many authors with a zone of increased gradient of the ground magnetic field. Such a zone can be traced in the field at an altitude of 100 km within the same limits as in the ground field. The most intense anomalies at this height are observed southeast of the SNF within Fennoscandia. Further to the southeast, the combined effect of anomalies above the Lviv Trough and anomalies accompanying the TTL persists. In the Magsat satellite field, the maximum of the positive anomaly and the field at an altitude of 100 km cor-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Here and after, we refer to its position in the crystalline crust.



Fig. 1. 3D magnetic model of the crust and a scheme of the main tectonic elements of the EEC's southwestern edge and its surroundings: 1— position on the crystalline basement of the Teisseyre-Tornquist line (TTL), Sorgenfrei-Tornquist (STZ) and Thor-Tornquist (ThorTZ) zones; 2— Fennoscandia-Sarmatia suture (FSS) (a) and their possible extension (b); 3— transregional activation zones: Ukrainian-Baltic (Uk-BZ), Kherson-Smolensk (Kh-SmZ) and Sveconorwegian Front (SNF); 4— Central Belarusian Suture zone (CBSZ); 5— main faults (a) and their possible extension (b); 6—Avalonia crust underlain by high-velocity EEC crust (a), Variscide crust underlain by lower EEC crust (b); 7— volcanic provinces (VIP, TIB1, TIB2); 8— deformation fronts: Caledonian (CDF), Variscide (VDF), Carpathian (CrDF); 9— graben boundaries; 10— magnetic sources, magnetization values, A/m; 11— projection of the lower boundary of magnetic sources to the Earth's surface; 12— seismic profiles; 13— coastline.

respond to the FSc part southeast of SNF and the central part of TIB1. The zone of increased

gradient is traced in the satellite field along the TTL to the FSS zone. The anomaly above

the LvivTrough is not reflected in the satellite field, indicating a source's core nature. The transition from the southwestern boundary of the craton to its southern boundary in the fields at high altitudes is marked by a latitudinal regional minimum. Fig. 2 also shows the field of the total gradient modulus of the anomalous magnetic field according to [Milano et al., 2019]. The absence of anomalies of the total field gradient within the WEP once again confirms its crust's weak magnetization. Large tectonic zones are clearly visible in the gradient field: Uk-BZ, FSS, and SNF and its possible southern extension, which indicates their deep origin. This segmentation of the TTL corresponds to the distribution of magnetic sources along it. From the northeast, the northwestern branch of the TTL is almost continuously accompanied by deep magnetic sources up to the FSc boundary. The northeast-trending heterogeneities of the craton Precambrian basement are at the perpendicular junction with them, indicating their different ages. In the domain bounded by the Thor-TZ and STZ, deep magnetic sources are traced sporadicallyalong both of these zones. In the southeastern branch of the TTL, the distribution of deep magnetic anomalies is different. The sources associated with the TTL are associated with



Fig. 2. Anomalous magnetic field at an altitude of 100 km, intensity scheme of the full gradient of the anomalous magnetic field, Magsat satellite field (for other symbols, see Fig. 1): 1 - Magsat anomalous magnetic field isodynes, nT; 2 - intensity isolines of the total anomalous magnetic field gradient, nT km<sup>-1</sup>.

the Subcarpathian Trough to the southwest of the TTL and are attributed to the upper and middle crust. A complex deep source in the form of a northwest-trending body is articulated with the source directly below the Lviv Trough and borders the meridional magnetic source to the west of the Uk-BZ. This zone delimits a series of deep sources associated with the TTL to the southeast.

The magnetization of the deep sources estimated from the three-dimensional modelling is 0.5-3.2 A/m. This model should be considered one of the options since the modelling assumes strict limitations on the depths of the upper crustal and deep sources. It is important to emphasize that the main epochs of crustal extension are accompanied by magmatic activity, including mafic activity. Magnetic sources can be indicators of crustal extension regimes. A number of authors have noted a Neoproterozoic extension regime along the TTZ, which contributes to the intrusion of the basement-ultrabasement rocks. The absence of deep magnetic sources along the TTL southeast of the Uk-BZ is a consequence of the predominance of compression modes in the formation and development of the TTZ.

#### References

- Gintov, O.B., Tsvetkova, T.O., Bugaenko, I.V., Zayats, L.M., & Murovska, G.V. (2022). The deep structure of the Trans-European Suture Zone (based on seismic survey and GSR data) and some insights in to its development. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(6), 63—87. https://doi. org/10.24028/gj.v44i6.273640 (in Ukrainian).
- Grad, M., Guterch, A., & Mazur, S. (2002). Seismic refraction evidence for continental structure in the central part of the Trans-European Suture Zone in Poland. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 201, 295—309. https://doi.org/10.1144/GSL.SP. 2002.201.01.14.

**Conclusions.** The results of the magnetic modelling of the TTZ region and the analysis of the anomalous magnetic field at high altitudes, including satellite imagery, allow us to draw the following conclusions: 1) The magnetization intensity of the deep sources (0.5-3.2 A/m) corresponds to their mafic-ultramafic composition; 2) Along the southwestern boundary of the FSc, the associated TTL sources are recorded almost continuously, have a perpendicular junction with the sources of the EEC itself and are dated as younger; 3) The Sm boundary is accompanied by deep bodies only in the Lviv Trough area, and no deep sources are detected southeast of the Ur-BZ; 4) The boundaries of the EEC segments follow the TTL structure, in which we have identified two branches of different strikes. They form a triple articulation with the FSS; 5) Magnetic sources confined to extension zones characterize different modes of development of different branches of the TTL. In general, the TTL fault system corresponds to a large-scale right-lateral displacement; 6) In the Earth's crustal structure, a transitional crustal type from the EEC to the WEP crust is distinguished, underlain by the lower EEC crust.

- Milano, M., Fedi, M., & Fairhead, J.D. (2019). Joint analysis of the magnetic field and total gradient intensity in central Europe. *Solid Earth*, 10, 697—712. https://doi.org/10.1029/ 2010GC003026.
- Orlyuk, M., Marchenko, A., & Bakarjieva, M. (2017). 3D magnetic model of the Earth crust of the Eastern European craton with the account of the Earths sphericity and its tectonic interpretation. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, (4), 21—26. https:// doi.org/10.17721/1728-2713.79.03.

# Магнітна модель та неоднорідність кристалічної кори південно-західної границі Східноєвропейського кратону

## І.К. Пашкевич, М.І. Орлюк, М.І. Бакаржієва, А.В. Марченко, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Представлено результати 3D магнітного моделювання кристалічної кори району лінії Тейссейре—Торнквіста (TTL) та її північно-західного розгалуження на зони Соргенфрей та Тор-Торнквіст. Виконано аналіз аномального магнітного поля за результатами наземних, аеро- та супутникових зйомок. Границі сегментів Східноєвропейського кратону підпорядковуються будові TTL, у складі якої виділено дві гілки різного простягання, вони складають потрійне зчленування з шовною зоною Фенноскандія-Сарматія. Сегментація TTL відповідає особливостям розподілу магнітних джерел уздовж TTL.

**Ключові слова:** 3D магнітне моделювання, магнітне поле, лінія Тейссейре—Торнквіста, Східноєвропейський кратон.

УДК 550.8, 553.9

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322582

# The accurate shape of salt diapir and near-salt commercial hydrocarbon pools: outcome of applying a 3D joint gravity, well-log, seismic inversion, and new paradigm for pool mapping

O.P. Petrovskyy<sup>1</sup>, T.O. Petrovska<sup>1</sup>, O.M. Onischuk<sup>1</sup>, V.M. Suyatinov<sup>1</sup>, P.M. Chepil<sup>2</sup>, 2025

> <sup>1</sup>DEPROIL, Ivano-Frankivsk, Ukraine <sup>5</sup>Naftogaz of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Limitations of the seismic method in mapping salt diapirs increase exploration risks while drilling in near-salt areas. An innovative method of 3D joint inverse problem solution for gravity, well-log, and seismic data makes it possible to verify and refine the shape of a salt dome and map hydrocarbon accumulations right beside the salt wall under the salt wing and over the salt dome. It is illustrated by the results for four salt domes in the central axial part of the Dniper-Donets Basin. In half of the cases, joint gravity inversion proved that seismic data provided a reliable salt shape that may be used as the biggest outline. In the other half of the cases, the salt stem outlined by 3D gravity inversion significantly differed from that by 2D and 3D seismic data interpretation. In one case, gravity inversion showed that the size of the salt stem was three times smaller. For all the cases under the salt wing in proximity to the salt dome, near the salt wall, and over the salt dome, localized low-density rock areas were mapped. These areas were associated with commercial

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Petrovskyy, O.P., Petrovska, T.O., Onischuk, O.M., Suyatinov, V.M., & Chepil, P.M. (2025). The accurate shape of salt diapir and near-salt commercial hydrocarbon pools: outcome of applying a 3D joint gravity, well-log, seismic inversion, and new paradigm for pool mapping/. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 129—136. https://doi. org/10.24028/gj.v47i2.322582.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

hydrocarbon pools. A commercial hydrocarbon pool is a hydrocarbon pool with porosity, permeability, hydrocarbon saturation, recoverable reserves, and a production rate that simultaneously are higher than cut-off values, making future drilling and production commercially viable. For one, the salt dome location of the commercial pools was verified by drilling. As a result, a new oil field was discovered and named after Academician Schpak. Also, over the same salt dome, the size of the Runovshina field shallow gas pool outline was six times expanded. Four wells drilling outcomes — three commercial pool with a 100 % commercial probability of success.

**Key words:** salt dome, complete Bouguer gravity anomaly, geologically meaningful 3D density model, joint inverse problems solution, isolated density anomaly, commercial hydrocarbon pool, Dnieper-Donets Basin.

Introduction. Some major hydrocarbon accumulations (hydrocarbon pools) in the Dnieper-Donets Basin (DDB) are associated with salt diapirs. Among them are Rozpashnivske (52 BCM of recoverable gas), Vedmedivske (49 BCM), Mashivske (39 BCM), and Chutivske (12 BCM) gas fields [Ivanyuta, 1998]. Many known accumulations underlie salt wings and are adjacent to salt stems. Moreover, some of them (like Rozpashnivske, Chutivske or Novoukrainske) are associated with steep near-salt blocks with hydrocarbon production within some hundred meters from the salt wall (Novoukrainske oil and gas field). Overlaying salt wings, steep orientations of salt walls and near-salt beds, velocity contrasts, and intensive faulting around the salt make seismic imaging of near-salt structures challenging and petroleum exploration highly risky.

Salts' physical properties do not favor seismic studies. Still, they are beneficial for gravity exploration, as high-amplitude density contrast between salt and host rocks contributes to the reliable reconstruction of salt shape by gravity. Recent advances in gravity interpretation [Kobrunov, Petrovskyy, 1990; Petrovsky et al., 2003; Petrovsky, 2004] utilize full-scale 3D density modelling and full-field 3D gravity inversion, constrained by seismic and well data. They allow for detailed mapping of salt shape and identification of isolated low-density areas associated with hydrocarbon accumulations in immediate proximity to salt.

**Method.** The approach quantitatively introduces initial geological and geophysical information into the inversion algorithm to get a unique, stable, and geologically meaningful solution (Fig. 1):

- All available data is used to build a detailed, initial 3D density model of the subsurface and to define major uncertainties and structural/density constraints;

- Convex functional J(.) is quantitatively introduced to the inversion algorithm. It contains the initial information and geological constraints. In the case of inversion for one geophysical field, a so-called «Inactive inverse problem solution» is used

$$\begin{cases} A(\xi(\mathbf{r})) = u(\mathbf{s}), \\ J(\xi(\mathbf{r}) - \xi_0(\mathbf{r})) \to \min, \\ \xi(\mathbf{r}) \in D(A) \subset \mathbf{W}, \\ u(s) \in Im(\mathbf{A}) \subset \mathbf{U} \\ \xi(\mathbf{r}), \xi_0(\mathbf{r}) \in M \subset D(A); \end{cases}$$
(1)

 In the case of joint inversion for two geophysical fields, a so-called «Active inverse problem solution» is used

$$\begin{cases} A(\xi(\mathbf{r})) = u(\mathbf{s}), \\ B(\eta(\mathbf{r})) = y(\mathbf{s}), \\ J(\xi(\mathbf{r}) - \eta(\mathbf{r})) \to \min, \\ \xi(\mathbf{r}) \in M \subset D(A) \subset \mathbf{W}, \\ \eta(\mathbf{r}) \in N \subset D(B) \subset \mathbf{W}; \end{cases}$$
(2)

where  $\xi(r)$ ,  $\eta(r)$  — models (density or velocity values in the heterogeneous model or depth to geological or geophysical structural surfaces in the structural model in the point  $r \in XYZ$ ); W — metric space of models; u(.), y(.) — observed geophysical fields or their functionals in the point  $s \in XYZ$ ; U, Y — metric spaces of geophysical fields; A(.):  $W \rightarrow U$ , B(.):  $W \rightarrow Y$  — in general case nonlinear operators acting from models' space W to the spaces of U, Y of geophysical fields; D(A), D(B) — domain of operators A(.), B(.) — open subspace in space W, wide enough to ensure adequate approximation of a true geological model; Im(A), Im(B) — open subspaces in spaces U, Y, wide enough to ensure adequate approximation of geophysical fields u(.), y(.); M, N — set of possible geologically meaningful models  $\xi(r)$ ,  $\eta(r)$ ; J(.):  $W \rightarrow R$  — Convex functional acting on W and containing prior geological and geophysical information as estimation of uncertainties of



Fig. 1. Fundamental scheme of 3D joint inverse problem solution for gravity, well-log, seismic, and geological data, and estimation of petrophysical and hydrocarbon production properties of commercial hydrocarbon pools.



Isohypses of reflective horizon VB<sub>2</sub> (bottom of producing horizon B-14) on B; isohypses
of density slice on C

Assumed isohypses of reflective horizon VB<sub>2</sub> at the area of absence of seismic signal
 Faults (dashed line - assumed faults on B and faults by gravity data on C), arrows are the usual and inverse faults
 Expected traps

initial properties of model;  $\xi_0(r)$  — the initial model incorporatingall available prior geological and geophysical information.

 Inversion for the entire geological column, including salt/basement/Moho interface/local density variations of the sedimentary section;

- The use of complete Bouguer (or Freeair) gravity anomaly for the inversion;

- The use of actual physical density, which



B: 1 — faults, 2 — expected oil — water contact (OWC), 3 — exploration well, 4 — seismic interfaces, 5 — stratigraphic boundaries, 6 — well testintervals, 7 — oil infliw, 8 — oil pool, 9 — expected oil pool, 10 — oil saturation by well log interpretation, 11 — water reservoir, 12 — salt

Fig. 3. Identification of the commercial oil pool under the salt wingand near the salt wall. The case for the field named after Academician Schpak: A — 3D density model conformal slice within the Lower Permian — Upper Carboniferous production layer; B — 3D density model of a vertical cross-section through the discovery wellwith results of well testing [Zeikan et al., 2013]. Salt stem size did not change significantly from the estimate by3D seismic data. Light green low-density areas mark the commercial oil pool, identified bythe 3D gravity inversion. The yellow area outlined the salt rocks of the stem. Model validity was proved by the discovery well #110.

ensures the possibility of proper model constraining during the inversion and further petrophysical conversions.

Exploration outcome. Four salt diapirs were studied in the central part of the Dnieper-Donets Basin (DDB). For detailed 3D density modeling and joint gravity inversion, high-precision gravity field measurements with  $100 \times 100$  m station spacing (1:10 000 scale) were performed for all the cases. To minimize interpolation errors when using the gravity field for joint inversion, gravity stations were placed at the centers of the rectangles that were projections of the future 3D density model's cells to day surface. 3D density models of the subsurface were built from the day surface down to 20-25 km to include salt wind and overburden, salt stem, mothersalt, and basement. The resolution of the 3D density models was  $100 \times 100$  meters laterally and varied from 50 to 20 m vertically depending on the geological tasks.

Prior sizes of the diapirs' salt stems varied from 5.6 to 19 km by seismic data (3D seismic data in three cases and 2D seismic data in one case). The distances between the three sites are between 10 and 30 km, which might be why all salt bodies have a similar expected structure. However, the results of the 3D density modeling differ significantly.

The 3D gravity inversion outcome for two salt diapirs showed significant changes in the position of the salt wall (Fig. 2). In both cases, the new commercial hydrocarbon pools were mapped in the areas identified as salt-bearing after seismic data interpretation. In one of the cases, the identified accumulations were associated with a new kind of hydrocarbon pro-



Isohypses of producing horizon I-1, on A,B and C; stratigraphic boundaries on D

- New commercial gas wells (Triassic Jurassic) & New dry hole (water production)
- New oil discovery well (Upper Carboniferous)
   Projected appraisal well (Triassic Jurassic)
- Prior drilled wells (Triassic Jurassic)

Faults

Fig. 4. Identification of the Jurassic-Triassic commercial gas pools of Runovschyna field over the salt dome: A — top of the Triassic producing horizon by 3D seismic data (by Shevchenko O.A., cited from [Svjatenko, 2018]; B — density in Triassic by the results of 3D gravity inversion, 2012. Adjacent Jurassic and Triassic producing horizons are depicted as a single low-density zone, shown in yellow; C — outline of the commercial hydrocarbon pool (yellow area) by the 3D density modeling; D — cross-section along the black line shown at B and C; E — a salt dome and the overlaying gas pool in a 3D density model by the results of gravity inversion (2012), with new drilled wells (2013); F — the shape of the Triassic-Jurassic (yellow body) and Upper Carboniferous (green body) commercial hydrocarbon pools (2012) and new wells drilled in 2013. 3D visualization of E and F performed in GCIS software [Petrovsky et al., 2003].

spective structures — displaced blocks of salt overburden — that represent new prospects for deep drilling in the DDB [Petrovska et al., 2021].

In two cases (50 %), the 3D density model confirmed the shape of salt stems. In 2012, commercial hydrocarbon pools were mapped under the salt wing in proximity to salt stems (in both cases) and over the salt dome (in one case). In 2013, four wells were drilled to test two mapped commercial pools. The oil field was named after Academician Schpak. It was discovered by one well (Fig. 3). Two commercial wells and one «dry» hole confirmed the accuracy of the shape of the mapped commercial hydrocarbon pool in the Runovscyna gas field (Fig. 4).

**Conclusion.** The four exploration cases illustrated the technique's efficiency in obtaining geologically meaningful 3D density

models by deterministic joint 3D inversion of gravity, well-log, seismic, and petrophysical data to map the 3D shape of salt diapirs. In 50 % of cases, gravity inversion proved that seismic data provided reliable salt shapes that may be used as the biggest outlines. However, in the other 50 % of cases, the size of the salt stem was much smaller than previously expected from only the seismic data. In one case, gravity inversion showed that the size of the salt stem was three times smaller. An additional value of the innovative technol-

#### References

- Ivanyuta, M.M., Fedyshyn, V.O., Denega, B.I., Arsiriy, Y.O., & Lazaruk, Y.G. (Eds.). (1998). Atlas of oil and gas fields of Ukraine in Six volumes. Vol. III. Ukrainian Oil and Gas Academy (pp. 932—958, 986—992). Lviv (in Ukrainian and English).
- Kobrunov, O.I., & Petrovskyy, O.P. (1990). Iteration scheme of gravity inversion. *Reports of the Academy of Science of the USSR*, (2), 13—16 (in Russian).
- Petrovsky, A.P. (2004). Information support and model concepts of integral interpretation of geological and geophysical data during exploration. *Geophysical Journal*, *26*(3), 77—86 (in Russian).
- Petrovska, T.O., Petrovskyy, O.P., Tsihovska, O.M., & Trachuk, A.Ju. (2021). Carapaces of the Dnieper-Donets Basin as a New Exploration Target. SPE Eastern Europe Subsurface Conference, Kyiv, Ukraine, 23—24 Nov 2021. https:// doi.org/10.2118/208538-MS.

ogy was the accurate prediction of the shape and properties of new commercial hydrocarbon pools near the salt wall, under the salt wing, and over the salt dome and caprock, including the areas assumed as salt by seismic data. The license owner drilled four new wells around the diapir studied. The drilling outcome confirmed the 3D model's accuracy and evidenced the method's efficiency for derisking deep drilling by increasing the probability of successfully mapping the commercial pools up to 100 %.

- Petrovsky, O.P., Kobrunov, O.I., Gangenko, N.S., & Sujatinov, V.M. (2003). Automated system of quantitative complex interpretation of geophysical data GCIS as the basis of the Technology of integral interpretation of geological and geophysical information in oil and gas exploration. *Geoinformatyka*, (2), 25–34 (in Ukrainian).
- Svjatenko, G.Ye. (2018). Features of geological structure and oil and gas potential of Mesozoic of the Dniper-Donets basin. *PhD thesis*. Kyiv, 247 p. (in Ukrainian).
- Zeikan, O.Yu., Hladun, V.V., Maksymchuk, P. Ya., Chepil, P.M., Dudnikov, M.S., Husachenko, V.O., Dovzhok, T.Ye., Vakarchuk, S.G., Kharchenko, M.V., Stryzhak, V.P., & Shevchenko, O.A. (2013). The first oil field discovered by the National Joint-Stock Company «Naftogaz of Ukraine» in the Dnieper-Donetsk Depression. *Geological Journal*, (3), 26—32 (in Ukrainian).

# Визначення точної форми соляного діапіру та навколо-соляних покладів вуглеводнів: результат спільної 3D інверсії гравіметричних, свердловинних і сейсмічних даних та нової парадигми картування комерційних покладів вуглеводнів

О.П. Петровський<sup>1</sup>, Т.О. Петровська<sup>1</sup>, О.М. Оніщук<sup>1</sup>, В.М. Суятинов<sup>1</sup>, П.М. Чепіль<sup>2</sup>, 2025

> <sup>1</sup>DEPROIL, Івано-Франківськ, Україна <sup>2</sup>НАК «Нафтогаз України», Київ, Україна

Обмеження сейсмічного методу при картографуванні соляних діапірів збільшують ризики під час буріння довкола соляних штоків. Інноваційний метод тривимірного спільного вирішення оберненої задачі для даних гравіметрії, каротажу свердловин і сейсмічних даних дає можливість перевірити й уточнити форму соляного купола та закартувати скупчення вуглеводнів безпосередньо біля стінки соляного штоку, під соляним козирком і над соляним куполом. Це проілюстровано результатами для чотирьох соляних куполів у центральній осьовій частині Дніпровсько-Донецької западини. У половині випадків спільна гравітаційна інверсія довела, що сейсмічні дані забезпечили надійну форму солі, яку можна використовувати як найбільший контур. В іншій половині випадків соляний шток, закартований за допомогою 3D гравітаційної інверсії, суттєво відрізнявся від інтерпретації 2D та 3D сейсмічних даних. В одному випадку гравітаційна інверсія показала, що розмір соляного штоку був утричі меншим. Для всіх випадків під соляним козирком поблизу соляного купола, біля стінки соляного штоку та над соляним куполом були закартовані локалізовані ділянки порід низької густини. Ці ділянки були пов'язані з комерційними покладами вуглеводнів. Комерційний поклад вуглеводнів — це поклад вуглеводнів, в якому пористість, проникність, вуглеводневе насичення, видобувні запаси та початковий дебіт одночасно перевищують граничні значення, що робить майбутнє буріння та видобуток комерційно рентабельними. Для одного з соляних штоків розташування комерційних покладів було підтверджено бурінням, унаслідок чого було відкрито нове родовище нафти, якому присвоєно ім'я академіка Шпака. Крім того, над тим же соляним куполом у шість разів збільшено розмір контуру неглибокого газового покладу Руновшинського родовища. Результати буріння чотирьох свердловин трьох промислових і однієї сухої — повністю підтверджують правильність форми закартованого промислового покладу зі 100%-ю ймовірністю комерційного успіху.

Ключові слова: соляний купол, повна гравітаційна аномалія Буге, геологічнозмістовна 3D модель густини, спільний розв'язок обернених задач, ізольована густинна аномалія, комерційний поклад вуглеводнів, Дніпровсько-Донецька западина.

УДК 550.385

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322473

## Magnitude of the anomalous geomagnetic fields

## I.I. Rokityansky, A.V. Tereshyn, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The normalized amplitudes of the anomalous geomagnetic field variations (presented by tipper **C**) with period *T*>200 s arising around electrical conductivity anomalies have been considered. **C**>1 means that the secondary (induced) field is greater than the primary (inducing) one. Worldwide, the mean observed tippers are **C**=0.3 for coastal observatories and **C**=0.15 for inland ones. The maximum tippers are 1.5 for coastal and **C**=1.6 for inland observatories. Modeling realistic anomalies with uniform conductivity yields **C** up to 2.5. The larger **C** can arise in a non-uniform conductor due to the superchanneling effect.

**Key words:** electrical conductivity anomaly, normalized anomalous field, inductive anomaly, conductive anomaly, superchanneling.

Citation: Rokityansky, I.I., & Tereshyn, A.V. (2025). Magnitude of the anomalous geomagnetic fields. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 136—141. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322473.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

**Introduction**. Alternating EM fields used in deep geoelectrics and observed at the Earth's surface are induced by the currents in the ionosphere and magnetosphere. The lower atmosphere is assumed to be non-conductive. Therefore, the induced fields have a transverse-electric structure, i.e., electric fields and currents do not have a vertical component inside the horizontally-layered Earth.

Observations reveal anomalous behavior of geomagnetic variations in some areas. It can be explained only by electrical conductivity anomalies. In the middle of the 20th century, such anomalies were discovered in different parts of the world. Their normalized amplitudes were not expected to exceed 1 because the secondary (induced) field cannot be greater than the primary (inducing) one. This conclusion would be correct if the rocks enclosing an anomalous conductor were insulators, as was believed at that time. However, during the International Geophysical Year, a normalized anomalous horizontal field  $b_r$  greater than 2 and a vertical field  $b_r$ of magnitude 1.5 were measured at the Alert observatory and around it. Dyke and Garland (see reference in [Praus et al., 1971]) performed physical modeling, which showed that the main effect in the observed field was due to conductive redistribution of the regional currents in the enclosing medium rather than local electromagnetic induction.

**Theory.** Rokityansky [1982] showed that the conductive-type anomalous fields almost always prevail over the fields of local induction. A quantitative theory was created to describe it. The theory is based on an analytical solution for a cylinder presented as an infinite series with the first term proportional to the applied electric field  $E_0$  (it forms a conductive-type anomaly) and the second one proportional to the magnetic field  $B_0$  (it describes an inductive-type anomaly). Let us write them in a rectangular coordinate system with the center on the cylinder axis (Fig. 1).

$$\begin{cases} B_{xa} \\ B_{ya} \\ B_{za} \end{cases} = -\mu E_0 \sigma_i V \left( k_i a, \frac{\sigma_i}{\sigma_e} \right) \frac{a^2}{2r} \begin{cases} \cos \varphi \\ 0 \\ \sin \varphi \end{cases} -$$

$$-B_0 D(k_i a) \frac{a^2}{r^2} \begin{cases} \cos \varphi \\ 0 \\ \sin \varphi \end{cases}.$$
 (1)

Since the cylinder is a 2D anomaly, and we study the anomalous fields in the geomagnetic components, let us consider only the E-polarization case. The electric field  $E_0$ is formed by the large-scale regional external sources directed along the anomalous cylinder y axis. The primary normal magnetic field  $B_0$  is formed by external and internal (induced in a horizontally layered Earth) currents along the *x* axis.



Fig. 1. Formation of the anomalous fields around a circular cylinder: a — profile graphs, b — anomalous field decomposition into  $b_x$  and  $b_z$  components.

In Eq. 1, *a* is the cylinder's radius,  $\sigma_i$  and  $\sigma_e$  — electrical conductivity of the cylinder and the enclosing medium,  $k_i = (i\omega\mu\sigma_i)^{1/2}$ ,  $\mu$  — magnetic permeability,  $\omega = 2\pi/T$ , *T* — period,  $r = (x^2 + z^2)^{1/2}$  — the distance at which the anomalous field  $B_a$  is studied. The angle  $\varphi$  is measured from the direction of the vertical axis *z*. *D* is the decreasing (from 1 to 0) function of the period.

Normalizing the anomalous fields to the normal field  $B_{0x'}$  we obtain non-dimensional anomalous fields  $b_x$  and  $b_{z'}$  which we present only for the conductive-type anomaly in the form

$$\begin{cases} b_x \\ b_z \end{cases} = A(r)V(T)\zeta(T) \begin{cases} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{cases}, \qquad (2)$$

 $A=\mu\sigma_i a^2/2r$  depends on geometric factors.

*V* is an increasing function of the period describing the degree of filling of the conductor with the anomalous currents. At  $T\rightarrow 0$ , the skin-effect does not allow the current to penetrate the conductor and  $V\rightarrow 0$ . At  $T\rightarrow\infty$  the anomalous currents fill the entire conductor and  $V\rightarrow 1-\rho_i/\rho_e$ .

 $\zeta = E_{0y}/B_{0x}$  is the impedance of 1D (horizontally or spherically) layered enclosing medium. It is a decreasing function of the period.

The product of the increasing and decreasing functions has a maximum at some period  $T_0$ .  $T_0$  depends on the parameters of the anomaly (*V*) and the enclosing medium ( $\zeta$ ).

Numerous calculations for the deep crustal conductors and the seawater of different depth and configurations show (Fig. 2) that the  $T_0$  position is closely related to the total lengthwise conductance of the anomaly  $G[S \cdot m] = Q \cdot s_i$  (Q is the cross-section area) by the equation  $G[S \cdot m] = 5 \cdot 10^4 |T_0[s]|^{1.2}$ . This dependence is also presented in Fig. 3. The upper red line is obtained from calculations of the deep crustal models. The lower blue line is obtained from the sea models using only the tipper data. The difference between the two lines does not exceed the uncertainties of their determination.

**Results of measurements**. We processed the geomagnetic field recorded in 137 worldwide distributed observatories of the INTER-



Fig. 2. Induction arrows frequency characteristics on the coast of the h m deep rectangular sea.



Fig. 3. The relationship between conductance G and period  $T_0$  at which the anomalous field reaches maximum.

MAGNET network (https://www.intermagnet.org) and 14 Japanese ones from 1991 to 2014. We obtained the induction arrows for the periods 150—3600 s (Fig. 4).

The distribution of the induction arrows' magnitude differ for the coastal and inland observatories. So, the median magnitude is 0.3 for the coastal observatories and 0.15 for inland ones. The largest magnitudes are observed at the coastal observatories opposite deep seawater: DRV (Antarctica) C=1.5, STJ, (Newfoundland) C=1.3, ALB (SW Australia) C=1.3, NAQ (S Greenland) C=1, HER (S Africa) **C**=1, and KOU (NE South America) C=0.9. At all the rest of the INTERMAGNET observatories, the magnitude was less than 0.8. However, inland, many short-term field observations are performed, and some have found strong anomalies. The largest induction arrow C=1.6 was registered at site PYAT [Rokityansky, Tereshyn, 2022] on the Donbas anomaly in eastern Ukraine. A slightly less C=1.5 was found at Cape Mary Cleverly [Praus et al., 1971] on the Alert anomaly in northeast Canada.



Fig. 4. The real  $C_u$  and imaginary  $C_v$  induction arrows for the period 3000 s (40–60 min) in 137 INTERMAGNET and 14 Japanese observatories. Geomagnetic poles for 2010 are marked by the 5-ray stars.

A sensational article in the EPS journal [Xu et al., 2023] reported induction arrows with magnitude C > 3 in 3 sites in SW China. The authors' 3D model yields C > 3. They concluded that their modeling supports high magnitudes obtained in the field.

Discussion. We checked the model in [Xu et al., 2023], and it turned out that instead of the real upper mantle with rapidly increasing electrical conductivity, a half-space with a high resistance of 10,000 Ohm·m was used. This is strange because among the authors of the work [Xu et al., 2023] was Kuvshinov, who carried out the most accurate determinations of the electrical conductivity growth in the upper mantle. We performed the same modeling with half-space and real well-conducting mantle based on [Kuvshinov et al., 2021] and obtained C=3.2 and 1.2 respectively. Only the second result corresponds to the real Earth. We thought about how to explain such large anomalous fields and concluded that they could arise in an elongated conductor with a non-uniform cross-section Qalong its strike.

These calculations and recommendations for the authors to check the measurements

were compiled as comments and sent to the EPS Editor. Reviewers approved them but recommended making some clarifications and improving the English language. We did all this and waited two months for the comment to be published. However, we received another review with guite new critical requirements. We understood that our comments would be rejected. In January 2025, our colleague who worked in China informed us that «enormously large tippers» were obtained by mistake; in fact, they are significantly lower, and the EPS has been waiting for months for an explanation from the Chinese authors. We understood why our comments were rejected.

Wider discussion. Frequency characteristics of the tipper from conductors with different cross-section areas are presented in Fig. 2. With increasing sea depth, G and  $T_0$  also increase. However, why does the tipper's magnitude at  $T_0$  and shorter periods becomes smaller the larger the conductor and its  $T_0$ ? This occurs because, at longer periods, the influence of the deep conductivity of the mantle becomes stronger.

Our processing yields anomalous fields

in a narrow range of periods (150—3600 s). As shown in Fig. 2, frequency characteristics occupy more than three orders in the period scale. Therefore, our observations at 3000 s definitely must be sensitive to the anomalies with  $T_0$  up to 30,000 s. However, neither our INTERMAGNET processing results nor any others measurements on long periods detected any anomaly with a period  $T_0$  greater than 5000 s. According to Fig. 3, it means that anomalies with a lengthwise conductance  $G>2\cdot10^9$  S·m are not found. It is an important geophysical result. It is shown on the right side of Fig. 3.

Are there any structures of electrical conductivity in/near which the tipper will exceed 3, given the Earth's well-conducting upper mantle? We calculated and analyzed many 2D models. Fig. 2 presents the largest tippers for maximum  $C_u$  (at a distance  $\approx h$  from the coast) obtained for an idealized sea cross-section with a *rectangular* shape. These modeled maximum magnitudes **C** are 2—2.5 for the studied periods *T*>200 s, which are 1.5-fold larger than the maximum observed **C** (1.5—1.6).

So, **C** cannot exceed 2—2.5 in the anomalous bodies with uniform conductivity and 2D or, especially, limited length structure.

#### References

- Kuvshinov, A., Grayver, A., Töfner-Clausen, L., & Olsen, N. (2021). Probing 3-D electrical conductivity of the mantle using 6 years of Swarm, CryoSat-2 and observatory magnetic data and exploiting matrix *Q*-responses approach. *Earth, Planets and Space, 73*(67) https://doi. org/10.1186/s40623-020-01341-9.
- Praus, O., De Laurier, J.M., & Law, L.K. (1971). The extension of the Alert geomagnetic anomaly through Northern Ellesmere Island, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(50), 50—64. https://doi.org/10.1139/e71-003.

Rokityansky, I.I. (1982) Geoelectromagnetic in-

However, this is possible in a long conductor with a varying cross-section area Q in the places where *Q* is minimal. In these places the 3D phenomenon of superchanneling occurs. It was considered qualitatively in [Rokityansky 1982, p. 224-229]. A special 3D modeling investigation should be done for a quantitative description of superchanneling effect. To our knowledge, such an investigation has not been described anywhere (although many thousands of 3D-models have been made for specific structures interpretation, only a few computations have been performed to study the regularities of the electromagnetic field) and represents a challenge for 3D modeling.

**Conclusions**. The frequency characteristic maximum  $T_0$  of all known electrical conductivity anomalies is less than 5000 s, imposing a limit on its lengthwise conductance G.

The median tipper magnitude is C=0.3 for coastal observatories and C=0.15 for inland ones. The maximal is C=1.6 for inland and 1.5 for coastal observatories.

Model calculations over uniform conductivity anomalies yield **C** up to 2.5. The larger **C** can arise in a lengthwise non-uniform conductor due to the superchanneling effect.

vestigation of the Earth's crust and upper mantle. Berlin-Heidelberg-New York: Springer Verlag, 381 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61801-7.

- Rokityansky, I.I., & Tereshyn, A.V. (2022). Donbas geoelectrical structure. *Geofizychnyi Zhurnal*, 44(1), 158—172. https://doi.org/10.24028/gzh. v44i1.253717.
- Xu, S., Chen, C., Kruglyakov, M., Kuvshinov, A., Rigaud, R., & Hu, X. (2023). Enormously large tippers observed in southwest China: can realistic 3-D EM modeling reproduce them? *Earth, Planets and Space*, 75, 109. https://doi. org/10.1186/s40623-023-01863-y.
### Величина аномальних геомагнітних полів

#### I.I. Рокитянський, А.В. Терешин, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Розглянуто нормалізовані амплітуди варіацій аномального геомагнітного поля (представлені типпером **C**) з періодом *T*>200 с, що виникають навколо аномалій електропровідності. **C**>1 означає, що вторинне (індуковане) поле перевищує первинне (індукуюче) поле. У всьому світі спостережувані середні значення типперів становлять: **C**=0,3 для прибережних обсерваторій і **C**=0,15 для континентальних. Максимальні значення: **C**=1,6 для континентальних і 1,5 для прибережних обсерваторій. Під час моделювання реалістичних аномалій із однорідною провідністю отримано значення **C** до 2,5. Більші значення **C** можуть виникати у випадку неоднорідного провідника через ефект суперканалювання.

**Ключові слова:** аномалія електропровідності, нормоване аномальне поле, індуктивна аномалія, кондуктивна аномалія, суперканалювання.

УДК 550.382.3:550.382.8

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322474

# Magnetization of the lithosphere and the upper mantle based on magnetic-mineralogical data

## O. Ye. Shestopalova<sup>1</sup>, V. V. Drukarenko<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine <sup>2</sup>PJSC «Ukrnafta», Kyiv, Ukraine

According to numerous studies, sources of magnetic anomalies in the lithosphere and mantle can have a magnetic-mineralogical nature due to magnetic minerals at mantle depths. The minerals include native iron, which can be brought up from significant depths by mantle melts or formed under the influence of reducing fluids. Mantle plumes play a leading role in these processes as conduits of matter (and energy) from the Earth's outer core to its surface, according to some authors. Metallic iron has been identified in oceanic basalts, traps, and hyperbasites. In subduction zones, the magnetization and increased magnetic susceptibility of lithospheric plates can persist at mantle depths for a long time due to the Hopkinson effect, with the highest value observed for pure native iron. Phase transitions of magnetite, hematite, native iron, and iron-cobalt alloy can occur at mantle depths ranging from 25 to 700 km depending on their Curie temperatures under different thermodynamic regimes of hot and cold lithospheric plates.

Key words: mantle, magnetization, lithosphere, native iron, magnetic minerals.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Shestopalova, O.Ye., & Drukarenko, V.V. (2025). Magnetization of the lithosphere and the upper mantle based on magnetic-mineralogical data. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 141—145. https://doi.org/10.24028/gj. v47i2. 322474.

Introduction. Magnetic anomalies of large tectonic structures have wavelengths of several thousand kilometers. Analysis of the induction module of the Earth's Main Magnetic Field (IGRF-12) allowed us to identify its «core» (related to the Earth's core) and «crust-mantle» (lithospheric) components [Orlyuk et al., 2017]. The latter has intermediate wavelengths (between the core and crust anomalies) of 2500-4000 km and suggests sources at mantle depths. More than fifteen stable anomalies have been identified on the Earth's surface. Given the constancy of these anomalies' locations and the slight temporal changes in their intensity, a magneto-mineralogical nature of the sources may be preferred over a current-induced origin.

Discussion. Potential sources of uppermantle magnetic anomalies may include iron oxides, particularly hematite (α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Curie temperature  $T_c$ =700 °C), which is the dominant oxide in subduction zones at depths of 300 to 600 km, magnetite  $Fe_3O_4$  ( $T_c=585$  °C), native iron  $\alpha$ -Fe ( $T_c$ =760 °C), iron-cobalt alloy ( $T_c$ =1121 °C), and iron alloys with nickel and copper formed under highly reducing conditions. The transformation of iron minerals can occur due to reactions of reducing fluids with various iron compounds and rocks according to the generalized scheme:  $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$ . Changes in the magnetic properties of these minerals may be the reason for contemporary temporal changes in the long-wavelength magnetic anomalies [Orlyuk et al., 2020].

Transformations of magnetic minerals can occur in specific tectonic zones of the Earth's upper mantle, particularly at the junctions of different types of lithospheric slabs, rifts, plumes, and zones of tectono-thermal activation, etc. [Ferré et al., 2014, etc.]. Experimental studies have shown that in zones of lithospheric plates' subduction to mantle depths, their magnetization can be preserved for a long time, and an increase in magnetic susceptibility can be observed due to the Hopkinson effect [Kupenko et al., 2019] near the Curie temperature of magnetic minerals. Magnetic areas of the upper mantle are characterized by temperatures below the Curie temperature of magnetite (for example, in subduction zones, cratons, and areas with ancient oceanic lithosphere). Naturally, pure native iron is characterized by the highest values of the Hopkinson effect.

According to the thermodynamic regime of hot and cold lithospheric plates, the Hopkinson effect in subduction areas can manifest at significantly different depths for the iron-containing substances, depending on their Curie temperatures. In particular, the minerals can undergo phase transitions at mantle depths ranging from 25 to 700 km. They may coincide with the depths of phase transitions of crust-mantle material [Orlyuk et al., 2020]: plagioclase lherzolite to pyroxene (25—40 km); pyroxene to garnet (85—100 km); recrystallization of olivine to the spinel phase (400—420 km); decomposition of silicates into simple oxides (650—690 km).

Studies by [Ishii et al., 2019] showed the lower boundary of the upper mantle at a depth of 660 km to be determined by the reaction ringwoodite — ferropericlase+bridgmanite, which is considered a result of the post-spinel transition. The seismic discontinuity occurs within only 2 km, corresponding to a pressure difference of just 0.1 GPa. The obtained results can explain this sharp boundary, and it should be assumed that the distribution of adiabatic vertical flows between the upper and lower mantle can be reflected based on the sharpness of this boundary.

The study of mineral inclusions in superdeep diamonds showed [Kvasnytsa, 2018] that, depending on the composition of the initial substrate, silicates of the upper mantle and transition zone in the lower mantle transform into two mineral associations: juvenile ultramafic (bridgmanite, CaSi-perovskite, ferropericlase) and mafic (bridgmanite, Ca-Si-perovskite, SiO<sub>2</sub>, and Al-phases). The Fe content of the ultramafic mineral association increases with depth, reflecting an increase of iron in the bulk composition of the lower mantle in general [Kaminsky, 2017]. The mafic mineral association is likely formed locally during the recrystallization of subducted lithospheric plates.

According to existing hypotheses [Shes-

topalov et al., 2018, etc.], the iron in erupted rocks (basalts and hyperbasalts) is brought up from significant depths by mantle plumes that rise from the core-mantle boundary and reach the base of the lithosphere, carrying basic composition melts. Alternatively, it is formed (reduced) in magma under the influence of reducing fluids - hydrogen, carbon, or organic matter, captured by the melts during intrusion. Thus, reducing fluids are derivatives of the deepest horizons of the geosphere (outer core — «D» layer — lower mantle). Mantle plumes lead in degassing processes, acting as conduits of matter (and energy) from the Earth's outer core to its surface and determining the location of the largest metallogenic and oil and gas provinces.

According to seismic tomography [Shestopalov et al., 2018], the uneven distribution of heated zones and flows (plumes) of coremantle material in the mantle (up to the core boundary) is postulated. These are located at different levels, including reaching the lithosphere. The roots of the plumes are in the liquid core, and their main sources are associated with the «D» layer. The global processes of heat accumulation in the «D» layer are superimposed by ascending hydrogen flows, occluding in practically unlimited quantities by the solid iron-nickel core (with impurities of other metals). A complex chemical composition of the «D» layer is assumed, in which the entire periodic table is present against the background of the predominance of Fe, C, Si, and S, including the incoherent elements. Indicators of the regime of deep degassing processes of the Earth and the composition of superdeep fluids propose the allocation of a new genetic type of natural mineral formation, the so-called prigozhinites, which can form, among other things, in the zones of crushing of crystalline rocks.

[Pecherskiy, 2016] determined that particles of metallic iron are present in xenoliths of upper mantle hyperbasites, oceanic basalts, and trap formation basalts. Most particles have the same shape regardless of origin, indicating uniform primary magmatic conditions for their formation. The global distribution of native iron without nickel impurities but with silicon, aluminum, and magnesium impurities is associated with upper mantle and crustal rocks. The main contribution to the magnetization of hyperbasites is made by iron-containing paramagnetic minerals, such as olivine and pyroxene. The Curie temperature of iron was obtained for 14 samples out of 50, with a concentration of 0.0001—0.0003 %. In trap-formation rocks, metallic iron is present in subintrusive bodies. Its concentration varies from 0.0001 to 0.0055 %. The distribution of Curie points is similar to their distribution in hyperbasites and ranges from 705—775 °C, with a maximum in the range of



765—775 °C. The distribution of metallic iron in oceanic basalts does not differ from other terrestrial rocks; however, iron particles form before the lava eruption under conditions like those for hyperbasites and traps. Metallic iron was identified in half of the samples studied with a 0.0002—0.0018 % concentration. An increase in the number of samples with a Curie temperature ( $T_c$ ) from 700 to 770 °C and a maximum within the range of pure iron is observed. Pure iron in oceanic basalt samples was identified in 31 % of cases, in traps — 36 %, and in hyperbasites — 75 % (Figure).

By the precise mineralogical studies of foreign authors, rims of other iron-containing minerals are often observed around grains of native iron. For example, iron droplets from Ovifak (Greenland) have ilmenite shells. In Mellemfjord (Disko Island), complex structures of iron growth with magnetite are known [Shestopalova, Drukarenko, 2024]. In gabbro-dolerites (Siberian Traps), grains of native iron have several different shells; this indicates frequent changes in the geochemi-

#### References

- Ferré, E.C., Friedman, S.A, Martín-Hernández, F., Feinberg, J.M., Till, J.L., Ionov, D.A., & Conder, J.A. (2014). Eight good reasons why the uppermost mantle could be magnetic. *Tectonophysics*, 624–625, 3–14. https://doi. org/10.1016/j.tecto.2014.01.004.
- Ishii, T., Huang, R., Myhill, R., Fei, H., Koemets, I., Liu, Z., & Katsura, T. (2019). Sharp 660-km discontinuity controlled by extremely narrow binary post-spinel transition. *Nature Geoscience*, 12(10), 1—4. https://doi.org/10.1038/ s41561-019-0452-1.
- Kaminsky, F.V. (2017). *The Earth's Lower Mantle: Composition and Structure*. Springer, 340 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55684-0.
- Kupenko, I., Aprilis, G., Vasiukov, D. M., Mc-Cammon, C., Chariton, S., Cerantola, V., & Sanchez-Valle, C. (2019). Magnetism in cold subducting slabs at mantle transition zone depths. *Nature*, 570, 102–106. https://doi. org/10.1038/s41586-019-1254-8.
- Kvasnytsya, V.M. (2018). The Diamond Window to the Earth's Lower Mantle (Comment on the Book by Felix V. Kaminsky The Earth's Lower

cal environment of mineral formation. In our opinion, this is highly relevant in studying ore minerals and requires further studies using precise research methods.

Conclusions. 1. Sources of magnetic anomalies in the lithosphere and mantle can have a magnetic-mineralogical nature due to magnetic minerals at mantle depths, including native iron. Native iron can be brought up from significant depths by mantle melts or formed under the influence of reducing fluids. Mantle plumes lead in these processes as conduits of matter (and energy) from the Earth's outer core to its surface. 2. In subduction zones, the magnetization and increased magnetic susceptibility of lithospheric plates can persist at mantle depths for a long time due to the Hopkinson effect, with the highest values observed for pure native iron. 3. Metallic iron is present in oceanic basalts, traps, and hyperbasites. 4. Native iron often has shells of other iron-containing minerals reguiring precise research methods for further study.

Mantle. Composition and Structure). *Mineralogical Journal*, 40(1), 93—98 (in Ukrainian).

- Orlyuk, M.I., Marchenko, A.V., & Romenets, A.A. (2017). Spatial-temporal changes in the geomagnetic field and seismisity. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 39(6), 84—105. https:// doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i6.2017. 116371 (in Russian).
- Orlyuk, O., Drukarenko, V., & Shestopalova, O. (2020). Magneto-mineralogical grounds of the Earth's upper mantle magnetization. Overview. *Geodynamics*, (2), 89—96. https://doi. org/10.23939/jgd2020.02.089 (in Ukrainian).
- Pecherskiy, D.M. (2016). Occurrence of metal iron inside the planets. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 38(5), 13—24. https://doi.org/10.24028/ gzh.0203-3100.v38i5.2016.107817 (in Russian).
- Shestopalov, V.M., Lukin, O.Yu., Zgonnik, V.O., Makarenko, O.M., Larin, N.V., & Boguslavskyi, O.S. (2018). Essays on Earth Degassing. Scientific and Engineering Center for Radiohydrogeoecological Polygonal Research. Kyiv: Publ. Institute of Geological Sciences, 632 p. (in Ukrainian).

Shestopalova, O., & Drukarenko, V. (2024). Gen-

eral information about natural iron according to published sources. *Geological structure and history of the geological development of the Ukrainian shield (to the 100<sup>th</sup> anniversary of the birth of Academician of*  the National Academy of Sciences of Ukraine M.P. Shcherbak). Collection of materials of the scientific conference, Kyiv, September 17— 18, 2024 (pp. 183—186). https://doi.org/10. 30836/gbhgd.2024.37 (in Ukrainian).

## Намагніченість літосфери та верхньої мантії за магнітно-мінералогічними даними

### О.Є. Шестопалова<sup>1</sup>, В.В. Друкаренко<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна <sup>2</sup>ПАТ «Укрнафта», Київ, Україна

Згідно з численними дослідженнями джерела магнітних аномалій літосфери та мантії можуть мати магнітно-мінералогічну природу за рахунок існування на мантійних глибинах магнітних мінералів, зокрема самородного заліза, яке може виноситися зі значних глибин мантійними розплавами або утворюватися під дією відновлювальних флюїдів. Мантійні плюми як провідники речовини (та енергії) від зовнішнього ядра Землі до її поверхні відіграють провідну роль у цих процесах на думку деяких авторів. Присутність металічного заліза визначено у зразках океанічних базальтів, трапах і гіпербазитах. У місцях занурення літосферних плит на мантійних глибинах тривалий час може зберігатися їх намагніченість, а також може спостерігатися підвищення магнітної сприйнятливості за рахунок ефекту Гопкінсона з максимальними величинами цього ефекту для чистого самородного заліза. За різних термодинамічних режимів гарячих і холодних літосферних плит фазові переходи магнетиту, гематиту, самородного заліза та сплаву заліза та кобальту залежно від їх температур Кюрі можуть відбуватися на мантійних глибинах в інтервалі 25—700 км.

**Ключові слова:** мантія, намагніченість, літосфера, самородне залізо, магнітні мінерали.

УДК 550.3+519.2

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322475

# Application of cluster analysis to the study of spatial patterns of earthquakes in Azerbaijan and adjacent territories

S.I. Skurativskyi<sup>1</sup>, S.V. Mykulyak<sup>1</sup>, Yu.V. Semenova<sup>1</sup>, K.S. Skurativska<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine <sup>2</sup>University of Padova, Padova, Italy

Based on the data of the earthquake catalog in Azerbaijan and adjacent areas from 2010 to 2023, a procedure for dividing earthquakes into clusters was developed using the DBSCAN algorithm for Python. In the process of dividing into clusters, a number

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Skurativskyi, S.I., Mykulyak, S.V., Semenova, Yu.V., & Skurativska, K.S. (2025). Application of cluster analysis to the study of spatial patterns of earthquakes in Azerbaijan and adjacent territories. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 145—150. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322475.

of indicators were used that allowed optimizing the number of clusters and the number of earthquakes in the clusters. A comparison of the location of earthquake clusters with tectonic faults in this region demonstrated their high correlation.

Key words: earthquake, Azerbaijan, clustering, DBSCAN algorithm, network of faults.

Introduction. Studying the patterns of earthquake location and their periodicity and intensity is an urgent task given the danger and consequences that earthquakes cause to people, buildings, structures, and various infrastructure facilities. This knowledge is important for understanding how earthquakes occur and is also an integral part of the theoretical basis for seismic hazard assessment methods [Scitovski, 2018]. It is well known that earthquakes happen in areas located on the boundaries of tectonic plates and faults [Scholz, 2019]. These areas should be considered as complex systems, and such an approach to their study has recently become quite widespread. The dynamic behavior of complex systems is described by statistical methods. Many models and approaches to studying dynamic processes in complex systems have been developed [Holovatch et al., 2017]. One of the most rapidly developing methods is the cluster analysis method, which allows one to group data of seismic observations algorithmically, reducing the procedure's subjective [Georgoulas et al., 2013] component.

**Objects and Methodology.** In this research, we deal with earthquakes in the Caucasus region characterized by strong seismicity [Tsereteli et al., 2016; Semenova et al., 2024]. In particular, we consider the spatial patterns of earthquakes in Azerbaijan and adjacent areas from 2010 to 2023. The earthquake catalog is clustered using the DBSCAN algorithm [Scitovski, 2018]. The Silhouette index is used for quality control as it provides the optimal number of clusters. The clustering result is not unique, so a similarity index, i.e. the Adjusted Rand Index (ARI), is used to compare different partitions.

**Results and discussion.** Using the catalog [ISC, 2024], the set of earthquakes containing 6201 readings is extracted. We will use a seismic event's latitude, longitude, and depth. To

get better results, it is recommended to that the data be pre-processed. To do this, we scale not all variables but only the depth according to the relation  $Z_j = z_j / \sum_i |z_j|$ . The number of earthquakes with a magnitude greater than 5.5 was also extracted from the catalog. The epicenters of earthquakes are located between  $38^{\circ}$  and  $42^{\circ}$  N and  $45^{\circ}$  and  $50^{\circ}$  E. The spatial patterns of the selected earthquakes are shown in Fig. 1, *a*, where the earthquake depth is marked in color. For the cluster analysis, we use the DBSCAN algorithm. It is a density-based procedure governed by two intrinsic parameters —  $\varepsilon$  and *min samples*. This algorithm does not require the pre-definition of several clusters and can identify clusters of arbitrary shapes. This is especially important for seismic analysis. The result of DBSCAN's work is the set of clusters accompanied by a set of unclassified points (noise points). The cluster testing procedure is implemented using the sklearn.cluster in Python.

Thus, selecting the parameter  $\varepsilon$  from the range (0.1; 1.1) with a step of 0.1 and the parameter min samples from the range (25; 151) with a step of 10, we evaluate different partitions of the catalog into clusters. A validation index was applied to roughly evaluate the clustering results. Among many indices, we choose the Silhouette Index (SI), which approaches maximum when all clusters are well separated and dense enough. It varies from -1 (poorly classified elements) to 1 (perfect clustering). According to the dependence of SI on the number of clusters (Fig. 1, b), SI grows for the small number of clusters, achieves its local maximum at 5 clusters, and then decreases. Note that the same number of clusters can be evaluated for different parameters and min\_samples.

Omitting the cases of the small number of clusters, let us consider the partitions with 5—8 clusters in more detail. The DBSCAN's parameters for themare written in Table.



Fig. 1. The distribution of the earthquake epicenters in the selected region (*a*). The color bar marks the depth of earthquakes from 0.1 km (dark color) to 90 km (light color) (*b*). The dependence of *SI* on the number of clusters. Here, lb\_88 and lb\_81 mark the clustering cases.

The parameters of the DBSCAN algorithm

Ν	5 (lb_88)	6 (lb_74)	7 (lb_62)	8 (lb_81)
3	0.4	0.3	0.3	0.4
min_sam- ples	145	145	85	105

Like most indices, *SI* cannot conclusively confirm the correctness of clustering due to its limitations. Therefore, we deal not only with cases when *SI* reaches a maximum but also with cases close to it.

In particular, for N=6 and N=7, we only take cases with maximal *SI* because *SI* is not high enough (for N=6) or *SI* is positive for a single case (N=7). When we consider the partitions containing five clusters (N=5), we analyze the case labeled lb\_88 and, in addition, cases that satisfy the constraint *SI*>0.1. There are four such cases, as shown in Fig. 1, *b*. Similarly, considering the partition consisting of N=8clusters and the constraint *SI*>0.2, we obtain 9 cases.

To quantify the differences between the four partitions selected for *N*=5, we apply ARI, which measures similarity between two clusterings. This can help us to reduce the number of partitions that need to be separated.

ARI ranges from –0.5 (especially discordant partitions) to 1 (identical partitions).

The results of ARI evaluation for a pair of clusterings are presented in Fig. 2, *a* in the matrix form. The captions of the rows and columns refer to the partitions for which ARI is evaluated. The evaluated ARI is in the corresponding cell. Thus, ARIs for identical partitions are equal to 1 and depicted in dark colors, while other combinations yield smaller ARIs and are represented in lighter. We see that for the pair lb\_88 and lb\_79, the ARI is 0.668; for the pair lb\_75 and lb\_73, the ARI is 0.981.Therefore, the selected partitions are highly similar. Other pairs are less similar since their ARIs are around 0.3.

In the same way, the  $9 \times 9$  ARI matrix is calculated for partitions of eight clusters (*N*=8) (Fig. 2, *b*). Note that all ARIs are greater than 0.54 (thus, the selected partitions are highly similar).

Thus, we select the partition lb\_88 for N=5, the partition lb\_62 for N=7, and the partition lb\_81 for N=8. We map these cases (Fig. 3), where the noise points are eliminated. In addition, the map also shows the network of faults and locations of the strongest earthquakes (M>5.5). Analyzing Fig. 3, we can conclude that the sections correlate well with the



Labels\_83 Labels\_66 Labels\_81 Labels\_64 Labels\_70 Labels\_72 Labels\_89 Labels\_65 Labels\_67 b

Fig. 2. Adjusted Rand Index for the 5-cluster partition (*a*) and 8-cluster partition (*b*).



Fig. 3. The partitions containing 5 (*a*), 7 (*b*), and 8 (*c*) clusters. The solid curves mark faults. Black bullets correspond to the region's strongest earthquakes (M>5.5).

fault network and the distribution of strong seismic events.

**Conclusion and perspective.** In this research, the earthquake clustering procedure is developed using cluster analysis tools. In particular, earthquakes in Azerbaijan and adjacent areas from 2010 to 2023 were considered. The catalog of earthquakes as a dataset of elements characterized by longitude, latitude, and depth was divided into clusters via the DBSCAN algorithm. The application of the algorithm provides a variety of partitions into clusters depending on the intrinsic algorithm's parameters. To validate the DBSCAN results, the Silhouette Index was used to identify the appropriate clusterings with maximal Silhouette Indices. After this, the final clustering of the earthquake catalog is still not unique. The further application of the Adjusted Rand Index showed that some partitions are similar and almost indistinguishable. Another auxiliary criterion for determining the correct clustering of earth-

#### References

- Georgoulas, G., Konstantaras, A., Katsifarakis, E., Stylios, C.D., Maravelakis, E., & Vachtsevanos, V. (2013). «Seismic-mass» density-based algorithm for spatio-temporal clustering. *Expert Systems with Applications, 40*, 4183—4189. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.01.028.
- Holovatch, Yu., Kenna, R., & Thurner, S. (2017). Complex systems: physics beyond physics. *European Journal of Physics*, 38, 02300. https:// doi.org/10.1088/1361-6404/aa5a87.
- ISC: International Seismological Centre. (2024). Online Bulletin.Retrieved from http://www.isc. ac.uk/iscbulletin/search/.
- Semenova, Yu., Kendzera, O., Skurativskyi, S., Mykulyak, S., Skurativska, I., & Topoliuk, O. (2024). Seismic hazard assessment in the Shamkir-Mingachevir reservoir region through ground response analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES)*, 1415(1), 012007. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012007.

quakes is based on comparing the location of the clusters with the structure of faults and the locations of strong earthquakes with a magnitude of more than 5.5. In consequence, a reduced number of earthquake clusterings was obtained.

The results can be used to identify particularly dangerous seismogenic zones and determine the type of seismicity [Taroni et al., 2024] and the geometry of faults in cluster areas. They can also be used to perform risk assessments and clarify the statistical regularities of earthquake sequences.

- Scholz, C.H. (2019). *The mechanics of earthquakes and faulting* (3rd ed.) Cambridge, UK: Cambridge University. https://doi.org/10.1017/978 1316681473.
- Scitovski, S. (2018). A density-based clustering algorithm for earthquake zoning. *Computers and Geosciences, 110,* 90—95. https://doi.org/ 10. 1016/j.cageo.2017.08.014.
- Taroni, M., Consoler, R., Montuori, C., Murru, M., Falcone, G., Chiaraluce, L., & Pastoressa, A.L. (2024). Statistically significant difference between earthquake size distributions of independent and triggered seismicity. *Communications Earth & Environment*, 5, 193 https://doi. org/10.1038/s43247-024-01367-x.
- Tsereteli, N., Tibaldi, A., Alania, V., Gventsadse, A., Enukidze, O., Varazanashvili, O., & Muller, B. (2016). Active tectonics of central-western Caucasus, Georgia. *Tectonophysics*, 691, 328—344. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.10.025.

# Застосування кластерного аналізу до вивчення просторових патернів землетрусів Азербайджану та прилеглих територій

## С.І. Скуратівський<sup>1</sup>, С.В. Микуляк<sup>1</sup>, Ю.В. Семенова<sup>1</sup>, К.С. Скуратівська<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна <sup>2</sup>Університет Падови, Падова, Італія

На підставі даних каталогу землетрусів в Азербайджані та прилеглих до нього районів за період з 2010 по 2023 р. розроблено процедуру розбиття землетрусів на кластери з використанням алгоритму DBSCAN для Python. У процесі розбиття на кластери використовувався ряд індикаторів, які дали змогу оптимізувати кількість кластерів і кількість землетрусів у кластерах. Порівняння розташування кластерів землетрусів з тектонічними розломами в цьому регіоні продемонструвало їх високу кореляцію.

**Ключові слова**: землетруси, Азербайджан, кластеризація, алгоритм DBSCAN, мережа розломів.

УДК 550.83:504

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322491

## Engineering-ecological research of the upper part of geological section using seismic data

O.K. Tiapkin<sup>1</sup>, S.A. Onyshchenko<sup>2</sup>, O.V. Piskunov<sup>1</sup>, 2025

<sup>1</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine <sup>2</sup>LLC «Georozvidka», Lviv, Ukraine

The paper presents the results of reprocessing seismic data typically lost during hydrocarbon exploration. These data are used to map the velocity properties (longitudinal wave velocities) of the upper part of the geological section, to reduce costly engineering and survey work for industrial and civil construction, and to promote the successful development of precise agriculture in oil and gas regions. Additionally, the study addresses the average shear-wave velocity in the top 30 m of the Earth's surface ( $V_S^{30}$ ) for seismic risk assessments and to solve engineering-hydrogeological challenges.

**Key words:** upper part of the geological section, undergroundwater depth, seismic exploration, longitudinal wave velocity.

Introduction. Typically, large-scale industrial development of an area is preceded by geological exploration, in which seismic surveying plays a key role in oil- and gas-producing regions. Geophysicists need to study the velocity inhomogeneities of the upper part of the geological section (UPGS) to eliminate their distorting effects in order to process seismic data. In seismic exploration, the UPGS is the uppermost layer of the geological section. Here, rocks' physical properties (velocity and density) vary most significantly. The section's thickness can range from a few dozen meters (in mid-latitude and southern regions) to several hundred meters (in the permafrost layers of northern areas or where near-surface trap intrusions or salt domes occur). Significant operational resources are expended to

acquire data on the structure and model the UPGS, which typically remains unused. At best, the UPGS information is employed as an auxiliary mapping or exploration indicator. For example, geophysical surveys for oil and gas have been made more successful by incorporating nontraditional UPGS investigation methods — such as microseismic logging of shallow wells (down to 50 m) [Tiapkin et al., 2016] — into the main survey program (alongside standard techniques like seismic and electrical prospecting, and supplemental ones like gravity and magnetic surveys). At the same time, the construction of industrial facilities and infrastructure for producing fields requires engineering-geological investigations. Their primary objective is to ensure the stability and integrity of project-

Citation: Tiapkin, O.K., Onyshchenko, S.A., & Piskunov, O.V. (2025). Engineering-ecological research of the upper part of geological section using seismic data. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 150—155. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322491.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ed structures under long-term operational loads without dangerous deformations. This requirement must be met throughout the entire structurally distinct portion of the Earth's crust within the zone of potential engineering impact (in exploration geophysics, the UPGS). To assess the suitability of specific UPGS rock masses for construction and forecast environmental consequences, comprehensive engineering-geological studies are needed to characterize the site's structuraltectonic conditions and quantitatively evaluate the rocks' deformations, strength, and filtration properties. However, such studies are typically discrete, allowing for examining rock masses only at certain points and to a limited depth. Meanwhile, a UPGS model obtained during geological exploration (specifically seismic exploration), supplemented and refined with minimal research, can serve as a reliable foundation for planning subsequent engineering and construction work. This approach significantly reduces the scope of expensive engineering surveys while substantially increasing their robustness [Tyapkin, Onyshchenko, 2014].

**Results.** A highly accurate method has been employed to determine the velocity characteristics of the UPGS down to depths of several hundred meters for any observation system and any wave excitation technique, requiring no additional specialized studies. This method is based on using estimates of average velocity. Within the UPGS, there is a low-velocity near-surface layer and a highervelocity lower layer (down to depth  $h_1 + h_2'$ , see Fig. 1). The average velocity is evaluated from first-arrival times recorded along equidistant observation profiles at offsets comparable to the thickness of the UPGS. The approach uses the first-arrival times regardless of the wave types (refracted, reflected, head waves, etc.) and is unaffected by the curvature of the UPGS boundaries. It is implemented within the SPS-PC processing system on a PC. The estimates obtained at geophysical observation points are interpolated onto a regular grid across the study area. The main computational parameters of the method are the coefficient  $k_i$  determined through the ratio of

velocities  $V_1$  and  $V_2$ , and the offset  $X_n$  where first-arrival times are recorded. The proposed approach is not very sensitive to variations in UPGS parameters. To assess the accuracy of the obtained results, one can use the procedures for determining static corrections while processing seismic data. For instance, if at a certain point on the profile  $h_1=5$  m,  $V_1$ =700 m/s,  $h_2$ =30 m, and  $V_2$ =100 m/s, then k=3.02 and  $X_p=105$  m. The computed k can be employed to calculate  $X_{p}$  at other points along the profile over a broad range where  $V_1$  and  $V_2$  were not determined because to attain a 2 ms accuracy in static corrections, the velocities  $V_1$  and  $V_2$  may vary along the profile  $\leq$  39 % and  $\leq$  27 %, respectively, relative to the velocities at the initial point where the parameters were specified.

Fig. 2 provides an example of using the method to determine the velocity characteristics of the UPGS along a particular (2D) profile, comparing it with the conventional approach of investigating this portion of the geological section via microseismic logging and the refracted-wave method. In this case, incorrect results due to errors in the microseismic-logging data affected the time section. By contrast, the time section with static corrections applied using the proposed approach appears more coherent and is more accurate.

In the example of the northern part of Western Siberia, the construction of a 1:200,000-scale map of longitudinal (P-wave) velocities in the UPGS is illustrated over an area of about 37.5 thousand km<sup>2</sup> [Tyapkin, Onyshchenko, 2014]. This map clearly shows areas of thicker permafrost (with higher velocity values) and lower-velocity areas where permafrost is practically absent («thawed» zones). These «thawed» zones tend to be located along rivers, which meander significantly in the swampy tundra environment of northern Western Siberia. Some of these zones occupy sizeable territories with rivercontrolled boundaries, indicating a separation of the Earth's crust into tectonic blocks.

This opens additional opportunities for mapping the fault-block tectonics and assessing the associated oil and gas potential [Tyapkin, 1998]. The resulting *P*-wave velocity map of the UPGS, along with the possibility of converting UPGS *P*-wave velocity into density and engineering parameters, makes it possible to substantially reduce the amount of expensive engineering survey work while significantly increasing its reliability, accuracy, and completeness, as well as facilitating the organization of a comprehensive geoecological monitoring system.

Another promising area for applying the constructed P-wave velocity maps of the UPGS is agriculture in steppe and foreststeppe regions, especially precision farming [Onyshchenko, Tyapkin, 2015]. With the help of these maps, it becomes possible to investigate and forecast changes in UPGS moisture content (by area and depth). To this end, the method employs estimated average velocity values in the UPGS derived from first-arrival times at various fixed offsets. This approach allows one to examine the structural features of the UPGS at specific depths (down to those depths). A combined analysis of the relevant UPGS P-wave velocity maps makes it possible to determine and predict the three-dimensional moisture content distribution within this subsurface section. It also identifies the sources of its spatial variations (whether natural (including structural-tectonic) or anthropogenic) to inform management decisions in water-resource and agricultural activities. In the past, these studies were conducted by the authors in Russia. There are now positive results of applying such technologies in Ukraine as well, based on seismic exploration data from LLC «Georozvidka».

The average shear-wave velocity in the top 30 m of the Earth's surface  $(V_S^{30})$  is one of the key parameters in geophysical engineeringenvironmental research, thanks to its significance and wide range of applications. It plays a crucial role in classifying UPGS based on their seismic characteristics, which is essential for seismic risk assessment and earthquake impact modeling, particularly in Ukraine [Dovbnich, Viktosenko, 2023; Tiapkin et al., 2024]. Eurocode-8 [CEN, 2004], adopted in EU countries, has  $V_S^{30}$  as the principal characteristic to determine the seismic UPGS class. Beyond its primary role in seismic analysis,  $V_S^{30}$  is also employed as an indirect indicator for evaluating geotechnical parameters such as bearing capacity, density, and lithotype. Rock moisture is a major factor affecting  $V_S^{30}$ . Hence, there is a possibility of predicting underground water depth (where direct hydrogeological measurements are not available — down to 30 meters) using  $V_S^{30}$  data, including via machine-learning methods.

This can be illustrated by the example of Texas (USA). There, high-resolution open datasets for  $V_S^{30}$ , undergroundwater levels, and lithology are available [Li et al., 2020; Jasechko, 2023]. They enable comprehensive analysis, machine-learning model testing, and the assessment of physical relationships under real-world conditions. The  $V_S^{30}$ dataset was reprojected into EPSG:4326 to ensure consistency with other data. Data were collocated using the *cKDTree* algorithm, which matched each underground water-level measurement to the nearest  $V_{S}^{30}$  point within 0.05° (~5.5 km). Three machine-learning models were used to predict underground water depth: simple regression, Random Forest, and Extra Trees. The simple model served as a baseline, but its assumption of linearity is often insufficient for complex geological and geophysical relationships. Random Forest constructs multiple trees and averages their predictions, making it robust to noise, outliers, and nonlinearities. Extra Trees, a



Fig. 1. Refraction travel-time curves of the first wave arrival from the model section (1) and conditional layer (2).



Fig. 2. Example of using the proposed method for determining UPGS velocity characteristics in the procedure for deriving static corrections when processing seismic data along a specific (2D) profile, compared with the traditional approach to studying this part of the geological section using microseismic logging and the refracted-wave method in the Buzuluk area (southeastern East European Platform): a — the relief profile (2D) plot indicating points/positions where microseismic logging was carried out, m; b — plots of static corrections obtained from microseismic data (blue) and from the proposed UPGS velocity-determination method (red), microseconds; c — the 2D time seismic section for the profile using static corrections derived from the proposed UPGS velocity-determination method; d — the 2D time seismic section for the profile using static corrections based on microseismic data.

Random Forest variant that adds randomness in node splitting, was tested for potential performance gains. The model evaluation used  $R^2$  and RMSE parameters. The simple regression showed an  $R^2$  of 0.002, indicating no direct  $V_S^{30}$  — undergroundwater correlation. In contrast, Random Forest achieved an  $R^2$  of 0.728 and an RMSE of 4.417 m, demonstrating a high predictive capability. Extra Trees also incorporated different geological (lithological) conditions and performed slightly better ( $R^2$ =0.733, RMSE=4.255 m). Thus, adding geological (particularly lithological) data to the models leads to only a small improvement in predictive accuracy (an increase in the determination coefficient  $R^2$ 

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

by roughly 2—3 %). This may indicate that  $V_s^{30}$  already captures a substantial portion of the information governed by the geological (lithological) and geotechnical conditions of the UPGS. However, the future use of more detailed 3D geological models and/or high-resolution classifications of soil types could yield a more substantial enhancement in predictive outcomes.

These findings can serve as a basis for developing automated workflows that utilize  $V_S^{30}$  for initial underground water assessments. Future research may include validating these models in other geological-geophysical settings, integrating more geotechnical/hydrological data, and exploring

other machine learning algorithms (such as support vector machines or neural networks) to enhance accuracy.

Conclusions. In the progress of processing seismic exploration data for studying deep geological structures and searching for mineral deposits, geophysicists need to address the issue of velocity heterogeneity in the UPGS to eliminate its distorting influence. Substantial operational resources are spent acquiring data on the structure and developing a UPGS model, which typically remains unused afterward. However, a P-wave velocity map of the UPGS, supplemented by minimal specialized survey work, can serve as a foundation for designing engineering and construction projects in the study area. If a strong correlation is established between rock density and P-wave velocity, the latter can be converted into density and engineering parameters. This approach significantly reduces the scope of additional, expensive engineering investigation while substantially increasing its reliability.

Another promising direction to utilize the constructed *P*-wave velocity maps of the UPGS lies in agriculture across the steppe and forest-steppe regions, especially in precision farming. These maps enable comprehensive

#### References

- CEN (2004). Eurocode 8 design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. European standard EN 1998-1, European Committee for Standardization, Brussels. Retrieved from https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1998.1.2004.pdf.
- Dovbnich, M., & Viktosenko, I. (2023). Regional model  $V_{\rm s}^{30}$  and seismic ground types for Ukraine. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Kyiv, Ukraine (pp. 1—5). https://doi.org/10.3997/2214-4609. 2023520159.
- Jasechko, S. (2023). Global Groundwater Levels. Retrieved from http://www.hydroshare.org/resource/da946dee3ada4a67860 d057134916553.
- Li, M., Rathje, E., Cox, B., & Yust, M. (2020). In-

analysis and forecasting of moisture variations in the UPGS and the identification of natural (including structural and tectonic) or anthropogenic sources of those variations in this portion of the geological section. Such insights support informed decision-making in water management and agricultural planning and operations.

The results demonstrate the potential for using  $V_S^{30}$  as a proxy parameter to predict underground water depth (up to 30 m) using machine learning models. The results indicate that ensemble methods such as Random Forest and Extra Trees Regress or effectively capture the nonlinear relationships between shear-wave velocity and groundwater levels (with determination coefficients  $R^2$  reaching about ~0.72—0.73 and a root-mean-square error of roughly — ~4.2—4.4). At the same time, adding geological (particularly lithological) data yields only a small improvement in predictive accuracy (an increase in  $R^2$  of about  $\sim 2-3$  %). Despite these overall promising outcomes, the research emphasizes the need to validate the models in other geological and geophysical settings to ensure their possibility of generalization, as well as the importance of considering potential limitations related to data resolution and spatial variability.

tegrated Time Average Shear Wave Velocity to a Depth of 30 Meters  $(V_s^{30})$  Map of Texas [Version 2]. Design Safe-CI. https://doi.org/10. 17603/ds2-wera-v784.

- Onyshchenko, S.A., & Tyapkin, O.K. (2015).Use of the Lost Seismic Information about Upper Part of Geological Structure for Development of Precise Agriculture. 1st Conference on Proximal Sensing Supporting Precision Agriculture. Near Surface Geoscience 2015 (Turin, Italy) (pp. 1—5). https://doi.org/10.3997/2214-4609.201413829.
- Tiapkin, O., Dovbnich, M., Anisimova, L., Skjeltorp, A., & Viktosenko, I. (2024). Seismotectonics and Near-Surface Features for Geohazard Studies in Southern Ukraine. NSG 2024 30th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Sep 2024, (Helsinki, Finland) (pp. 1—5). https://doi.org/10.3997/2214-4609.202420011.

- Tiapkin, O.K., Onyshchenko, S.A., & Mendrii, I. (2016). Near-surface seismic interpretation to reduce the loss of water resources. 78th EAGE Conference and Exhibition 2016: Efficient Use of Technology — Unlocking Potential (Vienna, Austria) (pp. 1—5). https://doi. org/10.3997/2214-4609.201600666.
- Tyapkin, K.F. (1998). New technologies in assessment of outlooks on search for ore and hydrocarbon deposits. *Earth Science Frontiers*

(China University of Geosciences, Beijing), 5(1-2), 41—48.

Tyapkin, O.K., & Onyshchenko, S.A. (2014). Near surface geophysical information for development of socio-economic infrastructure of oil and gas arctic regions. 76th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2014: Experience the Energy— Incorporating SPE EUROPEC 2014 (Amsterdam, The Netherlands) (pp. 3264—3268). https://doi. org/10.3997/2214-4609.20140940.

## Інженерно-екологічні дослідження верхньої частини геологічного розрізу за сейсмічними даними

О.К. Тяпкін<sup>1</sup>, С.А. Онищенко<sup>2</sup>, О.В. Піскунов<sup>1</sup>, 2025

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна <sup>2</sup>TOB «Георозвідка», Львів, Україна

Показано результати переобробки сейсмічної інформації, що втрачається в процесі пошуків вуглеводнів, для картування швидкісної характеристики (швидкості поширення поздовжніх хвиль) верхньої частини геологічного розрізу для скорочення дорогих інженерно-пошукових робіт для промислового та цивільного будівництва та успішного розвитку точного землеробства на території нафтогазових регіонів, а також середньої швидкості поширення зсувної хвилі у верхніх 30 м від земної поверхні  $(V_S^{30})$  для оцінювання сейсмічних ризиків і вирішення інженерно-гідрогеологічних завдань.

**Ключові слова**: верхня частина геологічного розрізу, глибина залягання підземних вод, сейсморозвідка, швидкість поширення поздовжніх хвиль.

УДК 550.83

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322493

# **Prospects of transition to European standards** — features of Eurocode-8

## I.A. Viktosenko<sup>1</sup>, M.M. Dovbnich<sup>2</sup>, M. Mazanec<sup>1</sup>, 2025

<sup>1</sup>Charles University, Prague, Czech Republic <sup>2</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

This paper analyzes the features of Eurocode-8, the European standard for earthquakeresistant construction, regarding seismic microzonation and seismic hazard assessment. The standard is compared to the methodology of similar studies in Ukraine. There is a significant difference in approaches to considering local near-surface geological conditions

Citation: Viktosenko, I.A., Dovbnich, M.M., & Mazanec, M. (2025). Prospects of transition to European standards — features of Eurocode-8. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 155—159. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322493. Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

of survey sites. The study shows the critical role of shear-wave velocity in the uppermost subsurface as a primary indicator of a site's seismic response. It explores innovative approaches to obtaining velocity characteristics based on multichannel analysis of surface waves and modeling regional near-surface velocity based on Shuttle Radar Topography Mission data. The key issue of implementing Eurocode-8 requirements in Ukrainian conditions is discussed, with a particular focus on making seismic hazard map based on peak ground acceleration.

**Key words:** DBN V.1.1.12-2014, Eurocode-8, seismic microzonation, shear-wave velocities, peak ground acceleration.

**Introduction.** One of the most important conditions for successfully integrating Ukraine into the global political and economic space is the transition to international standards. This fully applies to seismic microzonation. In the practice of engineering seismology, the seismic hazard (calculated seismicity) of the territory is determined by background (normative) seismicity and an increase in seismicity due to the influence of local soil conditions, which are expressed in seismic intensity scale (Ukrainian studies) and seismic amplification factors (international studies).

Near-surface physical and geological conditions affect the amplitudes of seismic shaking, which can be greatly amplified and increase the seismic hazard of the territory, as well as the frequency content of the seismic waves.

Seismic microzonation is the procedure of accounting for local site conditions (site response analysis) to refine seismic data for the study area, considering its physical and geological conditions. This process involves estimating peak ground acceleration (PGA), calculating synthetic accelerograms, and generating response spectra at the ground surface. These studies are among the key tasks of engineering seismology and form an integral part of further seismic resistance calculations.

Currently, the main regulatory document governing seismic microzonation in Ukraine is DBN V.1.1.12-2014 «Construction in Seismic Regions of Ukraine» [DBN V.1.1.12:2014, 2014]. In EU countries, the applicable standard is Eurocode-8 [Eurocode 8 ..., 2004]. The main provisions regarding seismic microzonation outlined in these regulatory documents differ significantly. Ukraine's transition to European standards requires an understanding and adaptation of the requirements of international regulations.

A comparative analysis of the requirements of DBN V.1.1.12-2014 and Eurocode-8 in the context of seismic microzonation. In Ukrainian seismic microzonation practice, according to DBN V.1.1.12-2014, which refers to Soviet-era standards, the following methods are utilized:

the method of engineering-geological analogies (EGA);

- the seismic rigidity method (SRM);

 the method of recording earthquakes, explosions, and microseisms;

- computational methods.

Using this combination of methods, the increase in seismic intensity is determined in terms of the MSK-64 scale. These methods are well-known to Ukrainian engineering seismologists and have been successfully used for over 50 years; hence, they do not need further elaboration. Ukrainian seismic hazard maps are constructed in terms of seismic intensity [DBN V.1.1.12:2014, 2014]. These maps enable the evaluation of the background (normative) seismicity for any area within Ukraine.

The seismicity of the survey site is determined by simply adding the intensity increase obtained during seismic microzonation to the values of background (normative) seismicity according to the Ukrainian seismic hazard maps and the construction building and structures of higher-importance classes.

In recent decades, there has been a significant shift towards using advanced computational technologies and numerical modeling methods. This trend also extends to calculations for the seismic resistance of buildings and structures during their design and reconstruction. According to the requirements of DBN V.1.1.12:2014, for the design of buildings and structures of the higher-importance classes, calculations for seismic effects are performed using the direct dynamic method with the representation of seismic action in the form of digital accelerograms.

A fundamental drawback of the approach to seismic hazard assessment applied in Ukraine is that it is based on seismic intensity (in MSK-64 scale points) rather than ground motion parameters such as PGA, velocities, displacements in the geological environment during earthquakes, or response spectra. This necessitates a transition from seismic intensity MSK-64 scale to physical ground motion parameters during earthquakes. While this transition is performed, it is not entirely transparent from a physical perspective. The seismic intensity MSK-64 scale represents the perceived effects of an earthquake, not a physical quantity. Intensity-based hazard assessments, followed by their conversion to ground motion parameters, raise concerns among foreign experts who act as international reviewers for projects involving foreign investments. This issue may become even more relevant during the post-war reconstruction of Ukraine, as funds from other countries will likely be used for redevelopment.

Let us now focus in more detail on the approaches for assessing the impact of local physical and geological conditions of seismic hazards according to Eurocode-8.

A key feature of this approach is assessing the seismicity of a site in terms of predicted ground motion acceleration parameters, specifically the response spectra of single oscillators with different oscillation frequencies subjected to seismic impacts, expressed in terms of surface acceleration within nearsurface layers. The response spectrum can serve as input data for calculating the seismic impacts on buildings and structures using spectral methods and as a basis for obtaining synthetic accelerograms for subsequent calculations using the direct dynamic method [Newmark, Rosenblueth, 1971].

Eurocode-8 recommends two types of spectra: 1) for events with  $M \ge 5.5$ ; 2) for events

with M < 5.5. When calculating the response spectrum, the following parameters are considered: PGA at the site, based on the general seismic hazard map and adjusted by the building and structures importance coefficient; a coefficient accounting for damping (with 5 % damping being the most commonly used); a coefficient taking into account the soil factor (amplification coefficient for different soil conditions); characteristic period boundaries of the response spectrum which define its shape. The last two parameters are determined by the local soil conditions. At the same time, the primary characteristic defining soil conditions is the average shear-wave velocity in the upper 30-meter layer of the geological profile  $(V_s^{30})$ . It is calculated using the formula:

$$V_s^{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s_i}}},$$

where  $h_i$  is the thickness of the *i*-th layer and  $V_{s_i}$  is its shear wave velocity (for layers up to 30-meter depth). Despite discussions regarding the suitability of  $V_s^{30}$  [Castellaro et al., 2008; Mazanec et al., 2024], it remains the most commonly applied soil classification parameter.

The values of shear-waves' velocity  $V_{s_i}$  in a layered Earth's subsurface are determined during field or borehole seismic surveys. Among the advantages of the approach is its simplicity and transparency in implementation.

However, a significant limitation is the inability to account for resonance effects in the case of the presence of boundaries with a sharp change in velocity in the section. This issue, however, can be resolved through computational methods without requiring additional field investigations. Over the past decades, integrating powerful computational tools into research practice has made computational methods effective for considering local seismic conditions. Currently, the methodology for accounting for resonance effects is well-developed and successfully applied in international and domestic engineering seismology practices [Kendzera, Semenova, 2021].

The influence of the sedimentary rock soil of the exploration site on the transformation of the seismic signal (site response analysis) is assessed by calculating the amplitudefrequency characteristics of the medium for the case of normal incidence of a plane shear wave on a horizontally layered rock model. The spectrum of seismic waves at the surface of the soil is determined by multiplying the spectrum arriving from the «rock» (crystalline basement, limestone roof, etc.) by the corresponding amplitude-frequency characteristics of the horizontally layered rock model. This recalculation makes it possible to consider the site's resonance properties caused by the shallow geological structure, velocity, and density characteristics.

Innovative methods for obtaining the  $V_s^{30}$ parameter. The  $V_s^{30}$  parameter can be determined using field or borehole seismic survey data. Most commonly, investigations are conducted using either the shear-wave refraction method or through vertical seismic profiling in boreholes. The methodology, data processing techniques and interpretation approaches are well-established and are not discussed in detail in this study.

In the last decades, the field seismic survey method based on surface waves analysis (especially using MASW, multichannel analysis of surface waves) [Park et al., 1999] has gained increasing popularity for solving engineering seismological problems [Mazanec, Valenta, 2023]. The standard MASW process using the vertical component of Rayleigh waves consists of acquiring multichannel records and performing dispersion and inversion analysis. These procedures enable the derivation of a shear-waves velocity model as a function of depth. In the active MASW method, surface

#### References

- Castellaro, S., Mulargia, F., & Rossi, P.L. (2008).  $V_s^{30}$ : Proxy for seismic amplification? seismological research letters. *Seismological Research Letters*, 79(4), 540—543. https://doi.org/10.1785/ gssrl.79.4.540.
- DBN Ukrainy V.1.1.12-2014. (2014). Construction in seismic areas of Ukraine. Kyiv: Publ. House

waves are generated using an impact source (typically a sledgehammer). In the passive MASW approach, surface waves originate from natural environmental vibrations [Socco et al., 2010]. MASW is one of the straightforward and cost-effective seismic methods, making it a powerful tool for mapping  $V_s^{30}$ .

Regardless of the method used, dense networks of seismic survey measurements are rarely available, even for seismically active regions. Constructing regional-scale  $V_s^{30}$ schemes solely based on seismic survey-measured  $V_{\rm s}^{30}$  values is practically impossible. The availability of high-resolution, unified satellite topographic data worldwide, obtained as part of the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), has led to the development of an alternative methodology for constructing  $V_s^{30}$  schemes [Wald, Allen, 2007]. Digital  $V_s^{30}$ distribution models based on the SRTM database can be computed online on the official USGS website: https://earthquake.usqs.gov/ data/vs30/. For Ukraine, the results of the construction  $V_s^{30}$  scheme based on SRTM data are discussed in [Dovbnich, Viktosenko, 2023].

Conclusions. The full implementation of Eurocode-8 requirements in Ukraine is feasible only with the availability of a Ukrainian seismic hazard map not in terms of seismic intensity (in MSK-64 scale points) but in terms of PGA for different return periods (typically, once in 475 years in international practice). Developing such maps is a priority task for engineering seismology in Ukraine, ensuring a meaningful transition to international standards. Addressing this issue and utilizing the existing experience and results of seismic microzonation studies can serve as a key element in choosing strategies for earthquakeresistant design of buildings and structures, including during Ukraine's post-war reconstruction.

of the Ministry of Construction of Ukraine, 110 p. (in Ukrainian).

Dovbnich, M., & Viktosenko, I. (2023). Regional model  $V_s^{30}$  and seismic ground types for Ukraine. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, EAGE, Kyiv.

- Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. (2004). European standard EN 1998-1, European Committee for Standardization, Brussels. Retrieved from https://www.confinedmasonry.org/wp-content/ uploads/2009/09/Eurocode-8-1-Earthquakesgeneral.pdf.
- Kendzera, O., & Semenova, Y. (2021). Dynamic Deformation Characteristics of Soil in the Tasks of Seismic Micro Zoning. *European Journal of Environment and Earth Sciences*, 2(3), 41–48. https://doi.org/10.24018/ejgeo.2021.2.3.142.
- Mazanec, M., & Valenta, J. (2023). Surface waves as a cost-effective tool for enhancing the interpretation of shallow refraction se ismic data. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, *20*(3), 121—138. https://doi.org/10.13168/AGG.2023.0012.
- Mazanec, M., Valenta, J., & Málek, J. (2024). Does VS30 reflect seismic amplification? Observa-

tions from the West Bohemia Seismic Network. *Natural Hazards, 120*, 12181—12202. https://doi.org/10.1007/11069-024-06679-x.

- Newmark, N.M., & Rousenblueth, E. (1971). *Fundamentals of Earthquake Engineering* (pp. 61— 99). Prentice-Hall 555 Inc., Englewood Cliffs.
- Park, C.B., Miller, R.D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800—808. https://doi.org/10.1190/1.1444590.
- Socco, L.V., Foti, S., & Boiero, D. (2010). Surfacewave analysis for building near-surface velocity models — Established approaches and new perspectives. *Geophysics*, 75(5), 75A83— 75A102. https://doi.org/10.1190/1.3479491.
- Wald, D.J., & Allen, T.I. (2007). Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. Bulletin of the Seismological Society of America, 97(5), 1379—1395. https://doi. org/10.1785/0120060267.

# Перспективи переходу на європейські нормативи — особливості Eurocode-8

## І.А. Віктосенко<sup>1</sup>, М.М. Довбніч<sup>2</sup>, М. Мазанец<sup>1</sup>, 2025

<sup>1</sup>Карлів університет, Прага, Чехія <sup>2</sup>НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

Проаналізовано особливості європейського нормативу з сейсмостійкого будівництва Eurocode-8 у частині сейсмічного мікрорайонування й оцінювання сейсмічної небезпеки. Показано суттєву відмінність підходів щодо врахування локальних приповерхневих фізико-геологічних умов майданчиків вишукувань порівняно з методологією аналогічних досліджень в Україні. Показано ключову роль вивчення швидкостей поширення поперечних хвиль у верхньої частині розрізу — головного показника відгуку майданчика на сейсмічні впливи. Розглянуто інноваційні підходи щодо отримання швидкісних характеристик за даними багатоканального аналізу поверхневих хвиль і побудови регіональних приповерхневих швидкісних моделей за даними супутникової топографії.

Обговорено ключове питання реалізація вимог Eurocode-8 в умовах України — побудова карт загального сейсмічного районування в прогнозних рухах ґрунту (пі-кових прискореннях).

**Ключові слова**: ДБН В.1.1.12-2014, Eurocode-8, сейсмічне мікрорайонування, швидкості поширення поперечних хвиль, прогнозні рухи ґрунту.

УДК 551.24.035 (477.8)

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322495

## Умови залягання та деформації кластичних дайок Українських Карпат

**В.І.** Альохін<sup>1</sup>, І.М. Бубняк<sup>2</sup>, М.В. Бігун<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», Луцьк, Україна <sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

Наведено результати досліджень умов залягання, складу та особливостей деформацій кластичних дайок Українських Карпат. Встановлено стратиграфічні підрозділи осадової товщі, в яких поширені кластичні дайки, їх генетичний тип і морфологічні особливості, мінералого-петрографічний склад. За даними польових вимірів елементів залягання дайок та їх деформаційних структур встановлено їх системи та системи розривних деформацій, які порушують первісний стан цих дайок. На основі польових вимірів деформаційних структур за допомогою програми «Win-Tensor» було виконано реконструкцію полів палеонапружень, у межах яких проходили деформації. За результатами досліджень встановлено, що кластичні дайкиздебільшого представлені ін'єкційним типом і формувалися в морських умовах. Деформації цих дайок пов'язані з процесом формування складчастих Карпат і проходили в кілька етапів напружень різного кінематичного типу. Дайки часто вміщують скупчення органічної речовини, що дає змогу використовувати їх для оцінювання перспективності надр на поклади вутлеводнів.

**Ключові слова:** Українські Карпати, Скибовий покрив, кластичні дайки, деформації, поля напружень.

Вступ. Кластичні дайки — це піщані інтрузії, які утворюються внаслідок прориву осадових товщ під тиском глибинних горизонтів або заповнення відкритих тріщин у прибережних зонах морських та океанічних басейнів. Залежно від генезису їх ділять на дві основні групи: ін'єкційні кластичні дайки, які формуються шляхом глибинного проникнення, і нептунічні кластичні дайки, що виникають внаслідок заповнення тріщин зверху [Huuse et al., 2010].

Раніше проведені дослідження кластичних дайок показали, що вони мають важливе значення для розуміння геологічної історії розвитку окремих ділянок земної кори. Вони також слугують індикаторами потенційних резервуарів або покладів вуглеводнів у глибинних горизонтах, що робить їх вивчення актуальним для геологорозвідки [Alokhin et al., 2018].

Геологічне положення Українських Карпат. Українські Карпати є частиною Альпійської орогенної системи, сформованої внаслідок конвергенції Європейської та Африканської плит під час закриття Магурського океану. Вони складаються з покривно-складчастої системи, що включає низку покривів (рис. 1). Основною геологічною особливістю є флішові формації, які утворюють потужні послідовності осадових порід загальною товщиною до 10—12 км. Карпати характеризуються декількома фазами деформацій, зокрема ENE-WSW стисканням у пізньому бурдигалі та NNE-SSW транспресією у пізніші періоди, що впливало на їхню сучасну структуру. Палеонапруження відіграли ключову роль у формуванні покривів і

Citation: Alokhin, V.I., Bubniak, I.M., & Bihun, M.V. (2025). Occurrence and deformation of clastic dykes in the Ukrainian Carpathian. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 160—165. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322495.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



Рис. 1. Кластичні дайки в структурі Українських Карпат та їх стереограми: 1— тектонічні покриви та структури (1— Самбірський покрив, 2— Борислав-Покутський покрив, 3— Скибовий покрив, 4— Кросненська зона, 5— Чорногорський покрив, 6— Дуклянський покрив, 7— Поркулецький покрив, 8— покрив Магура, 9— Рахівський покрив, 10— Мармароська зона скель, 11— Мармароський масив, 12— Пенінська зона скель, 13— Вигорлат-Гутинське вулканічне пасмо, 14— Закарпатський внутрішній прогин); 2— ділянки досліджень (відслонень) (1— Бориславська, 2— Східниця, 3, 4, 5— Рибник, 6, 7— Верхнє Синьовидне, 8— Сколе, 9— Тухля, 10— Бубнище, 11— Станківці, 12, 13— Сукіль, 14— Косів, 15, 16— Красноїльськ, 17— Тернава); 3— лінії державних кордонів.

Fig. 1. Clastic dikes in the structure of the Ukrainian Carpathians and their stereograms: *1* — Tectonic nappes and structures (1 — Sambir Nappe, 2 — Boryslav-Pokuttya Nappe, 3 — Skyba Nappe, 4 — Krosno Zone, 5 — Chornohora Nappe, 6 — Dukla Nappe, 7 — Porkulec Nappe, 8 — Magura Nappe, 9 — Rakhiv Nappe, 10 — Marmarosh Klippen Zone, 11 — Marmarosh Massif, 12 — Pieniny Klippen Zone, 13 — Vygorlat-Hutyn Volcanic Range, 14 — Transcarpathian Internal Depression); *2* — research sites (outcrops) (1 — Boryslav, 2 — Skhidnytsia, 3, 4, 5 — Rybnyk, 6, 7 — Verkhnie Syniovydne, 8 — Skole, 9 — Tukhlya, 10 — Bubnyshche, 11 — Stankivtsi, 12, 13 — Sukil, 14 — Kosiv, 15, 16 — Krasnoyilsk, 17 — Ternava); *3* — state border.

передгірських прогинів, характерних для цієї області. Відносно невеликі висоти (до 2 км) і помірна денудація вказують на ознаки «м'якого зіткнення». Ця територія є унікальною для вивчення тектонічних процесів, зокрема механізмів формування флішових басейнів, деформацій та палеонапружень, які визначили сучасний вигляд Карпат [Bubniak et al., 2022].

Методи досліджень. При виконанні досліджень використовувалися традиційні методи геологічного картування та опису відслонень гірських порід з більш детальним вивченням умов залягання, складу, морфологічних особливостей кластичних дайок та їх тектонічних деформацій. Ці методи доповнювалися спеціальними тектонофізичними методами, основним з яких був кінематичний метод досліджень.

При виконанні польових робіт у відслоненнях визначалися гірські породи та кластичні дайки, їх петрографічний склад, вимірювалися елементи залягання порід, розривних і складчастих структур, кластичних дайок.

Польові тектонофізичні дослідження проводилися з вивченням контактів дайок з вміщуючими їх породами. При цьому визначалися дзеркала ковзання на їх площинах, вимірювалися елементи залягання борозен і штрихів на дзеркалах, визначався напрямок руху бокових порід. Такі ж дослідження і виміри проводилися для всіх розривних порушень і тектонічних тріщин, які пересікали і зміщували кластичні дайки.

Обробка геологічних даних виконувалася з побудовою стереограм і роз-діаграм простягань і падінь тектонічних структур. Обробка тектонофізичних даних виконувалася в програмі «Win-Tensor» з реконструкцією полів палеонапружень, в яких формувалися тектонічні деформації [Devlaux, Sperner, 2003].

Результати досліджень. Встановлено та досліджено кластичні дайки в межах Скибового, Борислав-Покутського і Самбірського покривів Українських Карпат (див. рис. 1). Найбільш поширені кластичні дайки в Скибовому покриві, де вони проривають відклади нижньої менілітової (олігоцен—нижній міоцен), вигодськопасічнянської світи (еоцен) і бистрицької світи (еоцен). На цій площі (10 ділянок) вивчено 27 дайок. Статистичний аналіз простягань кластичних дайок показав, що головні системи мають північно-західне простягання з азимутами 325° і 345° і круте падіння на північний схід. Мікроскопічне дослідження порід кластичних дайок показало, що серед них переважають алевропісковики та алевроліти, в поодиноких випадках зустрічаються пісковики.

За вигинами шарів порід у відслоненнях, що прориваються дайками, і дослідженням мікроструктурних ознак під мікроскопом в зальбандах дайок встановлено ін'єкційну природу переважаючої більшості кластичних дайок.

Всі досліджені дайки деформовані. Деформації проявлені у вигляді вигинів дайок, крихкого будинажу, наявністю дзеркал ковзання на їх контактах з вміщуючими породами (рис. 2). Дайки січуться і зміщуються численними тектонічними тріщинами, які мають дзеркала ковзання з ознаками (штрихами та борознами ковзання) рухів крил різного кінематичного типу. Обробка вимірів таких дзеркал ковзання в програмі «Win-Tensor» дала змогу провести реконструкцію полів напружень, в яких формувалися деформації. Встановлено, що крихкі деформацій формувалися в кілька етапів, які відрізнялися різним віком і кінематичним типом. Так, наприклад,на ділянці «Східниці» були встановлені поля палеонапружень підкидового, скидового та зсувного типів. За ознаками перекриття штрихів старшого віку молодими штрихами і борознами та за більшою кількістю і чіткістю проявлення цих мікроструктур для зсувних деформацій встановлено їх найбільш молодий відносний вік. Кілька полів різних типів також відмічалися на ділянках «Борислава», «Рибника» та в інших частинах Українських Карпат.

**Висновки.** Кластичні дайки встановлено в трьох покривах Українських Карпат—Скибовому, Борислав-Покутському та Самбірському. Найбільш поширені в Скибовому покриві, де січуть піщано-





Fig. 2. Conditions of Occurrence and Deformation of the most massive clastic dikes in the Skyba Nappe of the Ukrainian Carpathians.

глинисті відкладення еоцену, олігоцену та нижнього міоцену. Найбільша кількість дайок спостерігається в кременистому горизонті нижньоменелітової світи. За простяганням серед дайок переважає система з азимутами 325° і 345°, яка має падіння в північно-східному напрямку. Дайки складені здебільшого алевро-пісковиками та алевролітами. Майже всі дайки мають ін'єкційну природу і формувалися в сейсмоактивних частинах прадавніх океанів. Всі дайки деформовані в процесі формуванні складчастих Карпат. За тектонофізичними дослідженнями встановлено кілька етапів деформацій дайок різного віку в полях напружень підкидового, скидового та зсувного кінематичного типу. Останній тип має наймолодший відносний вік.

Дайки часто вміщують включення органічної речовини, що дає змогу використовувати їх для оцінювання перспективності надр на поклади вуглеводнів.

#### Список літератури

- Alokhin, V.I., Tikhlivets, S.V., Murovska, A.V., & Puhach, A.V. (2018). Mineralogical features of the clastic dykes of the Eastern Carpathians Skybova zone. *Journal of Geology, Geography* and Geoecology, 27(1), 3—11. https://doi. org/10.15421/111824.
- Bubniak, I., Tranos, M.D., & Bubniak, A. (2022). Paleostress reconstruction of the southeast Ukrainian Outer Carpathians. *International Geology Review*, 64(18), 2479—2496. https:// doi.org/10.1080/00206814.2021.1986679.
- Delvaux, D., & Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In *New insights in to structural interpretation and modelling* (Vol. 212, pp. 75—100). https://doi.org/10.1144/ GSL.SP.2003.212.01.06.
- Huuse, M., Jackson, C.A.L., Van Rensbergen, P., Davies, R.J., Flemings, P.B., & Dixon, R.J. (2010). Subsurface sediment remobilization and fluid flow in sedimentary basins: an overview. *Basin Research*, 22(4), 342–360. https://doi. org/10.1111/j.1365-2117.2010.00488.x.

## Occurrence and deformation of clastic dykes in the Ukrainian Carpathian

## V.I. Alokhin<sup>1</sup>, I.M. Bubniak<sup>2</sup>, M.V. Bihun<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Donetsk National Technical University, Lutsk, Ukraine <sup>2</sup>Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

The study presents the results of research on the occurrence, composition, and deformation features of clastic dykes in the Ukrainian Carpathians. The stratigraphic units of the sedimentary sequence containing clastic dykes, the irgenetic type, morphological features, andmineral-petrographic composition have been identified. Based on field measurements of the orientation elements of dykes and their deformation structures, the systems of dykes and the systems of brittle deformations disrupting their original state have been identified. Based on field measurements of deformation structures using the «Win-Tensor» program, a reconstruction of paleostress fields, with in which the deformations occurred, was performed. The research results indicate that most clastic dykes are of the injection type and were formed under marine conditions. The deformations of these dykes are associated with the formation process of the Folded Carpathians and occurred din multiple stages within stress fields of different kinematic types. Dykes often contain accumulations of organic matter, which makes them useful for assessing the potential of subsurface deposits.

**Key words:** Ukrainian Carpathians, Skyba nappe, clastic dykes, deformations, stress fields.

#### References

- Alokhin, V.I., Tikhlivets, S.V., Murovska, A.V., & Puhach, A.V. (2018). Mineralogical features of the clastic dykes of the Eastern Carpathians Skybova zone. *Journal of Geology, Geography* and Geoecology, 27(1), 3—11. https://doi.org/ 10.15421/111824.
- Bubniak, I., Tranos, M.D., & Bubniak, A. (2022). Paleostress reconstruction of the southeast Ukrainian Outer Carpathians. *International*

*Geology Review*, *64*(18), 2479—2496. https:// doi.org/10.1080/00206814.2021.1986679.

Delvaux, D., & Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In *New insights in to structural interpretation and modelling* (Vol. 212, pp. 75—100). https://doi.org/10.1144/GSL.SP. 2003.212.01.06. Huuse, M., Jackson, C.A.L., Van Rensbergen, P., Davies, R.J., Flemings, P.B., & Dixon, R.J. (2010). Subsurface sediment remobilization and fluid flow in sedimentary basins: an overview. *Basin Research*, 22(4), 342—360. https://doi. org/10.1111/j.1365-2117.2010.00488.x.

УДК 550.831.017:550.8.05:551.241

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322497

## Гравітаційне моделювання будови земної кори вздовж профілю Хирів—Рава-Руська—Великі Мости

#### С.Г. Анікеєв, В.Ю. Максимчук, 2025

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Львів, Україна

За результатами 2D гравітаційного моделювання досліджено особливості будови земної кори та верхньої мантії в зоні зчленування зовнішніх Українських Карпат та Східноєвропейської платформи вздовж лінії Хирів—Рава-Руська—Великі Мости. Профіль проходить через маловивчену прикордонну територію України і Польщі: перетинає Складчасті Карпати, Передкарпатський прогин, Рава-Руську зону та закінчується у зовнішній зоні Львівського прогину. Як вихідну модель земної кори використано глибинний сейсмогеологічний розріз по однойменному траверсу СГ-1(66). За результатами моделювання підтверджено сейсмогеологічні дані щодо глибин Карпатської основи та поверхні фундаменту вздовж траверсу, виділено основні тектонічні блоки та глибинні розломи земної кори, визначено густини осадового комплексу та порід фундаменту. Встановлено підвищені значення густини нижньої кори та верхньої мантії під Складчастими Карпатами. Досліджено відображення в аномальному гравітаційному полі тектонічних одиниць Карпатської споруди, прогнозованого Турківського параавтохтонного комплексу, а також глибинних мафічних магматичних утворень між Рава-Руським і Великомостівським розломами. Під регіональними від'ємними гравітаційними аномаліями виявлено заглиблення межі Мохо під Складчастими Карпатами та зоною Тейссейре—Торнквіста до 45 та 50 км відповідно. Отримані результати узгоджуються з існуючими закордонними та вітчизняними геофізичними матеріалами.

**Ключові слова:** Складчасті Карпати, Східноєвропейська платформа, зона Тейссейре—Торнквіста, межа Мохо, 2D густинна модель земної кори.

Вступ. Дослідження глибинної будови зони зчленування зовнішніх Українських Карпат, Західноєвропейської платформи і Східноєвропейської платформи у прикордонні України з Польщею залишаються актуальними протягом десятиліть. Особливий інтерес викликає розташована між ними Транс'європейська шовна зона і зона Тейссейре—Торнквіста, яким присвячено великий обсяг праць закордонних (M. Grad, A. Guterch, T. Janik, S. Mazur, M. Narkiewicz та ін.) і вітчизняних науковців [Орлюк та ін., 2022; Макаренко та ін., 2024; Старостенко та ін., 2024 та ін.]. Однак питання меж та глибинної структури зазначених тектонічних одиниць залишаються дискусійними. Інтерес до цієї території також пов'язаний з перспективами

Citation: Anikeyev, S.G., & Maksymchuk, V.Yu. (2025). Gravity modeling of the Earth's crust structure along the Khyriv—Rava-Ruska—Velyki Mosty profile. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 165—170. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322497.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

відкриття нових родовищ нафти та газу.

Метою роботи є дослідження глибинної будови прикордоння України на основі інтерпретації гравітаційного поля та побудови 2D густинної моделі земної кори та верхньої мантії вздовж лінії Хирів—Рава-Руська—Великі Мости. Профіль перетинає Складчасті Карпати, Передкарпатський прогин, Рава-Руську зону та закінчується у зовнішній зоні Львівського прогину (рис. 1).

**Вихідні матеріали.** Для побудови густинної моделі використано результати аналізу та інтерпретації аномального гра-



Рис. 1. Розташування траверсу СГ-1(66) і сейсмічних профілів на тектонічній карті західної України: 1 розломи Волино-Поділля [Тектонічна ..., 2004], уточнені за гравімагнітними матеріалами [Максимчук та ін., 2024]; 2— зони простягання глибинних розломів [Заяць, 2013]; 3— глибинні розломи за магнітометричними матеріалами [Максимчук та ін., 2023]; 4— вісь регіонального гравітаційного мінімуму та його Львівське відгалуження [Схема..., 2002]; 5— сейсмічні профілі.

Fig. 1. Location of the SG-1(66) traverse and seismic profiles on the tectonic map of western Ukraine: *1* — Volyn-Podillia faults [Hursky, Kruhlov, 2004], clarified using gravimagnetic materials [Maksymchuk et al., 2024]; *2* — zones of extension of the deep faults [Zayats, 2013]; *3* — deep faults by the anomalies of magnetic field [Maksymchuk et al., 2023]; *4* — axis of the regional gravity minimum and its Lviv branch [Scheme..., 2002]; *5* — seismic profiles.

вітаційного поля [Схема..., 2002]. Первинна модель земної кори ґрунтується на сейсмогеологічному розрізі по траверсу СГ-1(66) та його екстраполяції на південний захід і північний схід за матеріалами переінтерпретації сейсмічних профілів МСГТ [Заяць, 2013] на прикордонній території з Польщею. Густини гірських по-



Рис. 2. Попередня густинна модель глибинного розрізу по профілю Хирів—Рава-Руська—Великі Мости: 1 — границі літолого-тектонічних покривів; 2 — підошва покривів; 3 — скидо-насуви у палеозої; 4 — глибинні розломи; 5 — густина гірських порід, 10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>. СЄП — Східноєвропейська платформа; ТТЗ — зона Тейссейре—Торнквіста; ТЄШЗ — Транс'європейська шовна зона; ТПК — Турківський параавтохтонний комплекс. Білим контуром обмежено область сейсмогеологічного розрізу за траверсом СГ-1(66) [Заяць, 2013]. Стрілкою позначено точку перетину лінії моделювання з сейсмічним профілем TTZ-South. Δg<sub>Б</sub> — аномалії поля сили тяжіння в редукції Буге [Схема..., 2002]; Δg<sub>м</sub> — розраховане поле моделі; ΔB<sub>a</sub> — аномальне магнітне поле [Карта..., 2002].

Fig. 2. A preliminary density model of the deep cross-section along the Khyriv—Rava-Ruska—Velyki Mosty profile: 1 — boundaries of lithological-tectonic nappes; 2 — sole of the nappes; 3 — throw-thrust faults in the Paleozoic; 4 — deep faults; 5 — density of rocks,  $10^3 \text{ kg/m}^3$ . CEII — East European Platform; TT3 — Teisseyre-Tornquist Zone; TEIII3 — Trans-European Suture Zone; TIIK — Turkivskyi Paraautochthonous Complex. The white contour limits the area of the seismogeological cross-section along the SG-1(66) traverse [Zayats, 2013]. The arrow indicates the intersection point of the modeling line with the TTZ-South seismic profile.  $\Delta g_{\rm B}$  — anomalies of the gravity field in the Bouguer reduction [Scheme..., 2002];  $\Delta g_{\rm M}$  — calculated model field;  $\Delta B_{\rm a}$  — anomalous magnetic field [Map..., 2002].

рід по розрізу та глибини залягання межі Мохо первинно оцінено за публікаціями [Bielik et al., 2022; Макаренко та ін., 2024; Старостенко та ін., 2024 та ін.].

Результати моделювання. Густинну модель розрізу земної кори та верхньої мантії у смузі зчленування зовнішніх Карпат та Східноєвропейської платформи по лінії траверсу СГ-1(66) представлено на рис. 2. Підтверджуються глибини поверхні фундаменту платформи (1,7—7 км) та Карпатської основи (до 10 км), а також розломи земної кори вздовж сейсмогеологічного розрізу. За результатами моделювання межа Мохо характеризується складною геометрією та глибинами залягання від 37 до 50 км. Під регіональними від'ємними гравітаційними аномаліями в межах зони Тейссейре-Торнквіста та під Складчастими Карпатами виявлено заглиблення межі Мохо до 50 та 45 км відповідно. Під Складчастими Карпатами встановлено підвищену густину блоків нижньої кори (3,04·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>) і верхньої мантії (3,35·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>). Під фронтом зони Кросно оконтурено Турківський параавтохтонний комплекс палеоген-крейдових відкладів (2,64·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>).

#### Список літератури

- Заяць Х.Б. Глибинна будова надр Західного регіону України на основі сейсмічних досліджень і напрямки пошукових робіт на нафту і газ. Львів: Центр Європи, 2013, 136 с.
- Карта аномального магнітного поля України. Укладачі: Нечаєва Т.С., Гаркавко В.М., Шимків Л.М., Єнтін В.А. ПДРГП «Північукргеологія». Київ, 2002.
- Макаренко І.Б., Бурахович Т.К., Козленко М.В., Муровська Г.В., Козленко Ю.В., Савченко О.С. Профіль RomUkrSeis: модель глибинної будови літосфери та її геологогеофізична інтерпретація. Ч. І. Густинна неоднорідність та аномалії електропровідності. *Геофіз. журн.* 2024. Т. 46. № 6. С. 81—108. https://doi.org/10.24028/gj.v46i6.314130.
- Максимчук В.Ю., Анікеєв С.Г., Кудеравець Р.С. Відображення зони Тейссейре—Торнквіста в гравімагнітних полях на території Украї-

Їхнє розташування над зоною Ужоцького розлому сприяє міграції та акумуляції глибинних вуглеводнів [Заяць, 2013]. Між Рава-Руським та Великомостівським розломами виокремлено глибинні ущільнені мафічні магматичні утворення (2,89× ×10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>), які у магнітному полі явно відображаються інтенсивною додатною аномалією.

Простягання зони Тейссейре—Торнквіста, прогнозоване за морфологією аномального магнітного поля [Максимчук та ін., 2024], пов'язане із заглибленням межі Мохо до 50 км. Заглиблення межі Мохо є основною причиною інтенсивної від'ємної гравітаційної аномалії (–49 мГал) — Львівського відгалуження Карпатського регіонального гравітаційного мінімуму.

Висновки. Побудовано густинну модель земної кори по лінії Хирів—Рава-Руська—Великі Мости. Під Складчастими Карпатами та під зоною Тейссейре—Торнквіста за регіональними від'ємними гравітаційними аномаліями виявлено заглиблення межі Мохо до 45 та 50 км відповідно. Отримані результати узгоджуються з існуючими закордонними та вітчизняними геофізичними матеріалами.

ни. Збірник матеріалів наукової конференції (Київ, 17—18 вересня 2024 р.). НАН України, Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка. Київ, 2024, С. 265—269. https://doi.org/10.30836/gbhgd.2024.55.

- Максимчук В.Ю., Анікеєв С.Г., Мончак Л.С., Кудеравець Р.С., Пиріжок Н.Б. Структурнотектонічні особливості Закарпатського прогину за даними гравімагнітометрії. *Геофіз. журн.* 2023. Т. 45. № 6. С. 102—126. https:// doi.org/10.24028/gj.v45i6.293310.
- Орлюк М.І., Бакаржієва М.І., Марченко А.В. Магнітна характеристика і тектонічна будова земної кори Карпатської нафтогазоносної області як складова частина комплексних критеріїв вуглеводнів. *Геофіз. журн.* 2022. Т. 44. № 5. С. 77—105. https://doi. org/10.24028/gj.v44i5.272328.
- Старостенко В., Гінтов О., Муровська Г., Мичак С., Лисинчук Д. Тектоніка і глибинна

будова південно-західної частини Східноєвропейського кратону в межах України. Ч. II. *Геофіз. журн.* 2024. Т. 46. № 5. С. 3—31. https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.310287.

Схема гравітаційного поля України. Укладачі: Нечаєва Т.С., Шимків Л.М., Єнтін В.А. та ін. ПДРГП «Північукргеологія». Київ, 2002.

Тектонічна карта України. М 1:1 000 000. Гол.

ред. Д.С. Гурський, С.С. Круглов. Державна геологічна служба України, 2004.

Bielik, M., Zeyen, H., Starostenko, V., Makarenko, I., Legostaeva, O., Savchenko, S., Dérerová, J., Grinč, M., Godová, D., & Pánisová, J. (2022). A review of geophysical studies of the lithosphere in the Carpathian—Pannonian region. *Geologica Carpathica*, 73(6), 499—516. https://doi.org/10.31577/GeolCarp.73.6.2.

# Gravity modeling of the Earth's crust structure along the Khyriv—Rava-Ruska—Velyki Mosty profile

#### S.G. Anikeyev, V.Yu. Maksymchuk, 2025

Carpathian Branch of the S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

We used 2D gravity modeling to investigate the structural features of the Earth's crust and upper mantle in the junction zone of the outer Ukrainian Carpathians and the East European Platform along the Khyriv—Rava-Ruska—Velyki Mosty line. The profile passes through a poorly studied and complex structure of the border between Ukraine and Poland: it crosses the Folded Carpathians, the Precarpathian Trough, the Rava-Ruska Zone, and ends in the outer zone of the Lviv Trough. As the initial model of the crust, a deep seismic-geological section along the eponymous traverse SG-1(66) was used. The modeling results confirmed the seismic-geological data on the depths of the Carpathian base and the basement surface along the traverse, identified the main tectonic blocks and deep faults of the Earth's crust, and determined the densities of the sedimentary complex and basement rocks. The lower crust and upper mantle under the Folded Carpathians have higher density. The reflection in the anomalous gravity field of tectonic units of the Folded Carpathians, the predicted Turkivskyi Paraautochthonous Complex, as well as deep mafic magmatic formations between the Rava-Ruskyi and Velykomostivskyi Faults, was investigated. Under the regional negative gravity anomalies, a deepening of the Moho boundary was detected under the Folded Carpathians and the Teisseyre-Tornquist Zone up to 45 km and 50 km, respectively. The results obtained are consistent with foreign and domestic geophysical materials.

**Key words**: Folded Carpathians, East European Platform, Teisseyre-Tornquist Zone, Moho boundary, 2D Earth's crust density model.

#### References

- Zayats, Kh. (2013). The Structure of Minerals of the Western Region of Ukraine on the Basis of Seismic Studies and the Directions for Oil and Gas Exploration Study. Lviv: Center of Europe, 136 p. (in Ukrainian).
- Map of the anomalous magnetic field of Ukraine. (2002). Map Compilers: T.S. Nechayeva, V.M. Harkavko, L.M. Shymkiv, V.A. Yentin. PDRGP «Pivnichukrheolohiya». Kyiv (in Ukrainian).

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Makarenko, I.B., Burakhovych, T.K., Kozlenko, M.V., Murovska, G.V., Kozlenko, Yu.V., & Savchenko, O.S. (2024). RomUkrSeis profile: a model of the deep structure of the lithosphere and its geological and geophysical interpretation. P. 1. Density heterogeneity and electrical conductivity anomalies. *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(6), 81—108. https://doi.org/10.24028/ gj.v46i6.314130 (in Ukrainian).

- Maksymchuk, V.Yu., Anikeyev, S.G., & Kuderavets, R.S. (2024). Reflection of the Teisseyre-Tornquist zone in gravimagnetic fields on the territory of Ukraine. Proc. of the scientific conference (Kyiv, September 17—18, 2024). NAS of Ukraine, M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation. Kyiv (pp. 265—269). https://doi.org/10.30836/gbhgd.2024.55 (in Ukrainian).
- Maksymchuk, V.Yu., Anikeyev, S.G., Monchak, L.S., Kuderavets, R.S., & Pyrizhok, N.B. (2023). Structural and tectonic features of the Transcarpathian trough according to gravity and magnetic data. *Geofizychnyi Zhurnal*, 45(6), 102—126. https://doi.org/10.24028/ gj.v45i6.293310 (in Ukrainian).
- Orlyuk, M., Bakarjieva, M., & Marchenko, A. (2022). Magnetic characteristics and tectonic structure of the Earth's crust of the Carpathian oil and gas region as a component of complex hydrocarbon criteria. *Geofizychnyi Zhurnal*, 44(5), 77—105. https://doi.

org/10.24028/gj.v44i5.272328 (in Ukrainian).

- Starostenko, V., Gintov, O., Murovskaya, G., Mychak, S. & Lysynchuk, D. (2024). Tectonics and deep structure of the southwestern part of the East European Craton within Ukraine. PART II. *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(5), 3–31. https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.310287 (in Ukrainian).
- Scheme of the gravity field of Ukraine. (2002). Map Compilers: T.S. Nechaeva, L.M. Shimkiv, V.A. Entin et al. PDRGP «Pivnichukrgeologia». Kyiv (in Ukrainian).
- Hursky, D.S., & Kruhlov, S.S. (Eds.). (2004). *Tectonic map of Ukraine. Scale 1:1000000*. UkrSGI, Kyiv (in Ukrainian).
- Bielik, M., Zeyen, H., Starostenko, V., Makarenko, I., Legostaeva, O., Savchenko, S., Dérerová, J., Grinč, M., Godová, D., & Pánisová, J. (2022). A review of geophysical studies of the lithosphere in the Carpathian—Pannonian region. *Geologica Carpathica*, 73(6), 499—516. https://doi.org/10.31577/GeolCarp.73.6.2.

УДК 551.24 (477)

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322500

# Внутрішня будова і кінематика Звенигородсько-Братської та Кіровоградської зон розломів Українського щита та оцінка їх перспектив на корисні копалини

### О.О. Бабинін, С.В. Мичак, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Дослідження кінематики Звенигородсько-Братської та Кіровоградської розломних зон Інгульського мегаблока Українського щита актуальні в плані вивчення геодинамічних процесів, які відіграли важливу роль у формуванні родовищ корисних копалин Кіровоградського рудного району. Потужним поштовхом для детального вивчення рудного району стало відкриття тут уранових родовищ. Також було знайдено та вивчено родовища і рудопрояви золота і рідкісних металів. Нині центральна частина Інгульського мегаблока розглядається як одна з основних площ для розширення мінерально-сировинних ресурсів країни.

Citation: Babynin, O.O., & Mychak, S.V. (2025). Internal structure and kinematics of the Kirovohrad and Zvenyhorod-Bratsk fault zones of the Ukrainian Shield and assessment of their prospects for mineral resources . *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 170—175. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322500.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

**Ключові слова:** Український щит, Інгульський мегаблок, Звенигородсько-Братська зона розломів, Кіровоградська зона розломів, тектонофізика, кінематика, корисні копалини.

Вступ. Центральна частина Інгульського мегаблока Українського щита (УЩ) характеризується складною геологічною будовою, що включає розломні зони, які є сприятливими для утворення рудних покладів золота та рідкісних металів. Найбільш інтенсивні рудоутворюючі процеси відбувалися внаслідок формування Звенигородсько-Братської, Кіровоградської та Суботсько-Мошоринської зон розломів, які обмежують Новоукраїнський масив трахітоїдних гранітів (2,05 млрд років) і Корсунь-Новомиргородський плутон габро-анартозитіві гранітів рапаківі (1,75 млрд років), формування яких сприяло інтенсивному проникненню магматичних розплавів і гідротерм у земну кору (рис. 1).

Звенигородсько-Братська зона розломів складається з прямолінійних зон сколювання, що охоплюють північно-західні простягання від 310° до 360°. Це пов'язано з тим, що крім власних трьох прямолінійних зон сколювання (Надлакська-1, Піщанобродська та Братська), уцій зоні розломів перетинаються сколи декількох етапів розломоутворення: ємилівський (310° (L-сколи) і 290° (R-сколи)), довгопристанський (332° (L-сколи) і 340° (R-сколи)), тальнівський (12° (L-сколи) коржовська фаза активізації). Проте головним при формуванні зони є первомайський етап розломоутворення (2,45 млрд років тому), упродовж якого утворилися L-сколи за азимутом простягання 345° та R-сколи з азимутом простягання 357° [Мичак та ін., 2023].

Поле напружень призакладанні Звенигородсько-Братської зони розломів характеризувалося північно-східним стисненням (вісь  $\sigma_1 - 38^{\circ}/40^{\circ})$  — північно-західним розтягненням (вісь  $\sigma_3 - 285^{\circ}/25^{\circ}$ ) [Кировоградский..., 2013; Муровська та ін., 2024].

*Кіровоградська зона розломів* була закладена після формування масивів новоукраїнських і кіровоградських гранітів під час кіровоградського етапу розломоутворення (1,95 млрд років тому).

За результатами тектонофізичних досліджень у Кіровоградській зоні розломів виокремлено наступні зони сколювання: Кіровоградську (3° (L-сколи) і 16° (R-сколи)), Клинцівську (10° (L-сколи) і 90° (L'-сколи)), Олексіївську (30° (L-сколи)), Бобринецько-Жеванівську (3° (L-сколи) і 20° (R-сколи)).

Головне поле тектонічних напружень Кіровоградської зони розломів становить:  $\sigma_1 - 49^{\circ}/00^{\circ}$ ,  $\sigma_3 - 319^{\circ}/00^{\circ}$  (правий зсув) [Гинтов, Мычак, 2011].

Рудоносність. Родовища та рудопрояви в межах Звенигордсько-Братської та Кіровоградської зон розломів насамперед пов'язані з протерозойським циклом активізації в Інгульському мегаблоці, який розпочався ~2,1 і тривав до 1,70 млрд років, закінчившись суботсько-мошоринським етапом розломоутворення. Це останній великий етап деформацій, що охопив не тільки Інгульський мегаблок, а й весь щит із сусідніми мегаблоками та призвів до формування системи великих розломних зон і багатьох широтних зон сколювання. За протерозойський етап активізації багато разів змінювалися поля напружень і напрямки рухів зон розломів. Крім горизонтальних відбувалися неодноразові вертикальні переміщення, виникали нові зони сколювання, поновлювалися і згасали процеси утворення магматичних розплавів, гідротерм і рудних розчинів.

Головною відмінністю Звенигородсько-Братської зони розломів у металогенічному відношенні є наявність пегматитових літієвих родовищ. З них варто виділити Полохівське родовище, яке приурочене до лейкократових аплітовидних гранітів, що згідно залягають з вміщуючими гнейсами північно-західного простягання 320°



Рис. 1. Структурна схема Інгульського мегаблока Українського щита [Gintov, Mychak 2012; Кировоградский..., 2013; Мичак та ін., 2023].

Fig. 1. Structural scheme of the Inhul Domain of the Ukrainian Shield [Gintov, Mychak 2012; Starostenko, Gintov, 2013; Mychak et al., 2023].

та падінням на південний захід під кутом 65°—75°. На ділянці родовища виділяються декілька систем сколювання північнозахідного простягання 300°—310°.

До Звенигородсько-Братської зони розломів приурочений Липняжський гранітоїдний масив (див. рис. 1) з літієвою та золоторудною мінералізацією. В його межах виділяються Станкуватське рідкіснометалеве рудне поле, яке складається з трьох родовищ — Липняжського, Надії та власне Станкуватського. Деякі ділянки Станкуватського рудного поля виділяються підвищеною золотоносністю. Характерними структурними елементами цих ділянок є системи тріщин сколювання і відриву, які в деяких випадках мають однакові елементи залягання зі структурнотекстурними елементами гірських порід, а в деяких січуть їх [Кировоградский..., 2013].

Слід зазначити, що практично всі зо-



Рис. 2. Схема золоторудних структур Кіровоградської зони розломів [Яценко и др., 1998]: 1— Клинцівська металогенічна зона; 2— Юр'ївська металогенічна зона; 3— рудні поля (номери в кружках) (І— Клиніцевське, ІІ— Юр'ївське, ІІІ— Гаївське, ІV— Бережинківське, V— Волошківське); 4— зони розломів; 5— зони сколювання.

Fig. 2. Scheme of gold-ore structures of the Kirovohrad fault zone [Yatsenko et al., 1998]: 1 - Klyntsy metallogenic zone; 2 -Yuriivka metallogenic zone; 3 -ore fields (numbers in circles) (I - Klyntsy, II - Yuriivka, III - Gaivsk, IV - Berezhynkivka, V - Voloshkivka); 4 -fault zones; 5 -shear zones.

лоторудні поля Кіровоградської зони розломів витягнуті в субмеридіональному чи близькому до нього напрямку (рис. 2) відповідно до простягання зони розломів або складових її структур другого порядку, таких як R-сколи, тріщини відриву і структур відвороту. Останні можуть бути орієнтовані за відношенням до головного простягання зони під кутами до 45°. Зони розломів діагональної системи лелековського етапу також перетинають Кіровоградську зону розломів під кутом до 45°, тому структура рудних полів досить складна, і поряд із субмеридіональним простяганням породних і рудовмісних комплексів не менш часто зустрічаються і північно-західні простягання.

Юр'ївське золоторудне родовище розташоване у північно-східній частині Компаніївського урановорудного поля на східному контакті Новоукраїнського масиву з гнейсами чечеліївської світи. Зруденіння обмежене контуром залишку гнейсів, затиснутим між гранітоїдними масивами. Структура родовища визначається субмеридіональною Кіровоградською та північно-східною Мар'ївською зонами розломів.

Клинцівське золоторудне родовище розташоване в східній ендоконтактній частині Новоукраїнського масиву та Клинцівсько-Верхньоінгульською зоною сколювання Кіровоградської зони розломів, до якої приурочені дві золотоносні зони субмеридіонального простягання: східна (завширшки 100 м, простежена на 2,3 км) і західна (завширшки 70—100 м, завдовжки 5,7 км).

Висновки. Центральна частина Інгульського мегаблока характеризується складною геологічною будовою, що включає розломні і метасоматичні зони, які є сприятливими для утворення рудних покладів золота і рідкісних металів.

Встановлено, що формування рудних тіл відбувалося у кілька етапів, що включають як магматичні, так і тектонічні процеси. Найбільш інтенсивні рудоутворюючі процеси відбувалися у зв'язку з активністю Звенигородсько-Братської та Кіровоградської зон розломів та формуванням Новоукраїнського трахітоїдного масиву та Корсунь-Новомиргородського плутону габро-анартозитів і гранітів рапаківі, які сприяли інтенсивному проникненню магматичних розплавів і гідротерм у земну кору.

З огляду на наявність значних покладів золота і рідкісних металів, центральна

#### Список літератури

- Гинтов О.Б., Мычак С.В. Геодинамическое развитие Ингульского мегаблока Украинского щита по геолого-геофизическим и тектонофизическим данным. І. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 3. С. 102—118. https:// doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i3.2011. 116932.
- Кировоградский рудный район. Глубинное строение. Тектонофизический анализ. Месторождение рудных полезных ископаемых. Под. ред. В.И. Старостенко, О.Б. Гинтова. Киев: Прастыи луды, 2013, 500 с.
- Мичак С.В., Бакаржієва М.І., Орлюк М.І., Марченко А.В., Курило С.І. Внутрішня будова та кінематика Звенигородсько-Братської зони розломів Українського щита за геофізичними даними. *Геофиз. журн.* 2023. T. 45. № 3. С. 50—73. https://doi.org/10.24028/ gj.v45i3.282413.

частина Інгульського мегаблока становить значний інтерес для подальших геологорозвідувальних робіт. Проведені дослідження можуть слугувати основою для визначення перспективних ділянок для подальшої розробки і видобутку.

- Муровська Г., Стовба С., Верпаховська О., Гнилко О., Орлюк М., Мичак С. Структура та геодинаміки літосфери нафтогазоносних і рудних регіонів України за новітніми геолого-геофізичними даними. Київ: Наук. думка, 2024, 245 с. https://doi.org/10. 15407/978-966-00-1912-6.
- Яценко Г.М., Бабынин А.К., Гурский Д.С., Братчук О.Н., Марченко Ю.Ф., Паршина М.А., Росихина А.И., Сливко Е.М., Фалькович А.Л. *Месторождения золота в гнейсовых комплексах докембрия Украинского щита*. Киев: Геоинформ, 1998, 256 с.
- Gintov, O.B., & Mychak, S.V. (2012). The Ingul block of the Ukrainian Shield (the East European Craton): multiple stress changes during the Palaeoproterozoic tectonic evolution. Geophysical research. *Abstract. General Assembly* of the European Geosciences Union. Vienna, Austria, 21–28 April 2012.

# Internal structure and kinematics of the Kirovohrad and Zvenyhorod-Bratsk fault zones of the Ukrainian Shield and assessment of their prospects for mineral resources

#### O.O. Babynin, S.V. Mychak, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Studies of the kinematics of the Zvenyhorod-Bratsk and Kirovohrad fault zones of the Inhul Domain of the Ukrainian Shield are relevant in terms of studying the geodynamic processes that played an important role in the formation of mineral deposits of the Kirovohrad ore region. A powerful impetus for the detailed study of the ore region was the discovery of uranium deposits here. Deposits and ore occurrences of gold and rare metals were also found and studied. Currently, the central part of the Inqul Domain is considered one of the main areas for expanding the country's mineral resources.

**Key words**: Ukrainian Shield, Inhul Domain, Zvenihorod-Bratsk fault zone, Kirovohrad fault zone, tectonophysics, kinematics, minerals.

#### References

- Gintov, O.B., & Mychak, S.V. (2011). Geodynamic development of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield for geological-geophysical and tectonophysical data. I. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 33(3), 102—118. https://doi. org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i3.2011.116932 (in Russian).
- Starostenko, V.I., & Gintov, O.B. (Eds.). (2013). *Kirovograd Ore District. Deep Structure. Tectonophysical Analysis. Ore Deposit.* Kyiv: Prastyi Ludy, 500 p. (in Russian).
- Mychak, S.V., Bakarzhieva, M.I., Orlyuk, M.I., Marchenko, A.V., & Kurylo, S.I. (2023). Internal structure and kinematics of the Zvenigorod-Bratsk fault zone of the Ukrainian Shield based on geophysical data. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 45(3), 50—73. https://doi.org/10.24028/ gj.v45i3.282413 (in Ukrainian).

Murovska, G., Stovba, S., Verpakhovska, O., Hnyl-

ko, O., Orlyuk, M., & Mychak, S. (2024). Structure and geodynamics of the lithosphere of oil and gas-bearing and ore regions of Ukraine according to the latest geological and geophysical data. Kyiv: Naukova Dumka, 245 p. https://doi.org/10.15407/978-966-00-1912-6 (in Ukrainian).

- Yatsenko, G.M., Babynin, A.K., Gurskiy, D.S., Bratchuk, O.N., Marchenko, Yu.F., Parshina, M.A., Rosikhina, A.I., Slivko, E.M., & Falkovich, A.L. (1998). Gold deposits in Precambrian gneiss complexes of the Ukrainian Shield. Kyiv: Geoinform, 256 p. (in Russian).
- Gintov, O.B., & Mychak, S.V. (2012). The Ingul block of the Ukrainian Shield (the East European Craton): multiple stress changes during the Palaeoproterozoic tectonic evolution. Geophysical research. *Abstract. General Assembly* of the European Geosciences Union. Vienna, Austria, 21–28 April 2012.

УДК 550.384

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322501

# Аномальне геомагнітне поле едіакарію: палеомагнітні дані з південно-західної частини Східноєвропейської платформи

### В.Г. Бахмутов, Є.Б. Поляченко, С.І. Черкес, Д.В. Главацький, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Представлено результати палеомагнітних досліджень трапової формації Волині та червоноколірних порід Поділля. Підтверджено аномальну поведінку геомагнітного поля в едіакарії, що проявляється у невідповідності одновікових палеомагнітних полюсів, гіперактивному режимі зміни полярності поля та вкрай низьких значеннях його палеонапруженості. Цим можуть бути обумовлені складнощі у палеогеографічних реконструкціях для цього періоду, а також радикальний вплив геомагнітних умов на навколишнє середовище, зокрема на еволюцію біоти.

Ключові слова: аномальне геомагнітне поле, едіакарій, трапи Волині.

**Вступ**. В еволюції нашої планети останній геологічний період неопротерозою — 541 млн років тому) — займає особливе

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Bakhmutov, V.G., Poliachenko, I.B., Cherkes, S.I., & Hlavatskyi, D.V. (2025). Ediacaran anomalous geomagnetic field: paleomagnetic data from the southwestern margin of the east European Platform. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 175—181. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322501.

місце. Він передував кембрійській епосі, коли на нашій планеті відносно швидко і майже одночасно виникло безліч нових біологічних форм (так званий «кембрійський вибух»). У пошуках пояснення такого загадкового еволюційного стрибка висунуто різні гіпотези щодо екстремальних подій, які відбулися в біосфері, кріосфері, гідросфері, атмосфері. У геології едіакарій займає особливе місце як один з ключових етапів історії планети, коли відбувалися глобальні заледеніння, тектонічна перебудова суперконтинентів, зміна режиму генерації геомагнітного динамо та інші глобальні процеси. У їх вивченні важливу роль відіграють палеомагнітні дані, які є основою глобальних палеогеографічних реконструкцій і дають змогу кількісно інтерпретувати переміщення та обертання окремих блоків земної кори. Щодо палеомагнітної вивченості едіакарію, то результати є неоднозначними і суперечливими. Для докембрійських платформ отримано групи практично одновікових, але різних за напрямком полюсів (див., наприклад, [Domeier et al., 2023] і посилання в ній). Для їхнього пояснення висунуто різні гіпотези, які умовно можна розділити на чотири групи: 1) аномально (стосовно фанерозою) швидкий рух тектонічних плит; 2) зміщення географічного полюса обертання Землі (істинна міграція полюса); 3) аномальна поведінка геомагнітного поля; 4) частина даних з різних причин не є інформативними і не можуть бути застосовані для палеогеодинамічних реконструкцій. Отримання надійних палеомагнітних даних для едіакарію є актуальною проблемою сучасної палеомагнітології. Автори провели детальні палеомагнітні дослідження на різних об'єктах південно-західної частини Східноєвропейської платформи (СЄП) в районі Волино-Поділля і виконали тестування різних гіпотез стосовно геомагнітного поля едіакарію.

**Об'єкти і методи дослідження.** Було досліджено вулканогенні (трапова формація Волині) та осадові (теригенні відклади Поділля) породи едіакарію потужністю 300—500 м, які поділяються на волинську, могилів-подільську та канилівську серії [Гожик, 2013]. Зразки трапів волинської серії були відібрані як у кар'єрах, так і у свердловинах, результати палеомагнітних досліджень наведено у публікаціях [Shcherbakova et al., 2020; Бахмутов и др., 2021; Bakhmutov et al., 2022; Thallner et al., 2022]. Численні ізотопно-геохронологічні визначення віку ефузивної товщі обмежують вік її формування діапазоном 580—545 млн років тому [Бахмутов и др., 2021].

Вимірювання магнітних параметрів виконувалися на апаратурі ЦКК магнітометричною апаратурою Інституту геофізики НАН України. Зразки піддавалися стандартній процедурі поступового розмагнічування температурою і змінними магнітними полями, досліджувалася їх магнітна текстура. Комплексом магнітномінералогічних методів досліджувалися магнітні мінерали — носії залишкової намагніченості, для їх визначення також залучалися результати оптичної мікроскопії та електронно-мікрозондового аналізу тощо. Додатково дослідження магнітномінералогічних властивостей зразків, а також визначення напруженості давнього геомагнітного поля класичними (Тельє— Тельє і Вілсона) методами виконувались у палеомагнітній лабораторії Геофізичної обсерваторії «Борок» філіалу ІФЗ РАН та у геомагнітній лабораторії університету Ліверпуля, Великобританія (2019—2022).

Результати. На зразках «низькотитанистих» базальтів і туфів волинської серії було виділено високотемпературну характеристичну компоненту намагніченості, яка за всіма ознаками є первинною. На це вказує: а) її біполярність у зразках базальтів і туфів з різних покривів; б) позитивний тест контакту; в) ідентифіковані гетерофазно окислені титаномагнетити з блокуючими температурами понад 500 °С, які представлені псевдо- та однодоменними зернами; г) незалежність магнітної текстури та палеомагнітних напрямків; д) узгодження отриманих палеомагнітних напрямків із попередніми результатами інших авторів. Це дало змогу отримати надійні визначення палеомагнітних напрям-
ків і палеонапруженості на цих зразках. Розраховані палеомагнітні полюси *T1*, *T2* та *VM* (рисунок) добре узгоджуються з раніше отриманими даними по цих базальтах [Nawrocki et al., 2004; Elming et al., 2007]. На зразках «високотитанистих» базальтів характеристична компонента намагніченості виділяється в діапазоні низьких блокуючих температур (200—400 °C) і за низьких змінних магнітних полів (до 25 мТл). Є підстави вважати цю компоненту первинною, але розрахований за нею полюс потрапляє на кембрійський сегмент референтної траєкторії позірної міграції полюса (ТПМП), що викликає підозру на перемагнічування. За результатами досліджень осадових червоноколірних порід грушкинської світи в діапазоні деблокуючих температур 200—360 °C було виділено дві низькотемпературні компоненти і за ними розраховані палеополюси *CLM-1* і *CLM-2* та високотемпературну (*CH*) характеристичну компоненту намагніченості в діапазоні температур 650—700 °C (див. рисунок).

Отримано нові палеомагнітні полюси, а також здійснено вибірку полюсів з бази даних PALEOMAGIA, що охоплює породи різного генезису вікового діапазону 525— 608 млн років тому в межах СЄП [Бахмутов и др., 2021, табл. 8]. Результати можна роз-



Вибірка палеомагнітних полюсів з колами довіри A<sub>95</sub> для едіакарію СЄП [Бахмутов и др., 2021, з доповненнями]. Хрестами і кружечками позначено полюси з південно-західної частини СЄП по трапам Волині та червоноколірним породам Поділля відповідно, квадратами — полюси із східної частини (Урал), ромбами із північної частини СЄП. Інтервали довіри A<sub>95</sub> для нових полюсів залиті помаранчевим (для грушкинської світи) та жовтим (для волинських трапів). Окремо чорною та пунктирною лініями позначено референтну ТПМП для Балтики, а чорні/сірі точки визначають положення розрахованих/інтерпольованих полюсів, вік яких наведений цифрами в млн р. У вкладці наведено райони досліджень у межах СЄП.

A selection of palaeomagnetic poles with the corresponding 95 % confidence levels for the Ediacaran of East European Platform [Bakhmutov et al., 2021, with modification]. Crosses and circles indicate poles from the southwestern part of the East European Platform for Volyn traps and red beds of Podillia correspondingly, squares — from the eastern part (Ural), rhombus — from the northern part of the East European Platform. The  $A_{95}$  confidence intervals for the new poles are filled in orange (for the Hrushka suite) and yellow (for the Volyn traps). The apparent polar wander path of Baltic craton is shown by solid and dashed lines, where the small black/gray circles correspond to mean position of the defined/interpolated poles, the age of the poles is given in Ma. The sampling locations are given in the inset.

ділити на три групи. Перша (6, 8, 9, 10, VM, T2 і T1) вікового діапазону 608—560 млн років має тенденцію зміщення в західному напрямку з омолодженням віку. Розрахований полюс СНср майже збігається з полюсом Т1 базальтів лучичівської світи. Друга група є послідовним продовженням першої і містить полюси 16, 15, 14, 12, 13, 17, 11 і 18 вікового діапазону 557—525 млн років, які розташовані вздовж східного узбережжя США і на схід від Карибського басейну. До неї тяжіє наш полюс СМН червоноколірних порід, а також розрахований для високотитанистих базальтів полюс Н. Третя група містить полюси 1, 2 і 3, які вибиваються із загального тренду міграції полюсів і розташовуються трохи на схід від перетину екватора з Гринвіцьким меридіаном, її вік 560—565 млн років, у цю групу потрапляє наш полюс ТЗ. Полюси цієї групи розташовуються поблизу нижньосилурійської (440 млн років) ділянки референтної ТПМП, яка розрахована методом інтерполяції і не є надійною. Полюс 7 не можна віднести до жодної з груп. Полюси, розраховані за низькотемпературними компонентами CLM-1 і CLM-2, як і полюси 4 та 5, тяжіють до пермсько-тріасового і силурійського сегментів ТПМП відповідно.

За результатами досліджень зразків з п'яти свердловин, що охоплюють волинську серію, було виділено щонайменше шість епізодів зміни полярності поля [Bakhmutov et al., 2022], що узгоджуються з іншими даними по свердловинах з цього ж району [Глевасская и др., 2006]. Відносно невелика за розмірами Волинська магматична провінція навряд чи формувалася довше ніж 1 млн років. Зважаючи на оцінку кількості інверсій для періоду 560—545 млн років тому близько 15 на 1 млн років і навіть більше, накопичення трапів відбулося протягом не більше ніж за 0,5 млн років, що вказує на аномальну гіперактивність змін магнітного поля. Аномальна поведінка поля підтверджується низькими значеннями напруженості, яка була визначена на зразках волинських базальтів (2,6— 13,0 мкТл). Розраховані величини віртуального дипольного моменту як по базальтах з кар'єрів ((0,4—1,0)·10<sup>22</sup> Am<sup>2</sup>), так і зі свердловин ((0,3—1,0)·10<sup>22</sup> Am<sup>2</sup>) [Shcherbakova et al., 2020; Thallner et al., 2022], що майже на порядок нижче за величину сучасного геомагнітного поля (~50 мкТл) і узгоджується з низькими значеннями напруженості поля з інших районів Балтики і Лаврентії [Bono et al., 2019; Domeier et al., 2023].

Зважаючи на отримані нові дані про палеомагнітні полюси, частоту інверсій та аномально низьку напруженість в едіакарії, наші результати можна пояснити у рамках гіпотези, згідно з якою геомагнітне поле на межі докембрію та кембрію відрізнялося від геомагнітного поля більшості наступних епох, було аномальним і характеризувалося двома різними квазістабільними режимами генерації, які змінювали один одного. Чергування тривалих періодів панування аксіального дипольного поля з відносно короткочасними (тривалістю близько сотень тисяч років) епохами інверсуючого екваторіального (або середньоширотного) диполя відповідає теоретичним і модельним розрахункам. Обидві конфігурації визначаються комбінацією електричної провідності і в'язкості провідного флюїду і потужністю провідного шару. Ці параметри залежать від значень теплового потоку в ядрі та на межі ядро—мантія, складу, розміру та віку внутрішнього ядра, теплових властивостей мантії тощо, тобто від характеристик, які для геологічної історії Землі залишаються недостатньо з'ясованими.

Аномальне магнітне поле едіакарію може бути обумовлене ослабленням дипольної компоненти, і тоді виникає питання: якщо була така конфігурація поля, то чи можуть палеомагнітні полюси, розраховані для цього часового інтервалу, використовуватися для побудови адекватних палеогеографічних реконструкцій? Це також стосується тестування гіпотези геоцентричного осьового диполя, яка є основою для палеомагнітних реконструкції дрейфу континентів.

Інша гіпотеза стосується феномену «кембрійського вибуху». При такому слабкому «геомагнітному захисті» магнітосфери Земля могла піддавалася сильному впливу ультрафіолетового випромінювання. Едіакарська біота містить найдавніші багатоклітинні організми, які еволюціонували за досить короткий період (575—541 млн років тому). Ймовірний зв'язок між аномальними величинами (конфігурацією) геомагнітного поля та еволюцією біоти розглядається в низці публікацій (див., наприклад, [Bono et al., 2019; Huang et al., 2024] і посилання в них), де зроблено висновки, що геомагнітні умови (у геологічному масштабі часу) можуть змінюватися досить швидко і радикально впливати на навколишнє середовище. Поєднання наднизького дипольного моменту та гіперактивного режиму генерації геомагнітного поля могло впливати на еволюцію життя в едіакарії через особливість геометрії поля під час центральної фази інверсій, коли магнітні полюси розташовані поблизу екватора. При такій конфігурації поля сонячне і космічне випромінювання буде набагато глибше проникати у верхні шари атмосфери та стимулювати магнітні бурі, поле збурень яких буде більшим відносно головного геомагнітного поля.

## Список літератури

- Бахмутов В.Г., Поляченко Е.Б., Черкес С.И., Щербакова В.В., Главацкий Д.В. Палеомагнетизм вендских траппов Волыни, югозападная окраина Восточноевропейской платформы. Ч. 1: палеомагнитные направления и полюсы. *Геофиз. журн.* 2021. Т. 43. № 6. С. 70—119. https://doi.org/10.24028/gzh. v43i6.251555.
- Глевасская А.М., Кравченко С.Н., Косовский Ю.А. Магнитостратиграфия трапповой формации юго-западной окраины Восточно-Европейской платформы. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 5. С. 121—130.
- Гожик П.Ф. (Ред.). (2013). Стратиграфія верхнього протерозою та фанерозою України у двох томах. (Т.1). Стратиграфія верхнього протерозою, палеозою та мезозою України. Київ: Логос, 637 с.
- Bakhmutov, V., Poliachenko, I., Cherkes, S., &

Висновки. За результатами палеомагнітних досліджень трапів Волині та осадових порід Поділля підтверджується гіпотеза про аномальну поведінку геомагнітного поля в едіакарії з частою зміною полярності та дуже низькою напруженістю, майже на порядок нижчою за сучасну. Геомагнітне поле на межі докембрію та кембрію суттєво відрізнялося від поля більшості наступних епох фанерозою і характеризувалося наявністю квазістабільних режимів генерації, які змінювали один одного. Гіпотетично це можна пояснити процесами, що передували утворенню твердого внутрішнього ядра та геометрією магнітного поля Землі в періоди його наднизької інтенсивності. Це ставить під сумнів застосування гіпотези геоцентричного осьового диполя для інтерпретації палеомагнітних даних на границі едіакарію — кембрію, чим можна пояснити існування різних груп палеомагнітних полюсів і проблеми палеогеографічних реконструкцій для цього періоду. Такі «геомагнітні умови» (у геологічному масштабі часу) могли радикально впливати на навколишнє середовище і на еволюцію біоти.

Hlavatskyi, D. (2022). Palaeomagnetism of the Vendian traps of Volyn, southwestern margin of the East European Platform, part 2: magnetostratigraphy. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(6), 3—23. https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273638

- Bono, R.K., Tarduno, J.A., Nimmo, F., & Cottrell, R.D. (2019). Young inner core inferred from Ediacaran ultra-low geomagnetic field intensity. *Nature Geoscience*, 12(2), 143—147. https://doi.org/10.1038/s41561-018-0288-0.
- Domeier, M., Robert, B., Meert, J.G., Kulakov, E.V., McCausland, P.J.A., Trindade, R.I.F., & Torsvik, T. H. (2023). The enduring Ediacaran paleomagnetic enigma. *Earth-Science Reviews*, 242, 10444. https://doi.org/10.1016/j. earscirev.2023.104444.
- Elming, S. A., Kravchenko, S. N., Layer, P., Rusakov, O. M., Glevasskaya, A. M., Mikhailova, N. P., & Bachtadse, V. (2007). Palaeomag-

netism and 40Ar/39Ar age determinations of the Ediacaran traps from the southwestern margin of the East European Craton, Ukraine: relevance to the Rodinia break-up. *Journal of the Geological Society*, *164*(5), 969—982. https:// doi.org/10.1144/0016-76492005-163.

- Huang, W., Tarduno, J.A., Zhou, T. et al. (2024). Near-collapse of the geomagnetic field may have contributed to atmospheric oxygenation and animal radiation in the Ediacaran Period. *Communications Earth & Environment, 5*, 207. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01360-4.
- Nawrocki, J., Boguckyj, A., & Katinas, V. (2004). New Late Vendian palaeogeography of Baltica and the TESZ. *Geological Quarterly*, 48(4), 309—316.
- Shcherbakova, V.V., Bakhmutov, V.G., Thallner, D., Shcherbakov, V.P., Zhidkov, G.V., & Biggin, A.J. (2020). Ultra-low palaeointensities from East European Craton, Ukraine support a globally anomalous palaeomagnetic field in the Ediacaran. *Geophysical Journal International*, 220(3), 1928—1946. https://doi.org/10.1093/gji/ ggz566.
- Thallner, D., Shcherbakova, V., Bakhmutov, V., Shcherbakov, V., Zhidkov, G., Poliachenko, I., & Biggin, A. (2022). New palaeodirections and palaeointensity data from extensive profiles through the Ediacaran section of the Volyn Basalt Province (NW-Ukraine). *Geophysical Journal International*, 231(1), 474—492. https:// doi.org/10.1093/gji/ggac186.

# Ediacaran anomalous geomagnetic field: paleomagnetic data from the southwestern margin of the east European Platform

## V.G. Bakhmutov, I.B. Poliachenko, S.I. Cherkes, D.V. Hlavatskyi, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The results of palaeomagnetic studies of the Volyn trap formation and red beds of Podillia are presented. The geomagnetic field's anomalous behavior is confirmed, manifested in the discrepancy of paleomagnetic poles of the same age, a hyperactive mode of field polarity change, and extremely low values of field palaeointensity. These may be related to the problems of palaeogeographic reconstructions in the Ediacaran, as well as the drastic influence of geomagnetic conditions on the environment and biota evolution. **Key words:** geomagnetic field, Ediacaran, Volyn traps.

#### References

- Bakhmutov V.G., Poliachenko I.B., Cherkes S.I.,
  Shcherbakova V.V., & Hlavatskyi D.V. (2021).
  Palaeomagnetism of the Vendian traps of Volyn, southwestern margin of the East European platform. P 1: palaeomagnetic directions and poles. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(6), 70—119. https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251555 (in Russian)
- Glevasskaya A.M., Kravchenko S.N., & Kosovskiy Y.A. (2006). Magnetostratigraphy of the trap formation of the southwestern margin of the East European Platform. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 28(5), 121–130 (in Russian).
- Gozhyk, P.F. (Ed.). (2013). Stratigraphy of Upper Proterozoic and Phanerozoic of Ukraine. (Vol. 1). Stratigraphy of Upper Proterozoic, Paleozoic and Mesozoic of Ukraine. Kyiv: Logos, 637 p. (in Ukrainian).
- Bakhmutov V., Poliachenko I., Cherkes S., & Hlavatskyi D. (2022). Palaeomagnetism of the Vendian traps of Volyn, southwestern margin of the East European Platform, part 2: magnetostratigraphy. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(6), 3—23. https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273638.

Bono R.K., Tarduno J.A., Nimmo F., & Cot-

trell R.D. (2019). Young inner core inferred from Ediacaran ultra-low geomagnetic field intensity. *Nature Geoscience*, *12*(2), 143—147. https://doi.org/10.1038/s41561-018-0288-0.

- Domeier M., Robert B., Meert J.G., Kulakov E.V., McCausland P.J.A., Trindade R.I.F., & Torsvik T H. (2023). The enduring Ediacaran paleomagnetic enigma. *Earth-Science Reviews*, 242, 10444. https://doi.org/10.1016/j.earscirev. 2023.104444.
- Elming, S A., Kravchenko S N., Layer P., Rusakov O M., Glevasskaya A M., Mikhailova N P., & Bachtadse V. (2007). Palaeomagnetism and 40Ar/39Ar age determinations of the Ediacaran traps from the southwestern margin of the East European Craton, Ukraine: relevance to the Rodinia break-up. Journal of the Geological Society, 164(5), 969—982. https://doi. org/10.1144/0016-76492005-163.
- Huang W., Tarduno J.A., Zhou T. et al. (2024). Near-collapse of the geomagnetic field may have contributed to atmospheric oxygenation and animal radiation in the Ediacaran Period.

*Communications Earth & Environment*, *5*, 207. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01360-4.

- Nawrocki J., Boguckyj A., & Katinas V. (2004). New Late Vendian palaeogeography of Baltica and the TESZ. *Geological Quarterly*, 48(4), 309 316.
- Shcherbakova V.V., Bakhmutov V.G., Thallner D., Shcherbakov V.P., Zhidkov G.V., & Biggin A.J. (2020). Ultra-low palaeointensities from East European Craton, Ukraine support a globally anomalous palaeomagnetic field in the Ediacaran. *Geophysical Journal International*, 220(3), 1928—1946. https://doi. org/10.1093/gji/ggz566.
- Thallner, D., Shcherbakova V., Bakhmutov V., Shcherbakov V., Zhidkov G., Poliachenko I., & Biggin A. (2022). New palaeodirections and palaeointensity data from extensive profiles through the Ediacaran section of the Volyn Basalt Province (NW-Ukraine). *Geophysical Journal International*, 231(1), 474—492. https:// doi.org/10.1093/gji/ggac186.

УДК550.372/373+551.24.055

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322502

# Астеносфера України за даними геоелектричних досліджень

## Т.К. Бурахович, В.А. Ільєнко, А.М. Кушнір, А.Ю. Столпаков, Є.М. Тонковид, А.М. Бондар, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Вперше створено модель-схему геоелектричної астеносфери, параметри якої отримано за узагальненням моделей, побудованих на основі експериментальних електромагнітних даних. Підтверджено параметри трьох «нормальних» розрізів р<sub>н</sub> для різних за віком геологічних регіонів України. Аномалії високої електропровідності у верхній мантії мають складну конфігурацію, різну інтенсивність і глибину і не завжди відповідають геології. Астеносферу в південно-західних мегаблокахі локальних ділянках Інгульського мегаблока Українського щита, а також в південній частині Волино-Подільської плити виділено фрагментарно на глибинах від 50—70 до 120—160 км з питомим опором 20—50 Ом·м. Локальні об'єкти в Прип'ятсько-Дніпровсько-Донецькій западині мають схожі параметри. У Скіфській плиті визна-

Citation: Burakhovych, T.K., Ilienko, V.A., Kushnir A.M., Stolpakov A.Y., Tonkovyd, E.M., & Bondar, A.M. (2025). The asthenosphere of Ukraine according to geoelectric studies. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 181—187. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322502.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

чено аномальні області: кора—мантія (глибиною від 30—40 до 60 км з питомим опором 10 Ом·м) і верхня мантія (глибиною 60—90 км з питомим опором 100 Ом·м). У Карпатському регіоні астеносфера неоднорідна, ймовірно, складається з областей, які відрізняються за питомим опором і можуть розгалужуватися з глибиною. Підтверджено загальне заглиблення її верхньої межі на північний схід від 40 до 90—100 км.

Ключові слова: електромагнітні дослідження, питомий електричний опір, астеносфера, моделі різних геолого-тектонічних регіонів України.

Вступ. Дані електромагнітних досліджень відображають питомий електричний опір (р) всього літосферного розрізу, а отже, можуть бути одним з найважливіших джерел інформації для розуміння структури, складу і еволюції літосфери. Астеносфера за геоелектричними даними — це проміжний електропровідний шар у верхній частині мантії, на глибині з верхнім краєм приблизно від 50 до 200 км з р не більше 100 Ом·м і сумарною поздовжньою провідністю не менше 400 См, який, імовірніше, визначається частковим або повним плавленням речовини.

Тісний зв'язок розподілу р у надрах верхньої мантії з термодинамічними умовами та фазовим станом порід потребує розглядати параметри астеносфери з урахуванням віку геологічних структур. Зараз прийнято використовувати три «нормальні» розрізи  $\rho_{\rm H}$  з глибиною (рисунок) для різновікових геологічних регіонів України [Kushnir et al., 2021 та посилання в ній]. Так, докембрійські та герцинські характеризуються відсутністю астеносфери (в інтервалі глибин *H*=0÷160 км,  $\rho_{\rm H}$ =1000÷2000 Ом·м), кіммерійські ( $H=110\div140$  км,  $\rho_{\rm H}=40$  Ом·м) та альпійські (*H*=70÷170 км, <sub>рн</sub>=25 Ом·м) відрізняються збільшеною електропровідністю (σ) на мантійних глибинах. Досвід надглибинного дослідження мантії за даними геомагнітних обсерваторій України показав, що верхня мантія під Передкарпатським прогином, Причорноморською западиною та Скіфською плитою більш електропровідна, ніж під Українським щитом (УЩ). Ці дані якісно узгоджуються з «нормальними» розрізами до глибини ≈700 км.

Метою gahoï статті є створення та аналіз параметрів моделі-схеми геоелектричної астеносфери різновікових геологічних структур в Україні на підставі узагальнення результатів інтерпретації глибинних моделей розподілу ρ (різного ступеня від дво- до тривимірних), які отримано за експериментальними даними глибинного магнітотелуричного зондування і магнітоваріаційного профілювання.

Астеносфера тектонічних структур України. Сьогодні на території України завдяки багаторічним електромагнітним дослідженням Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України та роботам геофізичних організацій геологічної служби України накопичено величезний експериментальний матеріал. На його підставі побудовано та проінтерпретовано: 2D моделі Карпатської, Кіровоградської та інших аномалій електропровідності (АЕ), квазіЗD плівкові моделі, які надали уявлення про просторове поширення АЕ у земній корі та верхній мантії, регіональні та локальні 3D моделі розподілу р у надрах різних геологотектонічних регіонів України [Бурахович, Кушнір, 2023 та посиланням в ній].

УЩ, Волино-Подільська плита. Розподіл р на мантійних глибинах від 50—70 до 120 км відповідає «нормальному» для УЩ (див. рисунок, (1)), крім південно-західної частини, яку частково відокремлює на сході (майже субмеридіонально вздовж 30°сх.д.) тектонічна зона Одеса—Гомель, на півночі (майже субширотно вздовж 50°пн.ш.) Андрушівська зона розломів. Астеносферна область поширюється за межами УЩ на півдні Волино-Подільської плити (ВПП), де її північно-західна границя трасується між Сущано-Пержанською та Тетерівською зонами розломів. На півночі Молдавської плити можливо проходить її південна межа за Кишинівською зоною розломів. За параметрами астеносфера є неоднорідною та диференційованою за р та інтервалом

глибин: від 48° пн.ш. на північ (Подільський і південний захід Росинсько-Бузького мегаблоків УЩ та ВПП, див. рисунок, (1) а)  $\rho$ =50 Ом·м, *H*=70÷120 км, на південь (схил УЩ та північ Молдавської плити, див. рисунок 1, (1) b)  $\rho$ =25 Ом·м, *H*=50÷120 км. На південний захід спостерігається занурення верхньої кромки астеносфери до глибини 90—100 км (зона Тейссейре—Торнквіста) проте характер її з'єднання з астеносферою Карпатсько-Паннонського регіону залишається нез'ясованими (див. рисунок, (4) b).

Яворівська АЕ (див. рисунок, ① с) характеризуються астеносферою *H*=50÷ ÷100 км з р=70 Ом·м, яка пояснюється прогріванням надр та появою високомінералізованих флюїдів та/або можливим частковим плавленням порід, крім того, є прикладом прояву процесів новітньої активізації разом з Чернівецькою, Бельцькою, Тарханкутською та іншими АЕ, які вишиковуються вздовж західної та південнозахідної межі Східноєвропейської платформи (СЄП).

Можна припустити існування кількох локальних осередків (*H*=50÷120 км,  $\rho$ =50 Ом·м) в Інгульському мегаблоці УЩ (див. рисунок, (1) d) уздовж трансрегіонального шва Херсон—Смоленськ.

Більш впевнено можна уявити існування мантійного провідника в області півдня центральній частині УЩ та його схилу (див. рисунок, (1) е). Його максимальне поширення на північ до 47°40' пн.ш. спостерігається вздовж Кіровоградської АЕ, у зоні віялоподібного сходження глибинних розломів — Західноінгулецького, Криворізько-Кременчуцького та ін. На північний схід (до 48° пн.ш. і 34° сх.д.) можна припустити занурення астеносфери на глибину 125—160 км (р=20 Ом·м) під південним заходом Середньопридніпровського мегаблока УЩ та його схилу (див. рисунок, (1) f). За геоелектричними параметрами та просторовим розподілом, ймовірно, що астеносферні області під західною та центральною частинами УЩ гальванічно пов'язані.

За результатами 1D інверсії експериментальних геоелектричних досліджень Приазовського мегаблока можна припустити наявність глибинної коромантійної (*H*=10÷50 км) низькоомної (р≈100 Ом·м) ділянки, що розташована біля межі Східного Приазов'я зі Скіфською плитою у районі Грузько-Єланчицької зони розломів (див. рисунок, ① g).

Прип'ятський прогин, Дніпровсько-Донецька западина та Донецька складчаста споруда. За сучасними геоелектричними дослідженнями Брагінсько-Лоєвського виступу і Чернігівського блока Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) виявлено східний край Прип'ятської АЕ, яка вирізняється глибиною астеносфери 50—100 км з р=20 Ом м (див. рисунок, (2) а).

Область Кіровоградської АЕ під ДДЗ (Лохвицький сегмент) характеризується ймовірно просторово ізольованими неоднорідностями у верхах мантії, які мають різні параметри:  $H=50\div160$  км,  $\rho=20$  Ом·м для об'єкта ізометричної форми з центром 50° пн.ш. і ЗЗ° сх.д., щомістить північ центральної частини УЩ, південний борт та осьову частину ДДЗ (див. рисунок, (2) b);  $H=20\div70$  км,  $\rho=50$  Ом·м та  $H=90\div150$  км,  $\rho=20$  Ом·м (за результатами 1D інверсії) для північного борту ДДЗ та півдня Воронезького кристалічного масиву (див. рисунок, (2) с).

На жаль, ідентифікація параметрів астеносфери Донецької складчастої споруди на разі неможлива з огляду на недостатню щільність експериментальних електромагнітних спостережень у широкому діапазоні періодів і значні неоднорідності σ порід, що залягають вище по розрізу, як поблизу поверхні (тобто точки реєстрації), так і в земній корі (на глибинах від 2 до 30 км отримано АЕ із сумарною поздовжньою провідністю від 500 до 20000 См). Проте у ранніх роботах І.І. Рокитянського зі співавторами (1994) присутня інформація про наявність (за профілем Амвросіївка—Луганськ) електропровідного шару (*H*=100÷120 км, ρ=40 Ом·м) ймовірно обмеженого простягання. Також у роботі І.М. Логвінова та О.С. Лисенко (1995) у рамках еквівалентності моделей вздовж геотраверсу Приморськ-Свато-



Рис. 1. Модель-схема геоелектричної астеносфери України: 1 — межа Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ); 2 — контур Українського щита (УШ); 3 — тектонічна зона Одеса—Гомель (О-Г) і трансрегіональний шов Херсон—Смоленськ (X-C); 4 — головні розломи (цифри в кружках) (1 — Тетерівський, 2 — Брусилівський, 3—Немирівський, 4—Тальнівський, 5—Первомайський, 6—Західноінгулецький, 7—Криворізько-Кременчуцький, 8 — Оріхово-Павлоградський, 9 — Азово-Павлоградський, 10 — Луцький, 11 — Сущано-Пержанський); 5 — контури регіональних аномалій електропровідності в земній корі: Кіровоградської (KI) і Карпатської (KA); 6 — області астеносфери та її параметри у «нормальних» розрізах р<sub>н</sub> з глибиною для різновікових геологічних регіонів України ((1) — докембрійські, (2) — герцинські, (3) — кіммерійські, (4) — альпійські); 7 — області астеносфери та її параметри (чисельник — значення питомого електричного опору, Ом·м, знаменник — інтервал глибин, км); 8 — зона Тейссейре — Торнквіста (ТТЗ); 9 — південна межа СЄП; 10 — межа Скіфської плити (СП). Мегаблоки УЩ: В — Волинський, Пд — Подільський, Р — Росинський, Бз — Бузький, Інг — Інгульський, СПд — Середньопридніпровський, Пр — Приазовський. Шовні зони: Гшз — Голованівська, І-Кшз — Інгулецько-Криворізька, О-Пшз — Оріхіво-Павлоградська. Сегменти ДДЗ: БЛв — Брагінсько-Лоєвський виступ, Чн — Чернігівський, Лх — Лохвицький, Із — Ізюмський, Дб . Донбаський. Складчасті системи: Добруджі (Д), Криму (Кр), Карпат (К). *Прогини К*: Пк — Передкарпатський, Зк — Закарпатський; прогини СП: ПП — Переддобруджинський, КП — Каркінітський, ПКП — Північнокримський, І-К — Індоло-Кубанський; *підняття СП*: ЦКП — Центрально-Кримське. ВКМ схил Воронезького кристалічного масиву, ВПП — Волино-Подільська плита, ПУм — Південноукраїнська монокліналь, МП — Молдавська плита.

Fig. 1. Model-scheme of the geoelectric asthenosphere of Ukraine: 1 — border of the Dnipro-Donetsk Depression ( $\Delta\Delta3$ ); 2 — contour of the Ukrainian Shield (YIII); 3 — Odesa-Gomel tectonic zone (O- $\Gamma$ ) and Kherson-Smolensk transregional suture (X-C); 4 — main faults (numbers in circles) (1 — Teterivskyi, 2 — Brusylivskyi, 3 — Nemyrovskyi, 4 — Talnivskyi, 5 — Pervomaiskyi, 6 — Zakhidnoinguletskyi, 7 — Kryvyi Rih-Kremenchukskyi, 8 — Orikhovo-Pavlohradskyi, 9 — Azov-Pavlohradskyi, 10 — Lutskyi, 11 — Sushchano-Perzhanskyi); 5 — contours of regional anomalies of electrical conductivity in the earth's crust: Kirovograd (KI) and Carpathian (KA); 6 — asthenosphere regions and its parameters in «normal» sections  $\rho_n$  with depth for geological regions of Ukraine of different ages (1) — Precambrian, (2) — Hercynian, (3) — Cimmerian, (4) — Alpine); 7 — asthenosphere regions and its parameters (numerator — resistivity value, Ohm·m, denominator — depth interval, km); 8 — Teisseyre-Tornquist zone (TT3); 9

— southern boundary of the EEP; 10 — boundaries of the Scythian plate (CΠ). *Megablocks of the Ukrainian Shield*: B — Volynian, Π — Podolian, P — Rosynian, Б3 — Buzkyi, IHr — Ingulian, СПд — Sredneprydniprovskyi, Пр — Priazovskyi. *Suture zones*: Гш3 — Golovanivska, I-Кш3 — Ingulets-Kryvorizka, O-Пш3 — Orikhivo-Pavlohradska. *Segments of the Dnieper-Donets Basin*: БЛВ — Braginsko-Loyevskyi uplift, Чн — Chernihivskyi, Лх — Lokhvytsia, I3 — Izyumskyi, Дб — Donbas. *Fold systems*: Dobrudja (Д), Crimea (Кр), Carpathians (К); *K troughs*: Пк — Pre-Carpathian trough, 3к — Transcarpathian trough; *CΠ troughs*: ПП — Predobrogea, КП — Karkinitsky, ПКП — North Crimean, I-K — Indolo-Kuban; *uplift CΠ*: ЦКП — Central Crimean. BKM — Voronezh crystalline massif slope, ВПП — Volyno-Podolsk plate, ПУм — South Ukrainian monocline, МП — Moldavian plate.

ве міститься об'єкт на глибині 50—100 км з ρ=70 Ом∙м у північній частині профілю.

Добруджсько-Чорноморсько-Кримський регіон. Нагадаємо, що «нормальний» неактивізований розподіл вирізняється повсюдною астеносферою *H*=110÷140 км, ρ<sub>н</sub>=40 Ом⋅м (див. рисунок, (3)). Проте у 3D моделі в надрах південного борту Переддобруджського прогину і Північної Добруджі та Одеського шельфу він (за розрахунками) прийнятий з  $H=110\div160$  км,  $\rho_{H}=70$  Ом·м. Вище шару «нормальної» астеносфери виявлено значну кількість локальних аномалій різної конфігурації та р. Найдовша простягається з північного заходу (від Добруджського регіону, між двома глибинними розломами: Кілійським і Печенега-Камена, осьова частина аномалії відповідає Сулинській зоні розломів), перетинаючи північно-західний шельф Чорного моря (див. рисунок, (3) а), на південний схід (майже оминаючи Кримський регіон (див. рисунок, (3) b)) на коромантійних глибинах від 30—40 до 60 км з ρ=10÷100 Ом·м. Східніше в акваторії Чорного моря та південніше Керченського півострова (між Південнокерченським і Правдінським розломами) виявлено локальний ізометричної форми астеносферний об'єкт зі схожими параметрами (див. рисунок, (3) с). Складною конфігурацією практично ізометричної форми характеризується астеносфера шельфу Чорного моря та заходу Кримського регіону (на Скіфській плиті: Каркінітський та Північнокримський прогини та Центрально-Кримське підняття) з *Н*=60÷90 км,  $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (див. рисунок, (3) d). Локальну астеносферу з подібними параметрами виявлено у Сиваському грабені західніше Чонгарського розлому (див. рисунок, (3) е).

Карпатський регіон. Астеносферний

шар є характерною рисою «нормального» неактивізованого розподілу питомого опору в Карпатсько-Паннонському регіоні (див. рисунок, (4)). Загалом, вважається, що астеносфера поглиблюється (Н від 50—70 до 170 км, р=25 Ом·м) у напрямку від неогенового Паннонського басейну до СЄП, тобто повністю виклинюється під Передкарпатським прогином і відсутня в надрах на півночі Волино-Подільської монокліналі. За результатами 1D інверсії сучасних експериментальних електромагнітних досліджень астеносферу зафіксовано в Українських Карпатах в області від Закарпатського прогину до Скибових покривів. Вона не є однорідним шаром, ймовірно складається з ділянок, які диференційовані за опором і можуть розгалужуватися за глибиною. Підтверджено загальне поглиблення верхньої кромки астеносфери на північний схід від 40 до 90—100 км. Так, у Закарпатському прогині її параметри *H*=40÷160 км, ρ=20÷80 Ом⋅м (див. рисунок, (4) а), проте під Кросненським, Поркулецьким і Дуклянським покривами Н від 90—100 до 180—250 км, р=50÷100 Ом·м (див. рисунок, (4) b).

Висновки та обговорення. Основний результат електромагнітних досліджень території України полягає в тому, що геоелектричну астеносферу зафіксовано повсюдно в кіммерійських та альпійських утвореннях і лише фрагментарно під докембрійським УЩ. Відомо, що в нижній корі і мантії питомий електричний опір контролюється переважно кількістю та складом флюїду, пористістю та температурою, вмістом водню в номінально безводних мінералах, а також графітом [Unsworth, Rondenay, 2013; Selway, 2014; Lin et al., 2023]. Графітові плівки на границях мінеральних зерен також підвищують електропровідність, але тільки до верхів верхньої мантії, тому що стійкі до температур 900 °С. Флюїди, які надходять із субдукуючої плити або з плюму, можуть збагачувати літосферу воднем (насамперед, як незв'язаний елемент, він виділяється в процесі плавлення або високотемпературних тектононічних явищ) і вуглецем, що сприяє збільшенню її електропровідності.

### Список літератур

- Бурахович Т., Кушнір А. Історія, сучасний стан та перспективи геоелектромагнітних досліджень в Україні. Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Геологія. 2023. Т. 1. № 100. 58—66. https://doi.org/10.17721/1728-2713.100.07.
- Kushnir, A., Burakhovych, T., Ilienko, V., & Shyrkov, B. (2021). Geoelectrical properties of earth's crust and upper mantle rocks according to the 1D inversion results of DMTS curves. *European* Association of Geoscientists & Engineers. Geoinformatics (Vol. 2021, pp. 1—6). https://doi. org/ 10.3997/2214-4609.20215521116.

Lin, W., Yang, B., Han, B., & Hu, X. (2023). A Re-

Тобто, згідно з [Selway, 2014], літосфера може виступати як непряме відображення рівня її збагачення привнесеними елементами. Тому у статті [Lin et al., 2023] закликають при геолого-геофізичній інтерпретації спостережених високопровідних структур повністю враховувати геологічну обстановку та історію розвитку досліджуваної території.

view of Subsurface Electrical Conductivity Anomalies in Magnetotelluric Imaging. *Sensors, 23*(4), 1803. https://doi.org/10.3390/s2304 1803.

- Selway, K. (2014). On the Causes of Electrical Conductivity Anomalies in Tectonically Stable Lithosphere. Surveys in Geophysics, 35, 219— 257. https://doi.org/10.1007/s10712-013-9235-1.
- Unsworth, M., & Rondenay, S. (2013). Mapping the distribution of fluids in the crust and lithospheric mantle utilizing geophysical methods. *In Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock* (pp. 535—598). Berlin-Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/ 978-3-642-28394-9\_13.

# The asthenosphere of Ukraine according to geoelectric studies

## T.K. Burakhovych, V.A. Ilienko, A.M. Kushnir, A.Y. Stolpakov, E.M. Tonkovyd, A.M. Bondar, 2025

### S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

For the first time, a model-scheme of the geoelectric asthenosphere was created, the parameters of were obtained by generalizing the models built based on experimental electromagnetic data. The parameters of three «normal» sections of  $\rho_n$  for geological regions of Ukraine of different ages are confirmed. High electrical conductivity anomalies in the upper mantle have a complex configuration, different intensity and depth, and do not always correspond to the geology. The asthenosphere in the southwestern megablocks, local areas of the Ingul Megablock of the Ukrainian Shield, as well as the southern part of the Volyn-Podilsky Plate is picked fragmentarily from 50—70 to 120—160 km with anomalous resistivity of 20—50 Ohm·m. Local objects in the Pripyat-Dnipro-Donetsk Depression have similar parameters. The Scythian Plate has anomalous areas: crustal mantle (30—40 to 60 km deep with a resistivity of 10 Ohm·m) and upper mantle (60—90 km deep with a resistivity of 100 Ohm·m). In the Carpathian region, the asthenosphere is heterogeneous, probably consisting of regions that differ in resistivity and may branch with

depth. A general deepening of its upper boundary to the northeast from 40 to 90—100 km has been confirmed.

**Key words:** electromagnetic research, resistivity, asthenosphere, models of different geological and tectonic regions of Ukraine.

#### References

- Burakhovich, T., & Kushnir, A. (2023). History, current state and future prospects of geoelectromagnetic research in Ukraine. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 1(100), 58—66. https://doi.org/10. 17721/1728-2713.100.07 (in Ukrainian)
- Kushnir, A., Burakhovych, T., Ilienko, V., & Shyrkov, B. (2021). Geoelectrical properties of earth's crust and upper mantle rocks according to the 1D inversion results of DMTS curves. *European* Association of Geoscientists & Engineers. Geoinformatics (Vol. 2021, pp. 1–6). https:// doi.org/10.3997/2214-4609.20215521116.

Lin, W., Yang, B., Han, B., & Hu, X. (2023). A Re-

view of Subsurface Electrical Conductivity Anomalies in Magnetotelluric Imaging. *Sensors*, *23*(4), 1803. https://doi.org/10.3390/s2304 1803.

- Selway, K. (2014). On the Causes of Electrical Conductivity Anomalies in Tectonically Stable Lithosphere. Surveys in Geophysics, 35, 219– 257. https://doi.org/10.1007/s10712-013-9235-1.
- Unsworth, M., & Rondenay, S. (2013). Mapping the distribution of fluids in the crust and lithospheric mantle utilizing geophysical methods. *In Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock* (pp. 535—598). Berlin-Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/ 978-3-642-28394-9\_13.

УДК 550.34

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322503

# Про глобальну астеносферу Землі

# Гордієнко В.В., Логвінов І.М., 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Розглянуто прояви глобальної астеносфери на глибині близько 1000 км у даних геотермії, геоелектрики та сейсміки, отриманих за останні 20 років, та їх доповнення останнього часу. Вони являють собою включення глобальної астеносфери у число геосфер, що мають помітну радіогенну теплогенерацію, появу даних про електропровідність порід зони переходу від верхньої мантії до нижньої і відомостей про поширення швидкісних неоднорідностей в діапазоні глибин глобальної астеносфери.

Ключові слова: астеносфера, аномалії швидкості, температури, електропровідності.

Вступ. Ознаки глобальної астеносфери (ГА) у результатах сейсмологічних досліджень нижньої мантії були помічені вже 70 років тому. Г. Джеффріс та Б. Гутенберг, використовуючи критерій Ф. Берча  $(B = 1 - (d(V_P^2 - 1.33V_S^2)/dh)/g$ , де h — глиби-

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Gordienko, V.V., & Logvinov, I.M. (2025). About the global astenosphere of the Earth. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 187—192. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322503.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

на, *g* — прискорення вільного падіння), визначили на межі шарів С та D (на глибині 1000 км) зону зміни швидкостей сейсмічних хвиль (рис. 1). Вивчався зв'язок цієї аномалії зі зміною складу чи метаморфізму порід [Gutenberg, 1959].



Рис. 1. Зміна критерію *В* з глибиною: 1 — за Г. Джеффрісом, 2 — за Б. Гутенбергом.

Fig. 1. Changein criterion B withdepth: 1 - by G. Jeffris, 2 - by B. Gutenberg.



Рис. 2. Температури у нижній мантії Землі: 1— температура солідуса, 2— температура під платформою.

Fig. 2. Temperatures in the lower mantle of the Earth: 1 -solidus temperature, 2 -temperature under the platform.

Але з використанням референтних моделей увага до цього об'єкту зникла. Моделі PREM, IASP91, SP6, AK 135 та ін. не демонструють на 1000 км помітних відхилень від фонової зміни швидкості з глибиною.

Визначення глобальної астеносфери. У 1998 р. у двох публікаціях було наведено дані про шар підвищеної електропровідності та часткового плавлення у нижній мантії на глибині близько 1000 км [Гордиенко, 1998; Semenov, 1998]. В одному випадку це були 1D моделі за результатами магнітоваріаційного зондування в деяких пунктах Євразії [Semenov, 1998], у другому — розрахунки теплової історії планети (рис. 2).

Температуру на рис. 2 показано під докембрійською платформою, але в нижній мантії вона практично така сама під регіонами з усіма ендогенними режимами. Глибше 800 км розташований шар часткового плавлення з концентрацією рідини в перші відсотки. Доповнення геоелектричної інформації даними МТЗ та MBЗ з України та іншими суттєвими елементами



Рис. 3. Розподіл питомого опору (р) порід нижньої мантії за даними MB3.

Fig. 3. Distribution of specific resistance ( $\rho$ ) of lower mantle rocks according to MVZ data.

[Gordienko, Logvinov, 2011; Semenov et al., 2008] дало змогу сягнути рівня визначеності ГА, показаного на рис. 3.

Розподіл р досить впевнено вказує на мінімум у 0,5 Ом·м на тлі 1,5 Ом·м. Неясно тільки, чи свідчить така аномалія про на-явність часткового плавлення порід.

Спроби залучити для вивчення природи ГА сейсмологічні дані стосувалися матеріалу референтних моделей. Використовувалися більш «чутливі» параметри, ніж розподіли  $V_P$  та  $V_S$ . Це були  $dV_P/dh$  та  $V_P/V_S$ (рис. 4). Використано названі вище референтні моделі та модель Джеффріса—Буллена.

За наявними даними для верхньої мантії градієнт швидкості з глибиною у зоні солідусу скорочується приблизно на 30%. Це узгоджується з визначеною аномалією.



Рис. 4. Розподіл швидкісних параметрів порід нижньої мантії.

Fig. 4. Distribution of velocity parameters of lower mantle rocks.

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Таким же чином встановлено зміну  $V_P/V_S$ під впливом появи розплаву з концентрацією близько 2%. Вона становить 0,02—0,03, що суттєво менше від наведеного на рис. 4. Звісно, наведені висновки спираються на певні припущення і можуть слугувати лише опосередкованими аргументами на користь часткового плавлення у розглянутому інтервалі глибин. Але з такими даними природа ГА стає все більш вірогідною.

Отримані результати про існування та природу ГА підтверджували прогноз, зроблений на основі поліморфно-адвекційної гіпотези, що використано як один з аргументів для її визнання як теорії.

Додатковий розгляд та дискусія. В останній час робота з вивчення глобальної астеносфери була сконцентрована на кількох напрямках. 1. Для з'ясування її ролі у глибинних процесах потрібно було визначити енергетичні ресурси ГА. 2. Використання референтних моделей не дає змоги визначити розповсюдженість ГА, можливу кореляцію проявів з типами ендогенних режимів. Цього можна досягти тільки за умови вивчення конкретних швидкісних моделей мантії. З. Очевидною є спроба зіставити розподіл р нижній мантії, отриманий за даними МВЗ, з результатами лабораторних досліджень порід у відповідних PT-умовах. Враховуючи специфіку таких експериментів (зокрема, вибуховий тиск) можна стверджувати, що будуть досліджені тверді породи.

В останні роки вдалося помітно доповнити колекцію даних про накопичення радіоактивних елементів у період акреції Землі. Досвід побудови теплових моделей тектоносфери до глибин 400—700 км з використанням величин радіогенної теплогенерації у корі, верхній мантії та перехідній зоні до нижньої мантії демонструє стабільне досягнення позитивних результатів у сенсі відтворення геологічних явищ у різних ендогенних режимах і узгодженість із незалежно встановленими аномаліями щільності та швидкості. Це свідчить про достатньо точне знання розподілу теплогенерації і можливість припустити її величину на глибині глобальної астеносфери

[Gordienko, 2023 та ін.]. Таким чином отримуємо відповідь на перше із запитань про можливість участі ГА в активних процесах тектоносфери (таблиця).

Отриманий результат цілком логічний, бо зберігає частину радіоактивних елементів у нижньому фрагменті магматичного океану, де вони всі були сконцентровані у процесі диференціації речовини планети. Він відкриває перспективу вивчення активної ролі ГА. Стає зрозумілою відсутність землетрусів на глибинах дещо більше 700 км. До підошви глобальної астеносфери вони неможливі через низьку в'язкість у шарі часткового плавлення. Нижче ГА — через відсутність джерел енергії.

Відповідь на друге питання можна знайти у роботі [Ballmer et al., 2015], в якій наведено розповсюдження на територіях океанів і суходолу пунктів з наявними аномаліями розподілу швидкостей поздовжніх та поперечних сейсмічних хвиль (розривами) у діапазоні глибин 700—2000 км. Петрологічний та геодинамічний бік статті викликає багато заперечень і тут не розглядається. Отриманий авторами розподіл пунктів наведено на рис. 5.

Очевидно, що пункти з аномаліями на зазначеній глибині розповсюджені у регіонах океанів та континентів із практично всіма типами ендогенних режимів. Інтенсивність аномалій, представлену авторами статті у петрологічній та щільнісній термінології, можна вважати відповідною не менш як 0,1—0,2 км/с у швидкості. Це робить досить імовірним часткове плавлення порід.

Третє питання, яке було одним із предметів розгляду І.М. Логвіновим в останній час, вирішувалося у відборі потрібної інформації з публікацій про лабораторні дослідження електропровідності мінералів та гірських порід у різних *РТ*-умовах.

Відповідна література зараз практично

Donmonia	manianarren arren			$\mathbf{D}_{a}$	
PORIOAIA	ралюгенних лже	мех енептп	к осолонии	3em AIIE -	енеплят
гозподи	Pudioi cililla dice	pen enepin	D 000moniqi		cincprin,

Шар	Глибина, км	Об'єм, 10 <sup>12</sup> км <sup>3</sup>	ΤΓ, Вт/км <sup>3</sup>	<i>Е</i> , 10 <sup>12</sup> Вт
Кора	0—40	0,021	500	10,5
Верхня мантія	40—470	0,201	50	10,0
Перехідна зона	470—800	0,130	19	2.5
Глобальна астеносфера	800—1100	0,116	19	2,2



Рис. 5. Пункти визначення сейсмічних розривів у нижній мантії в діапазоні глибин від 700 до 2000 км (*a*) та гістограма розподілу глибин (*б*).

Fig. 5. Seismic discontinuities detection points in the lower mantle range from 700 to 2000 km (*a*) and depth distribution histogram ( $\delta$ ).



Рис. 6. Розподіл ρ порід мантії за даними лабораторних експериментів та модельних розрахунків. Fig. 6. ρ distribution of mantle rocks according to data from laboratory experiments and model calculations.

безмежна [Noler, 2005; Dai et al., 2020, etc.]. Кількість посилань у статтях часто перевищує сотню. Звісно, більшість стосується умов експерименту, обмежених діапазоном звичайного лабораторного обладнання, тобто — верхньої мантії. Але германатні імітаційні моделі та вибухові пристрої високого тиску надають можливість зазирнути у умови існування не тільки вайд-

#### Список літератури

- Гордиенко В. Глубинные процессы в тектоносфере Земли. Киев: Изд. ИГФНАНУ, 1998, 84 с.
- Ballmer, M., Schmerr, N., Nakagawa, T., & Ritsema, J. (2015). Compositional mantle layering revealed by slab stagnation at ~1000-km depth. *Science Advances*, 1(11). https://doi. org/10.1126/sciadv.1500815.
- Dai, L, Hu, H., Jiang, J., Sun, W., Li, H., Wang, M., Vallianatos, F., & Saltas, V. (2020). An Overview of the Experimental Studies on the Electrical Conductivity of Major Minerals in the Upper Mantle and Transition Zone. *Materials*, 13(2), 408. https://doi.org/10.3390/ma13020408.
- Gordienko, V. (2023). On energy balance of the tectonosphere. *Geodynamics*, (2), 62—71. https:// doi.org/10.23939/jgd2023.02.062.
- Gordienko, V. (2024). On the nature of the Earth's magnetic field. *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(6), 135—144.

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

слеїту та рингвудіту перехідної зони, а й у верхню частину нижньої мантії з перовскітом та магнезіовюститом. Звісно, у межах кожної індивідуальної моделі розподілу р у мантії залежність від глибини має вигляд комбінації «сходинок». Згладжений вигляд виникає під впливом об'єднання даних.

Для зіставлення з результатами глибинного MB3 було об'єднано дані шести моделей розподілу р (рис. 6).

Мінімальні значення питомого опору твердих порід на рис. 6 становлять 0,7 Ом·м, на рис. 3 — 0,5 Ом·м. Різниця невелика та все ж може слугувати вказівкою на часткове плавлення порід у глобальній астеносфері.

Висновки. Проведені за останні роки дослідження дозволили помітно підкріпити новими даними факт існування глобальної астеносфери та деталізувати уявлення про її властивості. Зараз вже можна припускати її участь у глобальному тепломасопереносі (хоча цей напрямок роботи ще не приніс конкретних результатів). Більш предметно (але поки що — гіпотетично) можна говорити про її участь у формуванні магнітного поля Землі [Gordienko, 2024].

- Gordienko, V., & Logvinov, I. (2011). The global asthenosphere. *Izvestiya*, *Physics of the Solid Earth*, 47(2), 109—116. https://doi.org/10.1134/ S1069351311010046.
- Gutenberg, B. (1959). *Physics of the Earth's interior*. New York: Acad. Press., 260 p.
- Nover, G. (2005). Electrical properties of crustal and mantle rocks. A review of laboratory measurements and their explanation. *Surveys in Geophysics*, 26, 593—651. https://doi.org/10. 1007/s10712-005-1759-6.
- Semenov, V.Yu. (1998). *Regional conductivity structures of the Earth's mantle*. Warsaw: Publ. of the Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci., 122 p.
- Semenov, V.Yu., Ádám, A., Jóźwiak, W., Ladanyvsky, B., Logvinov, I.M., Pek, J., Pushkarev, P., & Vozar, J. (2008). Electrical structure of the upper mantle beneath Central Europe: Results of the CEMES project. *Acta Geophysica*, 56(4), 957—981. https://doi.org/ 10.2478/s11600-008-0058-2.

# About the global astenosphere of the Earth

# V.V. Gordienko, I.M. Logvinov, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The article considers how the global asthenosphere manifests at a depth of about 1000 km in the geothermal, geoelectrical, and seismic data obtained over the past 20 years and recent data additions are considered. The represent include the inclusion of the global asthenosphere in the number of geospheres with noticeable radiogenic heat generation, the emergence of data on the electrical conductivity of rocks in the transition zone from the upper to the lower mantle, and the information on widespread velocity inhomogeneities in the global asthenosphere depth range.

**Key words**: asthenosphere, velocity anomalies, temperature anomalies, electrical conductivity anomalies.

#### References

- Gordienko, V. (1998). *Deep processes in the Earth's tectonosphere*. Kyiv: Publ. of the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 84 p. (in Russian).
- Ballmer, M., Schmerr, N., Nakagawa, T., & Ritsema, J. (2015). Compositional mantle layering revealed by slab stagnation at ~1000-km depth. *Science Advances*, 1(11). https://doi.org/10. 1126/sciadv.1500815.
- Dai, L, Hu, H., Jiang, J., Sun, W., Li, H., Wang, M., Vallianatos, F., & Saltas, V. (2020). An Overview of the Experimental Studies on the Electrical Conductivity of Major Minerals in the Upper Mantle and Transition Zone. *Materials*, 13(2), 408. https://doi.org/10.3390/ma13020408.
- Gordienko, V. (2023). On energy balance of the tectonosphere. *Geodynamics*, (2), 62—71. https://doi.org/10.23939/jgd2023.02.062.
- Gordienko, V. (2024). On the nature of the Earth's magnetic field. *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(6), 135—144.

- Gordienko, V., & Logvinov, I. (2011). The global asthenosphere. *Izvestiya*, *Physics of the Solid Earth*, 47(2), 109—116. https://doi.org/10.1134/ S1069351311010046.
- Gutenberg, B. (1959). *Physics of the Earth's interior*. New York: Acad. Press., 260 p.
- Nover, G. (2005). Electrical properties of crustal and mantle rocks. A review of laboratory measurements and their explanation. *Surveys in Geophysics, 26, 593—651.* https://doi.org/10. 1007/s10712-005-1759-6.
- Semenov, V.Yu. (1998). *Regional conductivity structures of the Earth's mantle*. Warsaw: Publ. of the Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci., 122 p.
- Semenov, V.Yu., Ádám, A., Jóźwiak, W., Ladanyvsky, B., Logvinov, I.M., Pek, J., Pushkarev, P., & Vozar, J. (2008). Electrical structure of the upper mantle beneath Central Europe: Results of the CEMES project. *Acta Geophysica*, *56*(4), 957—981. https://doi.org/10.2478/s11600-008-0058-2.

УДК 622.276.6

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322505

# Вплив ультразвуку на фільтрацію вуглеводню в пористому середовищі

А.П. Горовенко, Д.Б. Венгрович, Г.П. Шеремет, 2025

Інститут геофізики ім. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Проведено експериментальне дослідження впливу ультразвуку на фільтрацію вуглеводню в керні пористого середовища. З метою проведення дослідів було спроєктовано та виготовлено експериментальну установку. Для живлення п'єзовипромінювача використовувався генератор ГЗ-120 та підсилювач на потужних променевих тетродах, що дало змогу формувати ультразвук достатньо високої амплітуди.

**Ключові слова:** ультразвук, фільтрація вуглеводню, пористе середовище, навколосвердловинна область, дебіт свердловини.

Вступ. Дослідження дії ультразвуку на фільтрацію флюїду в нафтогазових пластах має важливе наукове та прикладне значення, зокрема для підвищення дебіту нафтових свердловин. Інтенсифікація видобутку покладів вуглеводнів за допомогою ультразвуку є перспективним напрямом з огляду на екологічність та малі витрати на технологію [Beresnev, Jonson, 1994]. Результати дослідів з акустичними хвилями свідчать про зміну поверхневого натягу та в'язкості рідини: в процесі обробки ультразвуком зменшується тертя між породою та флюїдом і, як наслідок, підвищується рухливість флюїду та поліпшується фільтрація вуглеводню. Деякі автори вважають, що може мати місце резонансний характер взаємодії ультразвуку з пористим середовищем і вказують на можливість кавітації на стінках капілярів у пористому середовищі. Існують різні точки зору на фізичні механізми фільтрації, що вказує на складність явища взаємодії ультразвуку з середовищем пластів і на необхідність проведення подальших лабораторних досліджень [Beresnev, Jonson, 1994]. У статті [Гутак, 2011] було досліджено вплив низькочастотних акустичних коливань на фільтрацію вуглеводнів у насипному середовищі за малих значень тиску, а в праці [Горовенко та ін., 2022] розглянуто фільтрацію вуглеводню керном піщаника для тисків до 10 бар при наявності низькочастотних акустичних коливань 2,6 кГц. Результати цих дослідів указують на перспективність використання акустичних коливань для обробки колекторів свердловин з метою поліпшення фільтрації вуглеводню пористим середовищем. Використання низькочастотних акустичних коливань обмежено завеликими розмірами випромінювачів акустичних коливань порівняно з величиною діаметра свердловини, тому більш перспективним вважають використання високочастотних коливань з малогабаритними випромінювачами. Ультразвук має більші градієнти тиску відносно розмірів пори, а також у разі його застосування має місце кавітація в рідині, що теж поліпшує фільтрацію вуглеводню пористим середовищем [Горовенко та ін., 2019].

**Об'єкти і методи досліджень.** Для практичного використання ультразвуку при обробці свердловин бажано в лабораторних умовах дослідити вплив високочастотних акустичних коливань на фільтрацію вуг-

Citation: Gorovenko, A.P., Vengrovich, D.B., & Sheremet, G.P. (2025). The effect of ultrasound on hydrocarbon filtration in a porous medium. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 193—196. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322505. Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



Рис. 1. Блок-схема експериментальної установки для дослідження фільтрації вуглеводнів за постійної температури: 1 — балон з газом (азотом) високого тиску, 2 — редуктор, 3 — ресивер, 4 — кернотримач, 5 — точні терези, 6 — генератор і підсилювач, 7 схема стабілізації температури мастила, X — крани, М — манометри.

Fig. 1. A diagram of the experimental setup for studying the filtration of hydrocarbons at constant temperature: 1 — high-pressure gas (nitrogen) cylinder, 2 — reducer, 3 — receiver, 4 — core holder, 5 — precision scales, 6 generator and amplifier, 7 — oil temperature stabilization scheme, X — taps, M — pressure gauges.

леводню пористим середовищем. Для виконання таких дослідів авторами було розроблено і виготовлено експериментальну установку (рис. 1).

Конструкцію кернотримача, в якому відбувається фільтрація вуглеводню, наведено на рис. 2. Кернотримач заповнений вуглеводнем і має вигляд двох циліндричних сталевих стаканів з фланцями з отворами, а болти з гайками фіксують фланці і герметично з'єднують стакани в одне ціле. Через герметичні штуцери у верхній частині кернотримача надходить мастило під заданим тиском від ресивера та електричний сигнал від генератора електричних сигналів та підсилювача до п'єзовипромінювача ультразвуку. Внизу кернотримача знаходиться керн та отвір для фільтрованої керном рідини. Маса рідини надалі фіксується точними електронними терезами. Усередині кернотримача знаходяться випромінювач акустичних коливань, нагрівач вуглеводню, датчик температури для схеми стабілізації температури. Як випромінювач використовують п'єзовипромінювач Ланжевена, а його живлення здійснюється за допомогою ге-





Fig. 2. Design of a core holder for experiments on hydrocarbon filtration.

нератора ГЗ-120 і потужного підсилювача з лінійною характеристикою та високовольтним виходом для випромінювача ультразвуку. Стабілізація температури вуглеводню досягається за допомогою датчика температури, цифрової схеми стабілізації XW-3002 і нагрівача. Для регулювання тиску у вуглеводні використано газовий балон з азотом, редуктор і ресивер. Заповнений вуглеводнем ресивер з одного боку з'єднаний з кернотримачем, а з іншого — з редуктором і манометрами.

**Результати досліджень**. На базі експериментальної установки були проведені



Рис. 3. Залежність потоку фільтрованого вуглеводню (мастила) *N* від тиску *P*, ультразвукові коливання відсутні.

Fig. 3. Dependence of filtered hydrocarbon (engine oil) flow N on pressure  $P_r$  with no ultrasonic vibrations.

досліди з фільтрації моторного мастила керном піщаника в полі високочастотних коливань — ультразвуку. Проведено експериментальні дослідження фільтрації мастила для різних тисків в кернотримачі за постійної температури вуглеводню (T=50 °C). Вимірювання виконували для одного значення тиску в кернотримачі спочатку без акустичних коливань, потім при наявності ультразвуку, а далі переходили до іншого значення тиску. На графіку наведено отримані експериментальні результати для випадку відсутності ультразвукових коливань у кернотримачі (рис. 3).

На рис. 4 наведено залежність потоку фільтрованого мастила у випадку дії ультразвукових коливань на керн.

На підставі отриманих експериментальних результатів можна зробити висновок,

#### Список літератури

- Горовенко А.П., Венгрович Д.Б., Осташко В.Ю. Спосіб ультразвукової обробки отворів фільтра нафтової свердловини. Пат. на корисну модель № 139290. Зареєстр. 26.12. 2019.
- Горовенко А.П., Венгрович Д.Б., Шеремет Г.П. Фільтрація вуглеводнів кернами пористого середовища в полі акустичних коливань. *Геоінженерія.* 2022. № 7. С. 17—22. https:// doi.org/10.20535/2707-2096.7.2022.267556.



Рис. 4. Залежність потоку фільтрованого мастила *N* від тиску *P* при наявності ультразвукових коливань у кернотримачі.

Fig. 4. Dependence of filtered hydrocarbon (engine oil) flow N on pressure P, with ultrasonic vibrations.

що ультразвукові коливання поліпшують фільтрацію вуглеводню пористим середовищем, потік фільтрованого керном мастила збільшується на 25 % порівняно з потоком фільтрованого мастила без ультразвукових коливань. Залежність величини фільтрації вуглеводню від тиску відповідає закону Дарсі.

Висновки. Проведені експериментальні дослідження показали, що ультразвук підвищує інтенсивність фільтрації вуглеводню (моторного мастила) у досліджуваному піщанику на 25 %. Залежність потоку фільтрованого вуглеводню від тиску є лінійною.

Отримані результати важливі для розробки технології очистки навколофільтрової області свердловин від кольматанту, покращання фільтрації вуглеводню та підвищення дебіту свердловин.

- Гутак О.І. Експериментальні дослідження впливу пружних коливань на зміну фільтрації нафто водяної суміші. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2011. № 3(29). С. 53—56.
- Beresnev, I.A., & Johnson, P.A. (1994). Elastic-wave stimulation of oil production: A review of methods and result. *Geophysics*, *59*(6), 1000—1017. https://doi.org/10.1190/1.1443645.

# The effect of ultrasound on hydrocarbon filtration in a porous medium

## A.P. Gorovenko, D.B. Vengrovich, G.P. Sheremet, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The paper presents an experimental study of the effect of ultrasound on hydrocarbon filtration in a porous medium core. An experimental setup was designed and manufactured to conduct the experiments. A GZ-120 generator and an amplifier on powerful beam tetrodes are used to generate ultrasound of sufficiently high amplitude.

**Key words:** ultrasound, hydrocarbon filtration, porous medium, near-wellbore area, flow rate of a well.

#### References

- Gorovenko, A.P., Vengrovych, D.B., & Ostashko, V. Yu. (2019). *Ultrasonic method treatment of oil well filter holes*. Utility model patent №139290, registered on 12.26.2019 (in Ukrainian).
- Gorovenko, A.P., Vengrovych, D.B., & Sheremet, G.P. (2022). Filtration of hydrocarbons by cores of a porous medium in the field of acoustic vibrations. *Geoengineering*, (7), 17—22. https://doi.org/10.20535/2707-2096. 7.2022.267556 (in Ukrainian).
- Gutak, O.I. (2011). Experimental studies of the effect of elastic vibrations on the change in filtration of an oil water mixture. *IFNTUNG scientific bulletin*, (3), 53—56 (in Ukrainian).
- Beresnev, I.A., & Johnson, P.A. (1994). Elastic-wave stimulation of oil production: A review of methods and result. *Geophysics*, 59(6), 1000—1017. https://doi.org/10.1190/1.1443645.

УДК 622.276.6

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322504

# Дія поверхнево активних речовин на фільтрацію вуглеводнів пористим середовищем

## А.П. Горовенко, Д.Б. Венгрович, Г.П. Шеремет, 2025

Інститут геофізики ім. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Проведено експериментальне дослідження впливу поверхнево-активної речовини на фільтрацію вуглеводню керном пористого середовища. Отримано залежності величини потоку фільтрованого керном вуглеводню від тиску за постійної температури. Встановлено, що поверхнево-активна речовина ефективно впливає на фільтрацію вуглеводнів пористим середовищем і збільшує фільтрацію вуглеводню на десятки

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Citation: Gorovenko, A.P., Vengrovich, D.B., & Sheremet, G.P. (2025). The effect of surfactants on hydrocarbon filtration by porous media. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 196—199. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322504.

процентів. Використання поверхнево-активної речовини для обробки навколофільтрового простору нафтової свердловини дає змогу підвищувати дебіт свердловини. Ключові слова: поверхнево-активні речовини, фільтрація вуглеводнів, пористе середовище, дебіт, свердловина.

Вступ. Для підвищення дебіту діючих нафтових свердловин перспективним є використання поверхнево-активних речовин (ПАР). Така технологія має високу ефективність, її розвитку приділяють значну увагу [Кондрат, 2012; Бурачок, Кондрат, 2018]. За будовою молекул прийнято поділяти ПАР на класи: іоногенні (аніонні, катіонні) і неіоногенні. Аніоноактивні ПАР містять у складі молекули полярні групи, які дисоціюють у водних розчинах з утворенням негативно заряджених іонів [Кондрат, 2012]. Катіоноактивні ПАР, на відміну від аніоноактивних, дисоціюють у водному розчині з утворенням позитивно зарядженого поверхнево-активного іону. Неіонні ПАР не дисоціюють з утворенням іонів, вони взаємодіють з оточуючим середовищем за рахунок сил Ван-дер-Ваальса. ПАР концентруються на міжфазних поверхнях розділу і через свої властивості змінюють параметри системи, зокрема коефіцієнт поверхневого натягу між фазами рідинатверде тіло.

Ефективність оброблення привибійної зони пласта ПАР залежить від великої кількості чинників як геолого-промислових, так і технологічних, що зустрічаються під час проведення конкретного методу інтенсифікації [Кондрат, 2012]. До геологопромислових відносяться: стадія розробки покладу, змочуваність породи, тип колектора та нафти, неоднорідність колектора за проникністю та ін. До технологічних чинників відносяться: тип ПАР та їх концентрація, кількість обробок тощо. Для інтенсифікації свердловин застосовують різні ПАР [Бурачок, Кондрат, 2018]. Як показує практика, у нафтогазовій галузі України застосовуються комплексні речовини із суміші кількох компонентів, до складу яких входять різноманітні ПАР, оскільки важко знайти лише одну речовину, яка б задовольняла всі вимоги окремо взятого родовища.

Результати дослідів з ПАР свідчать про зміну поверхневого натягу та в'язкості вуглеводнів, зменшення тертя між породою та флюїдом і, як наслідок, про зростання рухливості флюїду. Існують відмінні точки зору на використання ПАР у різних геологічних умовах, що вказує на складність механізмів взаємодії ПАР з середовищем пластів і на необхідність проведення подальших лабораторних досліджень.

Об'єкти та методи досліджень. Блоксхему експериментальної установки для дослідження фільтрації вуглеводнів пористими мінералами (пісковик, вапняк тощо) при різних тисках, наведено в публікації [Горовенко та ін., 2022]. Установка складається з керноутримувача, заповненого вуглеводнем, і блоку зміни тиску в керноутримувачі. Надалі установку вдосконалили: до неї було додано цифрову схему стабілізації температури, що дало змогу проводити вимірювання фільтрації за постійної заданої температури вуглеводню. До складу схеми стабілізації температури входять нагрівач, цифровий термометр для контролю та прилад стабілізації температури XN-W3002, який автоматично вмикає та вимикає нагрівач залежно від температури вуглеводню, яка впливала на величину термоопору, зануреного у вуглеводень. На основі експериментальної установки були проведені досліди з фільтрації керном піщаника моторного мастила з домішкою ПАР ОП-10. У дослідах з фільтрації вуглеводнів використано промисловий ПАР ОП-10. Ця речовина має хімічну формулу O(CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-O) *n*CH<sub>2</sub>–OH; *n*=10÷12. Отримано ОП-10 за допомогою обробки моно- та діалкілфенолів етиленоксидом. ОП-10 — це неіонна ПАР, її можна використовувати разом з аніонними та катіонними ПАР для обробки нафтових свердловин.

Розчини для обробки свердловин готуються з різними значеннями масової



Рис. 1. Залежність потоку фільтрованого вуглеводню *N* від тиску *P*.

Fig. 1. Dependence of the flow of filtered hydrocarbon N on pressure P.

частки *k* ПАР: від 0,1 до 10 %, залежно від умов для конкретної свердловини [Бурачок, Кондрат, 2018]. У цих дослідах використано розчин *k*=3 % ПАР ОП-10, який ефективно зменшує поверхневий натяг і розчиняє солі та інші сполуки в порах, у такий спосіб поліпшуючи фільтрацію вуглеводню в пористому середовищі.

Результати досліджень. Проводились експериментальні дослідження фільтрації мастила за різних тисків і за постійної температури (*T*=55 °C). Вимірювання проводились спочатку для моторного мастила без ПАР, а потім з домішкою ОП-10. На графіку (рис. 1) наведено отримані експериментальні результати для випадку відсутності ПАР у вуглеводні.

#### Список літератури

Бурачок О.В, Кондрат О.Р. Сучасні технології та світовий досвід підвищення вуглеводневилучення із газоконденсатних родовищ. Матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. «Нафтогазова галузь: Перспективи нарощування ресурсної бази», 23—25 травня 2018 р. Івано-Франківськ, 2018, С. 210—213.

Горовенко А.П., Венгрович Д.Б., Шеремет Г.П.



Рис. 2. Залежність потоку фільтрованого вуглеводню з ПАР *N* від тиску *P*.

Fig. 2. Dependence of the flow of filtered hydrocarbon with surfactant N on pressure P.

На рис. 2 наведено залежність потоку фільтрованого мастила при наявності ОП-10 в мастилі.

Висновки. Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що наявність ПАР ОП-10 у вуглеводні покращує та підвищує фільтрацію вуглеводню пористими речовинами, а потік фільтрованого керном мастила збільшується на 22 % відносно потоку фільтрованого мастила, коли вуглеводень не містив ПАР. Залежність величини фільтрації вуглеводню від тиску є лінійною, згідно з законом Дарсі. Отримані результати важливі для розробки технології інтенсифікації нафтових свердловин за допомогою внесення ПАР в навколофільтровий простір свердловини.

Фільтрація вуглеводнів кернами пористого середовища в полі акустичних коливань. *Геоінженерія.* 2022. № 7. С. 17—22. https://doi.org/10.20535/2707-2096.7.2022.267556.

Кондрат Р.М. Технології видобування залишкової нафти з обводнених родовищ із застосуванням поверхнево-активних систем. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.* 2012. № 4(45). С. 30—38.

# The effect of surfactants on hydrocarbon filtration by porous media

## A.P. Gorovenko, D.B. Vengrovich, G.P. Sheremet, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

We studied the effect of a surface-active substance on the filtration of hydrocarbons by the core of a porous medium. The dependence of the flow rate of hydrocarbon filtered by the core on the pressure at constant temperature was obtained. It was established that the surface active substance effectively affects the filtration of hydrocarbons by a porous medium and increases hydrocarbon filtration by tens of percent. The use of surface-active substances to pre-treataround the filter space of an oil well allows for an increase in the well's flow rate.

**Key words:** surface active substances, hydrocarbon filtration, porous medium, flow rate, well.

#### References

- Burachok, O.V., & Kondrat, O.R. (2018). Modern technologies and world experience of increasing carbohydrate nonexposure from gas condensate fields. *Materials of the International Scientific and Technical Conference «Oil and gas Industry: Prospecting of resource base»*, *May* 23—25, 2018 (pp. 210—213). Ivano-Frankivsk (in Ukrainian).
- Gorovenko, A.P., Vengrovych, D.B., & Sheremet, G.P. (2022). Filtration of hydrocarbons by

cores of a porous medium in the field of acoustic vibrations. *Geoengineering*, (7), 17—22. https://doi.org/10.20535/2707-2096.7.2022. 267556 (in Ukrainian).

Kondrat, R.M. (2012). Technology of extraction of residual oil from flooded deposits with the use of surface-active systems. *Exploration and Development of oil and gas fields*, (4), 30—38 (in Ukrainian).

УДК 550.834; 550.34.06

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322506

# Прояви регіональних розломів на острові Зміїний

# Д.М. Гринь, А.С. Чулков, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

У результаті проведення інженерно-геофізичних вишукувань на обраних ділянках острова Зміїний було виявлено нові розломи та підтверджено розташування деяких відомих розломів. На острові проводилися сейсмічні дослідження з вивчення будовиосадового чохла, зони вивітрювання та цілісності корінних порід. Під час ін-

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Gryn, D.M., & Chulkov, A.S. (2025). Manifestations of regional faults on Zmiiny island. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 199—204. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322506.

терпретації отриманих на острові сейсмічних даних було детально вивчено будову деяких розломів, повністю накритих осадовим чохлом. Визначено ступінь розкриття розломів (ширина) та їх внутрішнє заповнення. Ортогональна схема розташування сейсмічних профілів дала змогу встановити азимути простягання виявлених розломів,що проходять через увесь острів. Виявлено збіг азимутів тектонічних розломів, розташованих в акваторії Чорного моря, та азимутів розломів, виявлених на острові. З цього можна зробити висновок, що острів, який є вершиною складки, знаходився під впливом тектонічних рухів, які сформували розломи: Голіцинський, Істрійський та Тротус.

**Ключові слова:** тектонічні розломи, інженерна геофізика, профіль, сейсмічна хвиля, геологічний розріз.

Вступ. Мета вишукувальних робіт на о. Зміїний — вивчити за допомогою інженерної сейсміки геологічну будову території, відібрану державним підприємством «Морська пошуково-рятувальна служба» (м. Одеса). Зокрема, визначити товщину осадових і перехідних порід (вивітрених), глибину залягання корінних порід, встановити наявність глибинних розломів і тріщин та оцінити можливості будівництва на обстеженій території певних об'єктів.

Для реалізації поставленого завдання на о. Зміїний було доставлено сейсмічне обладнання Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Для сейсмічного профілювання використовувалися два типи сейсмостанцій: однокомпонентні американські сейсмостанції Техап-125А (Reftek) і створені в Інституті геофізики НАН України трикомпонентні сейсмостанції SV. До однієї половини однокомпонентних станцій були під'єднанні сейсмічні датчики для реєстрації горизонтальних, до іншої — для реєстрації вертикальних рухів поверхні ґрунту.

Для вивчення геологічної будови та визначення ефективних значень швидкостей поширення сейсмічних хвиль у верхній частині розрізу були виконані польові вишукування з використанням методу заломлених хвиль (МЗХ) і відбитих хвиль (МВХ) згідно з [ДБН А.2.1-1-2014, 2014]. Сейсмічні датчики розставлялись уздовж профілів завдовжки 51 м. Глибина дослідження при ідеальних умовах становила 30 м. Відстань між сейсмостанціями 1 м. Генерування хвиль здійснювалося ударом 10-кілограмової кувалди по металевій плиті, яка знаходилася на поверхні землі під кутом 45° до горизонтальної осі профілю



Рис. 1. Проведення вишукувальних інженерно-геофізичних робіт: *а* — генерування сейсмічних хвиль, *б* — схема отримання сейсмічних даних.

Fig. 1. Exploration engineering and geophysical works: a — generation of seismic waves,  $\delta$  — scheme for obtaining seismic data.

(рис. 1). У такий спосіб відбувалося одночасне збудження поперечних і поздовжніх хвиль. Для зменшення впливу випадкових хвиль-завад проводилося 10-кратне накопичення сейсмічних даних на кожному пункті збудження сейсмічних хвиль.

Для встановлення будови середовища використано ортогональну (хрестоподібну) схему розташування пошукових профілів, яка за мінімальних витрат часу дає змогу отримати максимальну просторову інформацію про геологічну будову.

Збудження сейсмічних хвиль відбувалося біля кожної точки спостереження. Всього на кожному профілі було по 51 точці спостереження, де знаходилась пара сейсмостанцій — Texan-125A (Reftek) і SV. Сейсмостанцій SV використовувалися для отримання трикомпонентних високочастотних записів сейсмічного поля, які забезпечують підвищену роздільну здатність сейсмічних методів, оскільки ці сейсмостанції оцифровують аналоговий сигнал з дискретністю 2000 Гц [Гринь та ін., 2019; Гринь, Вербицький, 2019]. Високочастотні записи дають змогу виявляти сигнали, характерні для тонкошаруватих і тріщинуватих консолідованих порід, з яких складаються скельні породи о. Зміїний.

Результати досліджень. Незначна тов-

щина осадового чохла і наявність щільних порід робить сейсмічні записи високочастотними з високою роздільною здатністю та можливістю виявляти тріщини або розломи. У сейсмічних даних спостерігається явище, характерне для сейсмограм з островів — аномально високий рівень низькочастотних гармонік (1—7 Гц), які створюють морські хвилі та вітер.

Швидкість поширення сейсмічних хвиль  $V_p$  осадового чохла на ділянці спостереження є непостійною і змінюється як за глибиною, так і у просторі. Середні значення швидкості (260—345 м/с) свідчать про однорідність і присутність невеликої кількості уламків щільних порід. Максимальна товщина осадових порід становить 2 м. Збільшення швидкості з глибиною відбувається стрибкоподібно (з великим градієнтом швидкості), що вказує на незначну зону вивітрювання у корінних порід. Значення швидкості у корінних породах на профілі є також непостійними і коливаються у межах 2500 м/с.

Аналізуючи хвильове поле твердих порід флішеподібної товщі, можна зробити висновок про його блокову структуру через присутність різних за розміром тектонічних тріщин, сформованих під час складкоутворення. За сейсмічними даними



Рис. 2. Приклад сейсмічного розрізу ортогональної групи профілів. Жовтим кольором позначено осадові породи (низькошвидкісні), коричневим і блакитним — конгломерато-брекчієву та пісковиково-конгломератову товщі.

Fig. 2. Example of a seismic section of an orthogonal group of profiles. Sedimentary rocks (low-velocity) are marked in yellow, conglomerate-breccia and sandstone-conglomerate strata are marked in brown and blue.



Рис. 3. Зображення розломів, виділених на території о. Зміїний: сині лінії — розломи з карти Г.Г. Ткаченка, накладені на сучасну топографічну основу острова, червоні — розломи, виявлені під час інженерно-геофізичних вишукувань, чорні — азимути розломіву акваторії Чорного моря; 1—3 — напрямки пролягання розломів (1 — Голіцинського, спорідненого з Головним Азовським розломом, 2 — Тротус, 3 — Істрійського).

Fig. 3. The faults on Zmiiny Island: blue lines — faults from the map of G.G. Tkachenko superimposed on the current topographical base of the island, the red lines are faults revealed during engineering and geophysical excavations, black lines — azimuths of faults in the Black Sea; 1—3 — directions of the faults (1 — Golitsinskyi Fault, which is connected with the Golovnyi Azovskyi Fault, 2 — Trotus, 3 — Istrian).

(рис. 2) виділяються блоки розміром від 2 до 5 м завдовжки (у горизонтальному напрямку) з невеликим нахилом. Тріщини місцевого походження мають розміри від сантиметрів до десятків сантиметрів. На сейсмограмах ознаки розломів і тріщин присутні переважно як зникання та поява нових фаз сейсмічної хвилі. Наявні розломи збігаються з вертикальним напрямком простягання блокової структури корінних порід, що свідчить про їх певну участь у тектонічному формуванні острова як частини складчастої зони.

У результаті проведених вишукувальних робіт методами M3X і MBX на о. Зміїний було виявлено два розломи, азимути розповсюдження яких збігаються з відомими розломами — Голіцинським (який за напрямком збігається з Головними Азовським розломом) та Істрійським розломами.

Головний Азовський розлом в Азовському морі виділяється у швидкісній моделі 12-кілометровим неузгодженим за швидкостями контактом південної частини Азовського масиву та Скіфської плити [Starostenko et al., 2015]. На відстані 600 км, на о. Зміїний, зафіксовано розломну зону завширшки близько 10 м, яку можна віднести до південно-західного початку регіонального Голіцинського розлому, що узгоджується з теоретичними уявленнями, висвітленими в публікаціях [Фарфуляк, 2015; Starostenko et al., 2015]. Азимут зафіксованого сейсмічними методами розлому на острові збігається з високою точністю з азимутом Головного Азовського розлому, що може свідчити про їхнє спільне положення (рис. 3).

Виявлений методами інженерної геофізики розлом із південно-східним азимутом є розломом, закартованим у 1969 р. Г.Г. Ткаченком за результатами візуального огляду берегової лінії острова [Ткаченко, 1969]. Визначивши кут невідповідності нахилу схеми острова Г.Г. Ткаченка із сучасною топографічною основою острова, вдалось визначити істині азимути інших розломів, які були ним закартовані у 70-х роках минулого століття, і таким чином залучити їх до аналізу розломно-блокової будови о. Зміїний.

Виявлені на о. Зміїний розломи тісно пов'язані з розломами, які знаходяться в морській частині Скіфської плити. Зокрема, на формування острова, як тектонічної складки, вплинули Головний Азовський розлом, Істрійський розлом і Тротус. Ці розломні структури та загальна геологічна будова острова по лінії вишукувальних профілів є важливою складовою для фундаментальних і прикладних задач, зокрема будівництва різних споруд на острові та врахування їхнього впливу на сейсмічність острова.

**Висновки.** Під час проведення інженерно-геофізичних вишукувань на о. Зміїний було виявлено приповерхневі розломи, які пов'язані з основними розломами Чорноморського регіону. Ймовірно, на о. Зміїному починається Голіцинський розлом, уздовж якого розташовані найбільші відкриті родовища української частини

Список літератури

- Гринь Д.М., Вербицький С.Т. Автономні цифрові сейсмічні станції SV. *Геофиз. журн.* 2019. Т. 41. № 4. С. 125—144. https://doi.org/ 10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177376.
- Гринь Д.М., Вербицький С.Т., Дмитренко О.В. Адаптивний сейсмічний комплекс для інженерної геофізики. *Геоінформатика*. 2019. № 4(72). С. 65—73.
- ДБН А.2.1-1-2014 «Інженерні вишукування для будівництва». Додаток К в частині інженерно-геологічних та геотехнічних вишукувань, для уточнення будови геологічного розрізу, С. 92—93.
- Ткаченко Г.Г. Геология острова Змеиного (Черное море). Геология побережья и дна Черного и Азовского морей в пределах УССР. 1969. Вып. 3. С. 3—19.

Чорного моря. Проведена робота показує важливість подальшого вивчення геологічної будови острова як об'єкта, який пояснює геодинаміку формування прилеглих до нього територій.

- Фарфуляк Л.В. Природа наклонной сейсмической границы в земной коре Скифской микроплиты вдоль профиля DOBRE-5. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 6. С. 23—39. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i6. 2015.111172.
- Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Farfuliak, L., Czuba, W., Środa, P., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophysical Journal International, 201*, 406– 428. https://doi.org/10.1093/gji/ggv018.

# Manifestations of regional faults on Zmiiny island

## D.M. Gryn, A.S. Chulkov, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

As a result of engineering and geophysical surveys on selected areas of Zmiiny Island, new and confirmed locations of some known faults were discovered. Seismic studies were conducted on the island to study the structure of the sedimentary cover, the weathering zone, and the integrity of the bedrock. During the interpretation of seismic data obtained on the island, the structure of some faults completely covered by the sedimentary cover was studied in detail. The degree of opening of the faults (width) and their internal filling were determined. The orthogonal scheme of the location of seismic profiles allowed us to establish the azimuths of the strike of the detected faults that pass through the entire island. The azimuths of tectonic faults in the Black Sea coincided with those on the island. Thus, the island, which is at the top of the fold, was under the influence of tectonic movements that formed the Golitsynskyi, Istrian, and Trotus Faults.

**Key words:** tectonic faults, engineering geophysics, profile, seismic wave, geological section.

#### References

- Gryn, D.M., & Verbytsky, S.T. (2019). Autonomous digital seismic stations SVD. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 41(4), 125—144. https://doi.org/ 10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177376 (in Ukrainian).
- Gryn, D.M., Verbytsky, S.T., & Dmytrenko, O.V. (2019). Adaptive seismic complex for engineering geophysics. *Geoinformatics*, (4), 65—73 (in Ukrainian).
- SBS A.2.1-1-2014 «Engineering surveys for construction». (2014). Appendix K in the part of engineering-geological and geotechnical surveys, to clarify the structure of the geological section (pp. 92—93) (in Ukrainian).
- Tkachenko, G.G. (1969). Geology of Zmeinogo Island (Black Sea). Geology of the coast and bottom of the Black and Azov Seas within

the Ukrainian SSR, (3), 3–19 (in Russian).

- Farfuliak, L.V. (2015). The nature of inclined seismic boundary in the Earth crust of the Scythian plate along the DOBRE-5 Profile. *Geofizicheskiy Zhurnal*, *37*(6), 64—85. https://doi. org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i6.2015.111172 (in Russian).
- Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Farfuliak, L., Czuba, W., Środa, P., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophysical Journal International, 201*, 406– 428. https://doi.org/10.1093/gji/ggv018.

УДК 532.546; 537.322.2

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322507

# Нерівноважна фільтрація флюїду в неоднорідно забрудненій привибійній зоні свердловини

## І.І. Денисюк, І.А. Скуратівська, І.М. Губар, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

На основі математичного моделювання фільтрації флюїду в неоднорідному середовищі досліджено вплив забруднення привибійної зони пласта на продуктивність видобувної свердловини. Розглянуто модель нерівноважної фільтрації в напівнескінченному неоднорідному пласті з гармонічним збуренням на його межі. Використовуючи метод розділення змінних, отримано розв'язок крайової задачі, за допомогою якого встановлено вплив забруднення на продуктивність свердловини.

**Ключові слова:** нерівноважна фільтрація, узагальнений закон Дарсі, пористе середовище, забруднена привибійна зона свердловини, продуктивність свердловини.

Вступ. Ефективна робота всіх систем безшахтного видобування корисних копалин можлива лише при достатньо високій проникності гірських порід пластів, охоплених технологією робіт, а також при забезпеченні стійкого гідродинамічного зв'язку оточуючого породного масиву з технологічною свердловиною.

Проте при спорудженні та експлуатації нафтогазових свердловин відбуваються

Citation: Denysiuk, I.I., Skurativska, I.A., & Hubar, I.M. (2025). Nonequilibrium fluid filtration in a heterogeneously contaminated near-wellbore zone. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 204—207. https://doi.org/10.24028/gj. v47i2.322507.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

техногенні зміни природних фільтраційних властивостей привибійної зони пласта (ПЗП), що спричинює зменшення продуктивності видобувних свердловин. Серед основних причин зменшення продуктивності є погіршення фільтраційних властивостей пласта через забруднення його твердими частинками, що проникають у поровий простір, перешкоджаючи фільтрації флюїду. У результаті навколо стовбура свердловини формується зона забруднення, що має складну будову та характеризується низкою особливостей. Тому виникає необхідність оцінити вплив забруднення на продуктивність свердловини з метою подальшої розробки рекомендацій і способів очищення ПЗП.

Традиційно вплив забруднення ПЗП на продуктивність свердловини досліджується на основі моделі, що складається з двох різних просторово-однорідних зон: забрудненої ПЗП з погіршеною проникністю та розташованої за нею зони з більшою проникністю, так звана «чиста» зона пласта. Зокрема, така найпростіша зонна модель проникності використовується у праці [Баренблатт и др., 1972] для оцінки впливу забруднення ПЗП на продуктивність нафтових свердловин. У публікації [Чекурін, Притула, 2017] викладено результати досліджень впливу коефіцієнта проникності на фільтраційні параметри.

Результати спеціальних лабораторних досліджень показали, що внаслідок техногенної дії (буріння, забруднення ПЗП під час експлуатації тощо) у ПЗП формується стійкий просторово-неоднорідний профіль проникності, який можна апроксимувати степеневою функцією [Ding et al., 2002].

Метою даного дослідження є визначення розв'язку крайової задачі нерівноважної фільтрації флюїду у напівнескінченному неоднорідному пласті з гармонічним збуренням на його межі, на основі якого досліджується вплив забруднення ПЗП на продуктивність свердловини. При цьому просторова зміна проникності у забрудненій ПЗП, як і у працях [Ding et al., 2002; Денисюк та ін., 2023], задається у вигляді степеневого закону. Математична модель нерівноважної фільтрації та постановка задачі. Врахування нерівноважності у процесі фільтрації здійснюється шляхом узагальнення класичного рівняння Дарсі [Скуратівський, Скуратівська, 2019]. Неоднорідність пласта визначається степеневими залежностями проникності від просторової координати. У цьому випадку плоско-паралельну нерівноважну фільтрацію флюїду в неоднорідному пористому середовищі пласта будемо описувати наступною лінеаризованою моделлю [Денисюк та ін., 2023]

$$\tau \left( u_t + \frac{k_f}{\mu} p_{xt} \right) + u + \frac{k_e}{\mu} p_x = 0,$$
  
$$\beta p_t + u_x = 0, \qquad (1)$$

де u — швидкість фільтрації; p — тиск;  $\beta = m_0 \beta_0$ ;  $m_0$  — початкова пористість породи пласта;  $\beta_0$ ,  $\beta_s$  — коефіцієнти об'ємної стисливості рідини та скелета породи пласта;  $k_{e'}$ ,  $k_f$  — рівноважний і заморожений коефіцієнти проникності породи пласта, відповідно,

$$k_e(x) = a/x^n$$
,  $k_f(x) = \theta k_e(x)$ ,  $\theta < 1$ .

Ì

Із системи рівнянь (1), виключивши швидкість фільтрації *и*, отримаємо рівняння нерівноважної фільтрації у пористому неоднорідному середовищі пласта

$$\tau \left(\frac{\theta a x^{-n}}{\beta \mu} p_{xxt} - p_{tt}\right) - \frac{n a x^{-n-1}}{\beta \mu} \left(p_x + \theta \tau p_{xt}\right) - p_t + \frac{a x^{-n}}{\beta \mu} p_{xx} = 0.$$
(2)

Результати досліджень. Використовуючи метод розділення змінних, побудовано комплекснозначний розв'язок модельного рівняння (2),нехтуючи початковими умовами, із гармонічною дією на межі пласта та обмеженості розв'язку на нескінченності у вигляді залежності:

$$\tilde{p}(x,t) = A\left(\frac{x}{r_c}\right)^{\frac{n+1}{2}} \frac{K_{\frac{n+1}{n+2}}\left(\frac{2\Omega}{n+2}x^{\frac{n+2}{2}}\right)}{K_{\frac{n+1}{n+2}}\left(\frac{2\Omega}{n+2}r_c^{\frac{n+2}{2}}\right)} \cdot e^{i\omega t}, (3)$$

де  $\Omega^2 = \frac{\beta \mu \omega i (1 + i \omega \tau)}{a (1 + i \omega \tau \theta)}$ ;  $K_{(n+1)/(n+2)}(\cdot)$  — модифікована функція Бесселя другого роду.

У загальному випадку виділення дійсних значень у розв'язку (3) пов'язано із значними труднощами. У зв'язку з цим, оскільки аргументи модифікованої функції Бесселя завдяки вибору частоти гармонічної дії ю значно перебільшують одиницю, скориставшись її асимптотичним наближенням для великих значень аргументів, отримаємо:

$$\tilde{p}(x,t) = A \left(\frac{x}{r_c}\right)^{n/4} \times \exp\left[-\frac{2\Omega}{n+2}r_c^{\frac{n+2}{2}} \left(\left(\frac{x}{r_c}\right)^{\frac{n+2}{2}} - 1\right)\right] \cdot e^{i\omega t} .$$
 (4)

Щоб дослідити вплив забруднення ПЗП на продуктивність свердловини, використовуючи узагальнений закон Дарсі (1) для дебіту та розв'язок задачі (4), визначено дебіти свердловини для пласта із забрудненою ПЗП  $\tilde{Q}(r_c,t)$  і для «чистого» пласта  $\tilde{Q}_0(r_c,t)$ . Порівнюючи ці дебіти, отримаємо формулу, що визначає відносний дебіт  $\bar{Q}$ :

$$\overline{Q} = \operatorname{Re} \frac{\widetilde{Q}(r_c, t)}{\widetilde{Q}_0(r_c, t)} = \left(\frac{r_c}{R_s}\right)^{-\frac{n}{2}} \times \left[1 + \frac{n\overline{\varphi}}{4(\overline{\varphi}^2 + \overline{\alpha}^2)r_c\sqrt{\frac{\omega}{2K_s}\left(\frac{r_c}{R_s}\right)^n}}\right], \quad (5)$$

де  $K_{S} = \frac{k_{s}}{\beta \mu}$  — п'єзопровідність «чистого» пласта;  $\overline{\phi}$ ,  $\overline{\alpha}$  — безрозмірні коефіцієнти визначаються за формулами, при-

#### Список літератури

- Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. *Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа*. Москва: Недра, 1972, 212 с.
- Денисюк І.І., Скуратівська І.А., Губар І.М. Загасання полів швидкостей під час нерів-

веденими у роботі [Denysiuk et al., 2024].

Як приклад, використовуючи формулу (5), зроблено числові розрахунки залежності  $\overline{Q}$  від параметрів зони забруднення: міри забруднення  $(\overline{K}_c = k_c/k_s)$  і розмірів зони забруднення  $(\overline{R}_S = R_S/r_c)$ . За результатами розрахунків встановлено, що вплив параметрів  $\overline{K}_c$ ,  $\overline{R}_S$  на приведені дебіти свердловини із забрудненою ПЗП є суттєвим.

Висновки. У дослідженнях розглядалися питання застосування математичних методів для оцінки впливу забруднення ПЗП на продуктивність свердловини та прогнозування фільтраційної динаміки в ньому, коли пористий масив ПЗП є неоднорідним за проникністю, а рух флюїду в ньому має ознаки нерівноважності. Для розв'язання такої задачі використовувалася класична континуальна модель фільтрації в'язкої рідини у напівнескінченному середовищі, коли його проникність (п'єзопровідність) є степеневою функцією за просторовою координатою, а на межі напівпростору задано гармонічне збурення. Використовуючи розв'язок цієї крайової задачі, показано суттєвий вплив параметрів забруднення ПЗП (міри забруднення, розмірів забрудненої зони) на продуктивність свердловини порівняно з потенційною продуктивністю свердловини для «чистого» пласта.

Застосування методів математичного моделювання роботи свердловини при гармонічному збуренні у її зоні вибою разом з використанням результатів лабораторних експериментів є важливими як для оцінки впливу забруднення ПЗП на дебіт свердловини, так і при зондуванні (тестуванні) її за допомогою фільтраційних гармонічних хвиль тиску та розуміння фізичних процесів, які супроводжують процес видобутку мінеральних ресурсів.

новажної фільтрації в напівобмеженому середовищі за гармонічної дії на нього. *Журн. фізичних досліджень.* 2023. Т. 27. № 3. С. 3801—3808.https://doi.org/10.30970/ jps.27.3801.

- Скуратівський С.І., Скуратівська І.А. Розв'язки моделі пружного режиму фільтрації рідин та газів з динамічним законом фільтрації. *Укр. фіз. журн.* 2019. Т. 64. № 1. С. 19—26.
- Чекурін В., Притула З. Математичне моделювання кінетики вирівнювання тиску газу у пористому шарі за малих збурень. Вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології. 2017. № 864. С. 179—185.
- Denysiuk, I.I, Skurativska, I.A., Bielinskyi, I.V., Syzonenko, O.M., & Hubar, I.M. (2024). Influ-

ence of relaxation on filtering microflows under harmonic action on the layer. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 25—31. https://doi.org/10.33271/nvngu/ 2024-2/025.

Ding, Y., Longeron, D., Renard, G., & Audibert, A. (2002). Modeling of both near-wellbore damage and natural cleanup of horizontal wells drillea with a water-based mud. Paper presented at the International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette, Louisiana, 20—21 February 2002, 16 p.

# Nonequilibrium fluid filtration in a heterogeneously contaminated near-wellbore zone

## I.I. Denysiuk, I.A. Skurativska, I.M. Hubar, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Based on mathematical modeling of fluid filtration in a heterogeneous environment, studies have been conducted to investigate the impact of near-wellbore zone contamination on production well productivity. A model of non-stationary nonequilibrium filtration in a semi-infinite heterogeneous formation with a harmonic perturbation at its boundary was considered. Using the method of separation of variables, a solution to the boundary value problem was obtained, using which the influence of contamination on well productivity was determined.

**Key words:** nonequilibrium filtration, generalized Darcy's law, porous medium, contaminated near-wellbore zone, well productivity.

#### References

- Barenblatt, G.I., Entov, V.M., & Ryzyk, V.M. (1972). Theory of unsteady filtration of liquid and gas. Moscow: Nedra, 212 p. (in Russian).
- Denysiuk, I.I., Skurativska, I.A., & Hubar, I.M. (2023). Attenuation of velocity fields during non-equilibrium filtration in a half-space medium for harmonic action on it. *Journal of Physical Studies*, 27(3), 3801—3808. https://doi. org/10.30970/jps.27.3801 (in Ukrainian).
- Skurativskyi, S.I., & Skurativska, I.A. (2019). Solutions of the model of the elastic regime of filtration of liquids and gases with the dynamic law of filtration. *Ukrayins'kyy Fizychnyy Zhurnal*, 64(1), 19—26 (in Ukranian).
- Chekurin, V., & Prytula, Z. (2017). Mathematical modeling of the kinetics of gas pressure equalization in a porous layer under small perturba-

tions. Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic. Computer Science and Information Technologies, (864), 179—185 (in Ukranian).

- Denysiuk, I.I, Skurativska, I.A., Bielinskyi, I.V., Syzonenko, O.M., & Hubar, I.M. (2024). Influence of relaxation on filtering microflows under harmonic action on the layer. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 25—31. https://doi.org/10.33271/ nvngu/2024-2/025.
- Ding, Y., Longeron, D., Renard, G., & Audibert, A. (2002). Modeling of both near-wellbore damage and natural cleanup of horizontal wells drillea with a water-based mud. *Paper presented at the International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette, Louisiana, 20—21 February 2002,* 16 p.

УДК 550.83

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322508

# 90-річчя кафедри геофізичних методів розвідки НТУ «Дніпровська політехніка»: історія і сучасність

## М.М. Довбніч, 2025

НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

У 2025 р. виповнюється 90 років від дня заснування кафедри геофізичних методів розвідки НТУ «Дніпровська політехніка». Роботу присвячено історії становлення та розвитку геофізичних досліджень у стінах Катеринославського вищого гірничого училища — Дніпропетровського гірничого інституту — Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Викладені матеріали є компіляцією публікацій, присвячених історії кафедри, а також спогадів працівників кафедри та їхніх родичів.

Автор висловлює вдячність колегам геофізикам, співробітникам Народного музею історії ім. О.М. Поля, співробітникам архіву та бібліотеки НТУ «Дніпровська політехніка» за допомогу у підготовці цієї роботи.

Ключові слова: кафедра геофізичних методів розвідки, НТУ «Дніпровська політехніка», історія становлення, наукові школи, сучасні напрямки досліджень.



Фото1. Вацлав Станіславович Федукович. Photo 1. Vaclav Stanislavovych Fedukovych.

Вступ. Сучасна наука та освіта в Україні переживають не прості часи. Повною мірою це стосується і геофізики. Незважаючи на це, кафедра геофізичних методів розвідки НТУ «Дніпровська політехніка» залишається одним із трьох центрів України геофізичної підготовки бакалаврів, магістрів і докторів філософії.

У 1935 р. керівництво Дніпропетровського гірничого інституту ухвалило рішення про створення випускаючої кафедри геофізичних методів розвідки під керівництвом професора Вацлава Станіславовича Федуковича (фото 1).

На сьогодні навчальний процес і науково-дослідну діяльність на кафедрі забезпечують три доктори та два кандидати наук. Основні напрями наукової діяльності кафедри: розробка теоретичних основ комплексної інтерпретації геофізичних даних, геологічна інтерпретація геофізичних матеріалів, вивчення природи та прог-

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Citation: Dovbnich, M.M. (2025). 90th anniversary of the Department of Geophysical Methods, Dnipro University of Technology: history and present. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 208—215. https://doi.org/10.24028/gj. v47i2.322508.

нозування геодинамічних явищ природного і техногенного характеру, інженерна та екологічна геофізика (https://gmr.nmu.org. ua/ua).

Історія і сучасність кафедри геофізичних методів розвідки НТУ «Дніпровська політехніка». Перші геофізичні дослідження в стінах Катеринославського вищого гірничого училища проводилися вже на початку ХХ ст. відомим вченим-маркшейдером Петром Михайловичем Леонтовським. Роботи проф. П.М. Леонтовського в галузі геофізичних досліджень: «Электрический способ изыскания руд» (1908) і «Изыскание магнитных залежей» (1909) були першими в Україні геофізичними публікаціями.

Асистент проф. П.М. Леонтовського Петро Кирилович Нечипоренко, згодом професор, продовжив роботу свого вчителя в галузі геофізичної розвідки, насамперед її важливому напрямі — гравіметрії. Починаючи з 1928—1929 навчального року він викладав курс «Геофізичні методи розвідки» для студентів геологорозвідувального факультету Дніпропетровського гірничого інституту. До найважливіших робіт Петра Кириловича належить перша гравітаційна карта України. Інженери В.Б. Соллогуб і С.І. Субботін, які проводили геофізичні дослідження під безпосереднім науковим керівництвом П.К. Нечипоренка, стали видатними вченими-геофізиками. 10 травня 1937 р. П.К. Нечипоренка заарештували. Військова колегія Верховного суду СРСР, яка засідала в Києві 2 вересня 1937 р., винесла Петру Кириловичу суворий вирок — вища міра покарання. 15 лютого 1958 р. справу за обвинуваченням П.К. Нечипоренка Військовою колегією Верховного суду СРСР переглянуто і його повністю реабілітовано [Реабілітовані історією..., 2004].

У 1935 р. наказом по Дніпропетровському гірничому інституту № 246 від 11 серпня 1935 р. було організовано випускаючу кафедру геофізичних методів розвідки. Завідувачем кафедри було призначено проф. Федуковича Вацлава Станіславовича, який приїхав з Києва. Народився В.С. Федукович 6 грудня 1897 р. У 1922 р. закінчив маркшейдерські курси у Катеринославському гірничому інституті і здобув кваліфікацію інженерамаркшейдера, а в 1926 р. — гірничий факультет з дипломом гірничого інженера. У 1931 р. В.С. Федуковича було обрано, а згодом затверджено професором і завідувачем кафедри геофізики Київського гірничо-геологічного інституту (КГГІ).

Наприкінці 1935 р. геологічний факультет КГГІ об'єднали з геолого-маркшейдерським факультетом Дніпропетровського гірничого інституту (ДГІ). Завідувачем кафедри геофізичних методів розвідки ДГІ став проф. В.С. Федукович. У 1937 р., рятуючись від переслідувань НКВС, В.С. Федукович з дружиною кидають все і залишають Дніпропетровськ. У 1938 р. В.С. Федукович повертається до Києва, де в 1938—1941 рр. очолює геофізичний відділ Інституту геології АН УРСР, а також викладає геофізику в Київському університеті.

У вересні 1941 р. Київ окупували. Проф. В.С. Федукович отримав від окупаційної адміністрації розподіл для роботи на метеорологічну станцію. У 1943 р. родина В.С. Федуковича приймає дуже важке для себе рішення — емігрувати на Захід. У 1949 р. проф. В.С. Федукович із дружиною переїхав із західної Німеччини до США, де займався геофізичної розвідкою в Аппалацьких горах, Арізоні, Колорадо, Онтаріо, на півночі Канади. У 1954 р. В.С. Федукович перейшов на роботу до Ламонтської обсерваторії (Lamont-Doherty Earth Observatory) Колумбійського університету. До виходу на пенсію він активно займався морською геологією та геофізикою [Блох, 2015].

У серпні 1941 р. в зв'язку з окупацією Дніпропетровська, ДГІ евакуювали вглиб країни. Восени 1943 р. ДГІ відновив свою діяльність у м. Караганда, а у вересні 1944 р. був реевакуйований в м. Дніпропетровськ. Під час евакуації підготовку інженерівгеофізиків у ДГІ не проводили. У 1944 р. після повернення в Дніпропетровськ кафедру геофізичних методів розвідки було фактично заново сформовано проф. Якимом Арсенійовичем Юньковим, запроше-



Фото 2. Яким Арсенійович Юньков. Photo 2. Yakym Arseniyovych Yun'kov.

ним із Свердловського гірничого інституту [Єлінов, 2006; Геологорозвідувальний ..., 2018] (фото 2).

Завідувач кафедри Я.А. Юньков взяв на себе ведення курсу «Гравірозвідка». Заняття з курсу «Магніторозвідка» проводив асистент М.Л. Афанасьєв. Молодому і енергійному доценту А.А. Непомнящему було доручено читання лекцій з курсів «Електророзвідка», «Каротаж свердловин» і «Теорія поля», курс «Сейсморозвідка» довелося читати асистентові І.В. Вдовіну.

Проф. Я.А. Юньков добре розумів, що для створення повноцінної працездатної кафедри необхідно організувати власну підготовку кадрів вищої кваліфікації. З цією метою в 1948 р. було відкрито аспірантуру.

У цей період багато відомих вченихгеофізиків підготували і захистили кандидатські дисертації під керівництвом проф. Я.А. Юнькова — В.П. Кучин (1951), К.Ф. Тяпкін (1952), Є.Г. Булах (1956), Е.А. Козлов (1963), Ю.І. Білоцерківець (1963), Ю.А. Зорін (1964), В.В. Попов (1964), М.В. Копнін (1965), В.А. Белаш (1965), Н.І. Бакланов (1965), В.П. Тележенко (1965), М.Ф. Цьомкало (1966), Г.Я. Голіздра (1966), В.М. Панасенко (1966), А.А. Любимов (1967), В.І. Андрєєв (1967), В.Б. Косинець (1968), А.П. Куба (1969), Є.Б. Серебряков (1969), І.А. Жаворонкін (1969), В.С. Попович (1971), В.Ф. Полуектов (1973); Ю.З. Борзенко (1973), П.А. Міненко (1973); під керівництвом проф. Н.Л. Афанасьєва — О.М. Балакай (1968); під керівництвом проф. К.Ф. Тяпкіна — І.А. Непомнящий (1970), І.О. Журавльов (1972), Е.П. Купчинський (1972).

Віталій Іванович Старостенко 10 березня 1966 р. у ДГІ захистив дисертацію на тему «Визначення потенціалу тяжіння і його похідних за вимірюваними елементами гравітаційного поля з урахуванням використання електронних обчислювальних машин» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Офіційні опоненти: д-р фіз.-мат. наук, проф. М.І. Розовський, д-р геол.-мін. наук К.Ф. Тяпкін; опонуюча організація — Київська експедиція Українського Науково-дослідного геологорозвідувального інституту [Тяпкин, 2005].

У 1974 р. кафедру геофізичних методів розвідки очолив Костянтин Федорович Тяпкін — один з учнів проф. Я.А. Юнькова, що став на той час д-ром геол.-мін. наук, професором. З 1974 по 2000 р. К.Ф. Тяпкін завідував кафедрою [Історія ..., 2009].

У 1948 р. К.Ф. Тяпкін закінчив ДГІ, здобувши кваліфікацію гірничого інженерагеофізика, і продовжив навчання та наукову діяльність в аспірантурі (науковий керівник — проф. Я.А. Юньков).

Проф. К.Ф. Тяпкін — автор нової ротаційної гіпотези структуроутворення в тектоносфері. Результати наукових досліджень проф. К.Ф. Тяпкіна викладено у понад 200 опублікованих працях. Костянтин Федорович — лауреат Державної премії УРСР (1972) і України (1996) у галузі науки і техніки.

Розвиваючи традиції, закладені проф. Я.А. Юньковим, на кафедрі геофізичних методів було створено колектив високопрофесійних науково-педагогічних кадрів — доктори і кандидати наук вміло поєднували дослідницьку та освітню діяльність.

Завідувач кафедри К.Ф. Тяпкін читав курси «Теорія поля», «Фізика Землі»; «Гравірозвідка», «Інтерпретація гравітаційних і магнітних аномалій» — проф. Г.Я. Голіздра; «Магніторозвідка», «Теоретичні основи реєстрації та обробки геофізичної інформації» — доц. І.А. Журавльов; «Електророзвідка» — доц. М.Ф. Цьомкало, «Сейсморозвідка» — доц. В.П. Тележенко і доц. О.А. Зорін, «Геофізичні дослідження свердловин» — доц. Н.К. Ступак і доц. В.Н. Холін, «Ядерна геофізика» — доц. В.Н. Гонтаренко, «Петрофізика» — доц. М.В. Копнін і доц. В.Ф. Полуектов.

Аспіранти, які захистили в цей період кандидатські дисертації: під керівництвом проф. Я.А. Юнькова — А.І. Котляр (1974), А.Ф. Каморний (1975), Б.С. Бусигін (1981); під керівництвом проф. Н.Л. Афанасьєва — Ю.М. Ерінчек (1981); під керівництвом проф. К.Ф. Тяпкіна — В.Н. Гонтаренко (1975), А.Я. Краснощок (1975), Г.М. Стовас (1976), І.М. Чижов (1977), А.Г. Шемпелев (1977), В.Я. Пьянков (1977), І.В. Ластовін (1980), В.І. Бобриньов (1980), Ю.К. Яковлєв (1980), В.В. Самков (1987), А.Г. Бондарук (1988), О.В. Орлінська (1988), А.Л. Лозовий (1988), А.І. Інгеров (1989), В.І. Жаворонкін (1992), В.І. Вальчак (1993); під керівництвом проф. Г.Я. Голіздра — О.К. Тяпкін (1990), В.П. Солдатенко (1990), І.Є. Лук'янов (1991), В.М. Логвін (1992); під керівництвом доц. В.П. Тележенко — І.М. Єрмаков (1980), А.Г. Мадатов (1985), О.А. Зорін (1987).

Згадуючи слова Костянтина Федоровича Тяпкіна — друга половина XX ст. була «золотим віком геофізики»! Розвиток досліджень і співпраця з провідними науковими установами зробили кафедру геофізичних методів розвідки одним з ведучих центрів науково-педагогічної діяльності в галузі геофізики (фото 3, 4).

У 2000 р. завідувачем кафедри геофізич-



Фото З. Захист кандидатської дисертації Ластовіна І.В. Зліва направо: здобувач Ластовін І.В., проф. Тяпкін К.Ф., проф. Старостенко В.І., проф. Голіздра Г.Я., доц. Журавльов І.О.

Photo 3. I.V. Lastovin defends his candidate dissertation. From left to right: I.V. Lastovin, professor K.F. Tiapkin, professor V.I. Starostenko, professor H.Ia. Holizdra, docent I.O. Zhuravliov.



Фото 4. Візит провідних науковців кафедри геофізичних методів розвідки у Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України.

Photo 4. The leading researchers of the Department of Geophysical Exploration Methods visiting the S.I. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine.

них методів розвідки став д-р геол. наук Ростислав Павлович Денисюк. Він прийшов на кафедру з Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, в якому працював багато років, спочатку під керівництвом д-ра фіз.-мат. наук, професора А.І. Кобрунова, а потім самостійно. У 2006 р. Р.П. Денисюк пішов із життя в розквіті творчої активності, сповнений планів та ідей.

У період з 2005 по 2011 р. кафедру очолював канд. фіз.-мат. наук Василь Миколайович Логвін, який продовжив дослідження проф. Г.Я. Голіздри. Основний напрям його наукової діяльності — вивчення глибинної будови різних регіонів за геофізичними даними, переважно граві- і сейсморозвідки.

З 2011 р. і до сьогодні кафедрою завідує д-р геол. наук Михайло Михайлович Довбніч.

Завідувач кафедри М.М. Довбніч читав курси «Механіка суцільного середовища», «Магніторозвідка», «Теоретичні основи обробки геофізичних даних», «Геоінформатика», «Сучасні засоби аналізу і представлення геофізичних даних», «Фізика Землі»; «Теорія поля», «Гравірозвідка», «Теоретичні основи комплексування геофізичних методів», «Інтерпретація гравітаційних і магнітних аномалій» доц. В.М. Логвін; «Геофізичні дослідження свердловин», «Спецкурс інтерпретації геофізичних досліджень свердловин методами розпізнавання образів», «Спецкурс геофізичних досліджень свердловин в геоекології та інженерної геології» — доц. А.Л. Лозовий; «Електророзвідка», «Спецкурс розвідувальної електророзвідки», «Спецкурс електророзвідки в геоекології» — доц. І.Є. Лук'янов; «Обробка сейсмоданих на комп'ютерах», «Спецкурс
інтерпретації сейсморозвідки при рішенні розвідувальних робіт» — доц. Я.В. Мендрій; «Інтерпретаційні системи в розвідувальній геофізиці», «Еколого-геофізичне картування» — доц. П.Г. Пігулевський; «Статистична обробка геологічної інформації», «Геофізичні методи досліджень», «Методи розв'язку геофізичних задач на комп'ютерах», «Сейсморозвідка», «Комплексування геофізичних методів» — В.П. Солдатенко; «Ядерна геофізика», «Геофізичні методи рішення геоекологічних і інженерних задач», «Спецкурс радіометрії в геоекології», «Геофізичні методи в моніторингу навколишнього середовища» доц. О.К. Тяпкін.

У цей період аспірантами і співробітниками кафедри захищено кандидатські дисертації: М.М. Довбніч (2001), Джохар Кейс (2003), А.Г. Калашник (2004), Я.В. Мендрій (2013), О.Г. Білашенко (2015) і докторські: М.М. Довбніч (2010), О.К. Тяпкін (2011), П.Г. Пігулевский (2012).

Погляд у майбутнє кафедри геофізичних методів розвідки НТУ «Дніпровська політехніка». Підготовка фахівців сучасного рівня для геологорозвідувальної галузі, геобезпеки та геоекології є одним із найважливіших шляхів у реалізації стратегії сталого розвитку і повоєнного відновлення України. Геофізичні дослідження відіграють ключову роль у вирішенні цих питань. Постанова Кабінету Міністрів № 266 від 29 квітня 2015 р. затвердила новий перелік спеціальностей, що призвело до негативної трансформації геофізичної підготовки здобувачів вищої освіти у рамках нової спеціальності «Науки про Землю».

На сьогодні навчальний процес і науково-дослідну діяльність на кафедрі забезпечують три доктори та два кандидати

#### Список літератури

- Блох Ю.И. Очарованный геофизикой Вацлав Федукович. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 2. С. 135—142.
- Геологорозвідувальний факультет: історія та сучасність (1918—2018): монографія. За ред.

наук. Усі ми є учнями когорти вчених, яку було створено в другій половині XX ст.

Зав. каф. М.М. Довбніч читає курси «Сучасні просторово-часові варіації геофізичних полів», «Фізика Землі»; «Геофізичні методи досліджень»; доц. А.Л. Лозовий — «Статистична обробка геологічної інформації», «Геофізичні дослідження свердловин» — проф. В.М. Логвін; «Геофізичні методи рішення геоекологічних і інженерних задач» — проф. П.Г. Пігулевський; «Комплексування геофізичних методів», «Концептуальні основи геоекологічного моніторингу» — проф. О.К. Тяпкін.

Завдяки тісній співпраці з виробничими організаціями і міжнародними фондами, кафедра має у своєму розпорядженні сучасне геофізичне обладнання і програмне забезпечення.

Незважаючи на суттєве зменшення педагогічної діяльності кафедри, її співробітники приймають активну участь у дослідницьких, насамперед прикладних проєктах, і мають позитивний досвід виконання робіт з вирішення широкого кола питань раціонального природокористування та геоекології, геофізичних критеріїв стійкості відповідальних об'єктів, нафтогазової та рудної геології тощо. Кафедра геофізичних методів розвідки активно інтегрується у світове геофізичне співтовариство за рахунок активної участі співробітників і здобувачів у наукових заходах Європейської асоціації геовчених та інженерів (EAGE) [Dovbnich, Viktosenko, 2023; Tiapkin et al., 2024].

Саме ці дослідження є запорукою збереження колективу і розвитку кадрового і наукового потенціалу кафедри геофізичних методів розвідки НТУ «Дніпровська політехніка» у майбутньому.

В.Ф. Приходченка, І.С. Нікітенка. Дніпро: НТУ «ДП», 2018, 168 с.

Єлінов І.М. *Нариси з історії Національного гірничого університету*. Дніпропетровськ: Вид. НГУ, 2006, 188 с.

- Історія і сучасність Національного гірничого університету (1899—2009). За ред. проф. Г.К. Швидько. Дніпропетровськ: Вид. НГУ, 2009, 504 с.
- Реабілітовані історією. За відсутністю складу злочину... (до історії політичних репресій 20-х—початку 50-х рр. у Дніпропетровському гірничому інституті). Дніпропетровськ: Вид. НГУ, 2004, 193 с.
- Тяпкин К.Ф. О нашей дружбе и сотрудничестве (к 70-летию академика В. И. Старостенко). *Наук. вісник Нац. гірничого ун-ту.* 2005. № 3. С. 104—106.

Dovbnich, M., & Viktosenko, I. (2023). Region-

al Model *Vs*<sup>30</sup> and Seismic Ground Types for Ukraine. In *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (Vol. 2023, No. 1, pp. 1—5). European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520159.

Tiapkin, O., Dovbnich, M., Anisimova, L., Skjeltorp, A., & Viktosenko, I. (2024). Seismotectonics and Near-Surface Features for Geohazard Studies in Southern Ukraine. NSG 2024 30th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Sep 2024, Volume 2024. (Helsinki, Finland). https://doi. org/10.3997/2214-4609.202420011.

# 90th anniversary of the Department of Geophysical Methods, Dnipro University of Technology: history and present

## M.M. Dovbnich, 2025

#### Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

In 2025, the 90th anniversary of the founding of the Department of Geophysical Methods of Dnipro University of Technology will be celebrated. The paper is devoted to the history of the formation and development of geophysical research within the walls of the Katerynoslav Higher Mining School — Dnipropetrovsk Mining Institute — Dnipro University of Technology.

The information presented is a compilation of publications dedicated to the history of the department, as well as the memories of department employees and their relatives.

The author expresses his gratitude to his colleagues, geophysicists, employees of the O.M. Polya National Historical Museum, and the staff of the archive and library of Dnipro University of Technology for their assistance in preparing this work.

**Key words:** Department of Geophysical Methods, Dnipro University of Technology, history of formation, scientific schools, modern research areas.

#### References

- Blokh, Y.I. (2015). Vazlav Fedukovich fascinated by geophysics. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(2), 135—142 (in Russian).
- Prykhodchenko, V.F., & Nikitenko, I.S. (Eds.). (2018). Geological Exploration Faculty: History and Modernity (1918—2018): monograph. Dnipro: NTU «DP», 168 p. (in Ukrainian).
- Yelinov, I.M. (2006). Essays on the history of the National Mining University. Dnipropetrovsk: Publ. NHU, 188 p. (in Ukrainian).
- Shvydko, H.K. (2009). History and modernity of the

National Mining University (1899—2009). Dnipropetrovsk: Publ. NHU, 504 p. (in Ukrainian).

- Rehabilitated by history. Due to the absence of elements of a crime... (to the history of political repressions of the 1920s—early 1950s at the Dnipropetrovsk Mining Institute). (2004) Dnipropetrovsk: Publ. NHU, 193 p (in Ukrainian).
- Tiapkyn, K.F. (2005). About our friendship and cooperation (on the 70th anniversary of Academician V.I. Starostenko). Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu, (3), 104—106 (in Russian).

Dovbnich, M., & Viktosenko, I. (2023). Regional Model Vs<sup>30</sup> and Seismic Ground Types for Ukraine. In 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Vol. 2023, No. 1, pp. 1—5). European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520159. Tiapkin, O., Dovbnich, M., Anisimova, L., Skjeltorp, A., & Viktosenko, I. (2024). Seismotectonics and Near-Surface Features for Geohazard Studies in Southern Ukraine. NSG 2024 30th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Sep 2024, Volume 2024. (Helsinki, Finland). https://doi. org/10.3997/2214-4609.202420011.

УДК 551.24 (477)

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322509

## Про природу Хмільницького мінімуму сили тяжіння

В.А. Єнтін<sup>1</sup>, О.Б. Гінтов<sup>2</sup>, С. І. Гуськов<sup>1</sup>, С.В. Мичак<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Державне підприємство «Українська геологічна компанія», Київ, Україна <sup>2</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Хмільницький структурно-тектонічний вузол є унікальним для Українського щита прикладом яскравого прояву в гравітаційному і магнітному полі локального осередку докембрійського кислого магматизму на перетині трьох глибинних розломів. За результатами інтерпретації поля аномалій сили тяжіння геологічна природа Хмільницького мінімуму розмірами 25×25 км і відносною інтенсивністю –16 мГал обумовлена лійкоподібним штоком гранітоїдів апліт-пегматоїдного і гранат-біотитового складу. Магматична діяльність у центральній частині штока супроводжується глибинною дегазацією у вигляді радонових еманацій і проявами уранової мінералізації.

**Ключові слова:** Український щит, Хмільницький гравітаційний мінімум, лейкогранітна інтрузія, тривимірна модель, радонові джерела, уранові прояви.

Вступ. Хмільницький тектоно-структурний вузол (ХСТВ) звернув на себе увагу і був уперше виділений як унікальний геолого-геофізичний об'єкт у процесі підготовки геофізичної основи Тектонічної карти масштабу 1:1 000 000 [Єнтін та ін., 2002]. Його яскравою прикметою є наявність субізометричного мінімуму сили тяжіння діаметром 25 км, з яким збігається і мінімум магнітного поля, розташовані на перетині тектонічних лінеаментів західної частини Українського щита (УЩ) — Хмільницької зони розломів північно-західного простягання, Хмельницької широтного і Білокоровицько-Яблунівської меридіонального. Характерною геологічною ознакою площі цього мінімуму є її насиченість лейкократовими гранітоїдами, які одержали назву хмільницьких і були виділені в самостійний хмільницький алохтонний інтрузивний комплекс. Не випадковими для цього мінімуму є відомі там природні радонові джерела і прояви уранової мінералізації. Незважаючи на проведення в цьому районі численних робіт геологознімального і пошукового характеру, а також наукових досліджень, мало хто з їх виконавців пов'язував у єдине ціле всі встановлені тут неординарні для УЩ геолого-геофізичні фактори. Виправленню саме цих обставин присвячено наше дослідження.

Citation: Yentin, V.A., Gintov, O.B., Guskov, S.I., & Mychak, S.V. (2025). On the nature of the Khmilnyk Minimum of gravity. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 215—220. https://doi.org/10.24028/gj.DOI: https://doi.org/10.24028/ gj.v47i2.322509.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Хмільницький мінімум і хмільницькі граніти. Хмільницький мінімум сили тяжіння було виявлено гравітаційною зйомкою масштабу 1:200 000 (рис. 1) [Поливанчук, Беланов, 1960]. Пізніше, під час пошукових робіт на радонові води в районі м. Хмільник, аномалія була деталізована зйомкою масштабу 1:50 000 [Яненко та ін., 1966; Германов та ін., 1988] (рис. 2). Встановлено, що цей ізометричний мінімум з відносною амплітудою -16 мГл і розмірами 25×25 км має складну внутрішню структуру. Висловлено припущення, що геологічна природа мінімуму може бути обумовлена штоком лейкократових гранітів з приблизною від'ємною залишковою густиною (порівняно з чудново-бердичівськими гранітами) –0,1 г/см<sup>3</sup>. Цими ж авторами в межах Хмільницького мінімуму було виявлено Соколовська тектонічну зону, насичену проявами уранової мінералізації.

Пізніше в районі м. Хмільник та його околиць М.П. Щербак виділив окремий по бузький алохтонний комплекс гранітоїдів, вважаючи їх молодшими за гранітоїди бердичівського комплексу, серед яких вони знаходяться [Щербак, 1975]. До них автор



Рис. 1. Оглядова гравіметрична карта (аномалії Буге, σ=2,3, переріз ізоліній 2 мГал) масштабу 1:200 000 району Хмільницького мінімуму. Зелений квадрат — контур рис. 2.

Fig. 1. Overview gravity map of the Khmilnyk Minimum (Bouguer anomaly,  $\sigma$ =2.3, section isoline 2 mGal), 1:200 000. The green square is the outline of Fig. 2. відніс рожеві біотитовіапліт-пегматоїдні і сірі середньо-дрібнозерністі гранатбіотитові граніти (саме останні ми будемо називати хмільницькими).

У 1993 р. хмільницькі граніти разом із рожевими апліт-пегматоїдними були включені у стратиграфічну схему УЩ як хмільницький пара автохтонний комплекс (віковий діапазон 2000—1850 млн років). У діючій Кореляційній хроностратиграфічній схемі хмільницький комплекс залишено з включенням до його об'єму як лейкократових гранат-біотитових, так і апліто-пегматоїдних іпегматоїдних гранітів. На думку авторів цієї статті, які також вивчали хмільницькі граніти в кар'єрах і у відслоненнях Південного Бугу, найточнішою назвою цих гранітів буде «хмільницькі світло-сірі гранат-біотитові граніти». U/ Рь вік цих гранітів, визначений Л.М. Степанюком, становить 2055—2041 млн років [Степанюк, 2000].

У праці [Державна..., 2007] В.В. Лукашем із співавторами детально охарактеризовано хмільницький комплекс, який формує Хмільницький масив лейкократових гранітів. Мінеральний склад: кварц — до 40 %, мікроклін-мікропертит — 45 %, плагіоклаз (альбіт-олігоклаз) — 15 %, біотит (одиничні зерна) — 10 %, гранат (одиничні зерна) — 15 %; акцесорні (апатит, монацит, циркон, силіманіт). За геологічними побудовами цих авторів Хмільницький масив лейкогранітів має розміри 30×10 км, витягнутий в меридіональному напрямку та звужується на північ. Але в цій же роботі, за результатами інтерпретації геофізичних даних, було встановлено, що Хмільницький мінімум має ізометричну форму в плані і характеризується неоднорідною внутрішньою структурою, де спостерігається центральне високоградієнтне ядро діаметром 12—14 км і зовнішнє кільцеве менш градієнтне облямування шириною приблизно 10 км (рис. 3, 4). Саме ця структура найкраще відображає планове положення на рівні поверхні кристалічного фундаменту Хмільницького масиву сірих гранат-біотитових гранітів.

З Хмільницьким масивом лейкокра-



Рис. 2. Карта аномалій Буге (σ=2,3, переріз ізоліній 2 мГал) Хмільницького мінімуму, за [Яненко и др., 1966; Германов та ін., 1988]. Синім кольором позначено магнітне поле (Z<sub>a</sub>). Червоні та зелені кружки — родовища і рудопрояви. Р — радонові води, П — питні води.

Fig. 2. Map of Bouguer anomalies ( $\sigma$ =2.3, section isoline 2 mGal) of the Khmilnyk Minimum, according to [Yanenko et al., 1966; Germanov et al., 1998]. The magnetic field is marked in blue ( $Z_a$ ). Red and green circles — deposits and ore occurrences. P — radon waters,  $\Pi$  — potable waters.

тових гранат-біотитових гранітів і його облямуванням пов'язані родовища і рудопрояви різних корисних копалин (див. рис. 2), насамперед радонові мінеральні води і радіоактивні метали — уран і торій (Хмільник, Війтівці, Соколова, Лелітка, Дяківці), рідкісноземельні елементи (монацити, прояв — Дібровка), нікель і благородні метали у включеннях ультрабазитів (прояв — Жданівка, с. Війтівці). У межах Бердичівського підняття за комплексом геологогеофізичних ознак площа ХСТВ визнана найбільшперспективною на пошуки корінних родовищ алмазів еклогітової природи [Довгань та ін., 2008].

**Результати кількісної інтерпретації та природа Хмільницького мінімуму.** З розробкою нових програмних комплексів



Рис. 3. Карта модуля горизонтального градієнта району Хмільницького мінімуму.

Fig. 3. Map of the horizontal gradient modulus of the Khmilnyk Minimum area.



Рис. 4. Перша густинна модель Хмільницького мінімуму, за [Державна... 2007]. Червоний пунктир — контур тіла з густиною 2,58 г/см<sup>3</sup>.

Fig. 4. The first density model of the Khmilnyk Minimum, according to [State..., 2007]. Red dotted line contour of a body with a of 2.58 g/cm<sup>3</sup> density.



Рис. 5. Нова тривимірна густинна модель Хмільницького масиву (положення профілю див. на рис. 1): *а* — криві Ga (редукція Буге, σ=2,3: синя — спостережена, червона — змодельована) і Δ*T*; *б* — густинна модель: рожевим кольором показано хмільницькі граніти (Δσ=–0,10 г/см<sup>3</sup>), штрихами — зону тріщинуватості (Δσ=–0,13+0,10=–0,03 г/см<sup>3</sup>).

Fig. 5. A new three-dimensional density model of the Khmilnyk massif (profile position given in Fig. 1); a — Ga curves (Bouguer reduction,  $\sigma$ =2.3: blue — observed, red — simulated) and  $\Delta T$ ;  $\delta$  — density model: Khmilnyk granites are shown in pink ( $\Delta\sigma$ =-0.10 g/cm<sup>3</sup>), dashed lines show the fissuring zone ( $\Delta\sigma$ =-0.13+0.10=-0.03 g/cm<sup>3</sup>).

інтерпретації потенційних полів [Старостенко и др., 2015] з'явилася можливість створити нову тривимірну густинну модель масиву хмільницьких гранітів (рис. 5). Цей масив являє собою складної будови лійкоподібне тіло з надлишковою густиною –0,10 г/см<sup>3</sup> відносно вміщуючих бердичівских гранітів і глибиною не менше 15 км. Значна частина масиву порушена сильною тріщинуватістю, пов'язаною з розломами, які його перетинають, що зменшує її надлишкову густину ще на 0,03 г/см<sup>3</sup>.

**Висновки.** 1. Хмільницький структурнотектонічний вузол є унікальним для УЩ прикладом яскравого прояву в гравітаційному і магнітному полях локального осередку докембрійського кислого магматизму на перетині трьох глибинних розломів (у структурно-тектонічному відношенні це є зіркова структура). 2. За результатами інтерпретації поля аномалій сили тяжіння геологічна природа Хмільницького мінімуму обумовлена лійкоподібним штоком гранітоїдів аплітпегматоїдного і гранат-біотитового складу.

3. Магматична діяльність в центральній частині штока супроводжується глибинною дегазацією у вигляді радонових еманацій і проявами уранової мінералізації в його приконтактових зонах. Відомі численні знахідки ореолів піропів та інших індикаторних мінералів алмазів еклогітової природи.

4. Хмільницький гравітаційний мінімум як структура екзотичної для УЩ природи, а також ряд інших природних геофізичних феноменів України [Ентин, 2012], потребують додаткового вивчення більш глибинними геофізичними методами досліджень.

## Список літератури

- Германов Б.С. и др. Результаты геофизических и геохимических исследований с целью подготовки основы для геологической съемки масштаба 1:50 000 на площади листов М-35-91-Г, -92-А, В, Г (ю.п.), -93-В. Отчет Волынской геофизической и поисково-съемочных партий за 1985—1988 гг. Киев, 1988.
- Державна геологічна карта України. Масштаб 1:200 000. Центральноукраїнська серія. Аркуш: M-35-XXII (Старокостянтинів). Пояснювальна записка. Київ, ПДРГП «Північгеологія», 2007, 242 с.
- Довгань Р.М., Павлюк В.М., Єнтін В.А., Цимбал Ю., Грінін Р.А. Пошуки корінних родовищ алмазів в межах Бердичівського підняття (1991—2008; геологічне завдання, тит. 230) Київ, 2008: Фонди Державного підприємства «Українська геологічна компанія».
- Ентин В.А. *Природные геофизические феномены Украины*. Киев: Изд. УкрДГРІ, 2012, 76 с.
- Єнтін В.А., Шимків Л.М., Нечаєва Т.С., Дзюба Б.М., Гінтов О.Б., Пашкевич І.К., Красовський С.С. Підготовка геофізичної основи тектонічної карти України масштабу

*1:1000 000*. Київ: Геоінформ України, 2002, 55 с.

- Поливанчук А.Л., Беланов В.М. Отчет о работах Волынской геофизической партии за 1957—1959 г. Кн. 1. Киев, 1960, 208 с.
- Старостенко В.И., Легостаева О.В., Макаренко И.Б., Савченко А.С. Комплекс программ автоматизированной интерпретации данных потенциальных полей. *Геофиз* журн. 2015. Т. 37. № 1. С. 42—52. https:// doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i1.2015. 111322.
- Степанюк Л.М. Геохронологія докембрію західної частини Українського щита (архейпалеопротерозой): *автореф. guc. ... g-ра геол. наук.* Київ, 2000, 34 с.
- Щербак Н.П. Петрология и геохронология докембрия западной части Украинского щита. Киев: Наук. думка, 1975, 271 с.
- Яненко О.Г., Жабровец В.И., Малуша Н.П. Березинец Г.Д. Отчет Соколовской геофизической партии за 1966 г. Кн. 1. Киев, Фонды ДП «УГК», 1966, 102 с.

# On the nature of the Khmilnyk Minimum of gravity

V.A. Yentin<sup>1</sup>, O.B. Gintov<sup>2</sup>, S.I. Guskov<sup>1</sup>, S.V. Mychak<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>State Enterprise «Ukrainian Geological Company», Kyiv, Ukraine <sup>2</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The Khmilnyk structural and tectonic node is unique for the Ukrainian Shield. Here, a polylocal center of Precambrian acidic magmatism at the intersection of three deep faults vividly manifests in the gravitational and magnetic field Based on the interpretation of the gravity anomaly field, the geological nature of the Khmilnyk Minimum with dimensions of  $25\times25$  km and a relative intensity of -16 mGal is due to the funnel-shaped stock of granitoids of aplite-pegmatoid and garnet-biotite composition. The magmatic activity in the central part of the stock is accompanied by deep degassing in the form of radon emanations and manifestations of uranium mineralization.

**Key words:** Ukrainian Shield, Khmilnyk gravity minimum, leucogranite intrusion, threedimensional model, radon sources, uranium manifestations.

#### References

- Germanov, B.S. et al. (1988). Results of geophysical and geochemical studies with the aim of preparing the basis for a geological survey at a scale of 1:50,000 on the area of sheets M-35-91-G, -92-A, B, G (south p.), -93-V. Report of the Volyn geophysical and prospecting and survey parties for 1985—1988). Kiev (in Russian).
- State Geological Map of Ukraine. Scale 1:200 000. Central Ukrainian series. Sheet: M-35-XXII (Starokostiantyniv). Explanatory note. (2007). Kyiv, NSRGE «Pivnichgeologiya», 242 p. (in Ukrainian).
- Dovgan, R.M., Pavlyuk, V.M., Yentin, V.A., Tsymbal, Y., & Grinin, R.A. (2008). Search for primary diamond deposits within the Berdychiv uplift (1991—2008; geological task, title 230). Kyiv: Funds of the State Enterprise «Ukrainian Geological Company» (in Ukrainian).
- Entin, V.A. (2012). *Natural geophysical phenomena of Ukraine*. Kyiv: Publ. UkrDGRI, 76 p. (in Russian).
- Entin, V.A., Shymkiv, L.M., Nechaeva, T.S., Dziuba, B.M., Gintov, O.B., Pashkevych, I.K., & Krasovsky, S.S. (2002). *Preparation of the geo*-

physical basis of the tectonic map of Ukraine at a scale of 1:1000 000. Kyiv: Geoinform of Ukraine, 55 p. (in Ukrainian).

- Polivanchuk, A.L., & Belanov, V.M. (1960). Report on the work of the Volyn geophysical party for 1957—1959, Book 1. Kiev, 208 p. (in Russian).
- Starostenko, V.I., Legostaeva, O.V., Makarenko, I.B., & Savchenko, A.S. (2015). Complex of programs for automated interpretation of potential field data (GMT-Auto). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(1), 42—52. https://doi.org/10.24028/ gzh.0203-3100.v37i1.2015 (in Russian).
- Stepanyuk, L.M. (2000). Geochronology of the Precambrian of the western part of the Ukrainian Shield (Archean-Paleoproterozoic). *Doctor's thesis*. Kiev, 34 p. (in Ukrainian).
- Shcherbak, N.P. (1975). Petrology and geochronology of the Precambrian of the western part of the Ukrainian Shield. Kiev: Naukova Dumka, 271 p. (in Russian).
- Yanenko, O.G., Zhabrovets, V.I., Malusha, N.P., & Berezynets, G.D. (1966). *Report of the Sokolov geophysical party for1966*. Book 1. Kiev, Funds of DP «UGK», 102 p. (in Russian).

УДК550.8

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.320370

# Геофізичні аспекти сучасних горизонтальних рухів у центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину

В.В. Ігнатишин<sup>1,2</sup>, Д.В. Малицький<sup>1</sup>, Б.Є. Купльовський<sup>1</sup>, Т.Й. Іжак<sup>2</sup>, С.С. Молнар Д<sup>2</sup>, А.Й. Рац<sup>2</sup>, М.Б. Ігнатишин<sup>1</sup>, А.В. Ігнатишин<sup>1</sup>, 2025

<sup>1</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна, <sup>2</sup>Закарпатський угорський інститут ім. Ференца Ракоці II, Берегове, Україна

Проведено вивчення просторово-часового розподілу сейсмічності Карпатського регіону за 2023 р., проаналізовано результати досліджень і наукових доробок в питанні вивчення геофізичних процесів в сейсмогенеруючих регіонах. Актуальність проведених досліджень викликана тим, що останнім часом відмічають певні особливості сейсмічної активності в сейсмогенеруючому регіоні та збільшення ймовірності прояву сильних відчутних землетрусів. Проаналізовано результати спостережень сучасних горизонтальних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому. Проведено дослідження зв'язків між параметрами сучасних рухів кори та просторово-часовим розподілом сейсмічності Карпатського регіону, зокрема Закарпатського внутрішнього прогину та зони Вранча (Румунія). Показано існування знакозмінних процесів у горизонтальних рухах кори в Закарпатському внутрішньому прогині в досліджуваний інтервал часу. У сучасних горизонтальних рухах кори не визначився знакозмінний процес, який визначає характер рухів кори у період до 10—12 років і є важливим у формуванні сейсмічної активності регіону. Встановлено, що місцева сейсмічність корелюється із сейсмічністю потужного сейсмогенеруючого регіону (зона Вранча), сейсмічність паралельно зростає в обох регіонах починаючи з травня—червня 2023 р. Сейсмічність регіону пов'язана із процесами локального стиснення гірських порід, виміряних в штольні пункту деформометричних спостережень «Королеве» Відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України.

**Ключові слова**: рухи кори, деформації, землетруси, Закарпатський внутрішній прогин, зона Оашського глибинного розлому.

Вступ. Актуальність геодинамічних і сейсмологічних спостережень на території Карпатського регіону, зокрема Закарпатського внутрішнього прогину, викликана тим, що тут реєструються місцеві землетруси різного енергетичного класу, серед яких вирізняються відчутні. Частота прояву відчутних місцевих землетрусів в цьому регіоні коливається від одного до шести на рік на фоні десятків слабких підземних поштовхів. У статті [Tretiak, Brusak, 2022] проаналізовано сучасні тенденції горизонтальних і вертикальних зміщень території заходу України за даними глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС), побудовано карти рухів з виділенням зон деформацій верхнього шару земної кори. Встановлено, що зони стиску виділяються на Закарпатті, території Закарпатського глибинного розлому та північному заході

Citation: Ignatyshyn V.V., Malytskyy D.V., Kuplovskyi B.E., Izhak T.Y., Molnar D S.S., Rats A.Y., Ignatyshyn M.B., & Ignatyshyn A.V. (2025). Geophysical aspects of modern horizontal movements in the central part of the Transcarpathian Internal Trough. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 221—225. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.320370.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

регіону. Збільшення кількості перманентних ГНСС-станцій сприяє покращенню точності визначення сучасних ротаційних параметрів тектонічних плит, які є основою для моделювання та аналізу глобальних, регіональних і локальних геодинамічних процесів [Savchyn, 2022]. У статті [Gnyp, 2022] визначено координати вогнищ серії слабких (1,0<ML<2,5) схожих між собою (повторних) землетрусів, що відбувалися протягом 2013—2015 рр. поблизу с. Тросник на півдні Закарпаття. Врахування викладених у публікації [Nazarevych et al., 2022] особливостей сейсмотектоніки зони зчленування Оашського і Закарпатського розломів сприятиме уточненню оцінок характеристик та особливостей просторового розподілу природних геоекологічних та сейсмотектонічних ризиків і небезпек у центральній частині Українського Закарпаття. У статті [Doskich et al., 2023] побудовано карту горизонтальних деформацій земної кори на території України за даними часових рядів координат ГНСС станцій, вказано на різнонаправленість цих зміщень, спричинених наявністю сучасних субвертикальних і субгоризонтальних розломів та розломних зон. Аналіз часового розподілу місцевої сейсмічності та горизонтальних рухів кори за весь період деформометричних спостережень у зоні Оашського глибинного розлому підтвердив підвищення сейсмічності регіону в інтервалах інтенсивних рухів корита їх зв'язок із геофізичними полями [Ігнатишин та ін., 2022, 2024]. У статті [Андрущенко та ін., 2023] показано, що за результатами інструментальних спостережень у 2021 р. на територіях України та суміжних держав сталося понад півтори сотні землетрусів, частина яких належить до глибокофокусної зони Вранча (Румунія). Метою дослідження є виявлення зв'язків між параметрами геодинамічного стану Оашського глибинного розлому та сейсмічністю територій Карпатського регіону, зокрема Закарпатського внутрішнього прогину. Об'єктом дослідження є геодинамічний та сейсмічний стан сейсмогенеруючого регіону. Предметом дослідження є зв'язки між варіаціями зміщень земної кори в зоні Оашського глибинного розлому та часовим розподілом місцевої сейсмічності, особливості їх прояву.

Результати досліджень. Побудовано часовий розподіл зміщень земної кори, які вимірювалися на пункті деформометричних спостережень (ПДС) «Королеве» Відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України в 2023 р. в зоні Оашського глибинного розлому. На ПДС функціонує змонтований горизонтальний кварцовий деформометр базою в 24,5 м, азимут деформометра становить 80° (напрямок зі сходу на захід). Аналізуючи часовий розподіл рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому за 2023 р., встановлено, що відбувається розширення порід величиною +9 мкм, деформації земної кори при цьому становлять 382 нстр. Важливо звернути увагу на знакозмінний процес у горизонтальних рухах кори в зоні Оашського глибинного розлому за 2023 р.: протягом 9,5 місяців рухи кори вирізняються розширенням порід із постійною швидкістю 0,2 мкм/добу. Для решти року характерне стисненнями порід величиною -27,6 мкм, швидкість зміщення в цей період становила 0,4 мкм/добу, періодичність у рухах кори — від 10 до 50 діб, переважають коливання з періодами 30—40 діб, що ймовірно пов'язано із сезонними варіаціями параметрів геофізичних полів. Для вивчення сейсмічного стану регіону використано результати сейсмічних спостережень, проведених на режимних геофізичних станціях, сейсмічних станціях і пунктах деформометричних спостережень Карпатської дослідно-методичної геофізичної та сейсмологічної партії ВСКР ІГФ ім. С.І. Субботіна НАН України за допомогою цифрових сейсмометрів DAS-05. Протягом 2023 р. в Карпатському регіоні сейсмічними станціями Відділу сейсмічності Карпатського регіону зареєстровано 183 підземні поштовхи різного енергетичного класу та на різній епіцентральній відстані. Землетруси охоплюють територію Закарпаття, інших областей України, прилеглих тери-



Сейсмічність Карпатського регіону (діаграма коричневого кольору), сучасні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому (крива синього кольору), 2023 р.

Seismicity of the Carpathian region (brown diagram), modern crustal movements in the Oash deep fault zone (blue curve), 2023.

торій сусідніх країн: Угорщини, Словаччини, Румунії. Аналіз часового розподілу місцевої сейсмічності за 2023 р. вказує на те, що виділяються серії місцевих землетрусів, частота прояву яких підвищується в середині року. Серед зареєстрованих землетрусів 56 сталося на території Закарпатського внутрішнього прогину, глибини підземних поштовхів варіюють в інтервалі 2—140 км, закарпатські землетруси мають невелику глибину порівняно із землетрусами зони Вранча (Румунія). Сейсмічність Закарпаття та зони Вранча підвищується починаючи з травня—червня 2023 р. Проведено дослідження можливого зв'язку сейсмічності Карпатського регіону та сучасних горизонтальних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому Закарпатського внутрішнього прогину за період 2023 р. (рисунок).

Аналіз часового розподілу сейсмічності Карпатського регіону за 2023 р. і сучасних горизонтальних рухів кори, виміряних в зоні Оашського глибинного розлому,показує, що сейсмічність у регіоні підвищується в періоди стиснення гірських порід; сейсмічна активізація в регіоні проходить після інтервалу часу, коли реєструють знакозмінні процеси в сучасних горизонтальних рухах кори, що підтверджують результати, отримані в попередні роки. Періоди, що охоплюють знакозмінні процеси, характерні акумуляцією геомеханічної енергії та розрядкою напруженодеформованого стану порід через швидкі рухи кори — землетруси. Сейсмічність Закарпаття та зони Вранча активізується в інтервалі часу знакозмінних геомеханічних рухів у другій половині року.

Висновки. Отримані величини рухів кори лежать в інтервалі визначених раніше характеристик сучасних горизонтальних рухів в Карпато-Балканському регіоні. Визначено характер руху земної кори в досліджуваний період — розширення порід, що змінило стиснення порід в 2022 р., величиною - 31 мкм, деформація порід становила –1087 нстр (–10,87·10<sup>-7</sup>). Величина зміщення земної кори за 2021 р. становила +30 мкм, деформація кори дорівнює1261 нстр (12,61·10<sup>-7</sup>). Сучасні рухи кори в центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину перебувають у стані періодичної зміни напрямків руху. Немає тривалого періоду однозначних рухів, що є важливим для формування сейсмічної активності регіону. Часовий розподіл місцевої сейсмічності за 2023 р. подібний до сейсмічності регіону в минулі роки. Коефіцієнт кореляції сейсмічності Закарпаття та рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому в місячному діапазоні становить 0,45. Сучасні результати досліджень підтверджують раніше отримані висновки,

що місцеві та близькі землетруси реєструються в періоди локальних стиснень земної кори. Часовий розподіл сейсмічності зони Вранча (Румунія) за 2023 р. передує сей-

#### Список літератури

- Андрущенко Ю.А., Лящук О.І., Фарфуляк Л.В., Амашукелі Т.А., Ганієв О.З., Осадчий В.І., Петренко К.С., Вербицький С.Т. Національний сейсмологічний бюлетень України за 2021 р. *Геофіз. журн.* 2023. Т. 44. № 6. С. 162—180. https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273649.
- Ігнатишин В., Малицький Д., Іжак Т., Ігнатишин М., Ігнатишин А. Моніторинг сейсмотектонічних процесів у Закарпатському внутрішньому прогині за результатами комплексних геофізичних спостережень. *Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2022. Т. З. № 98. С. 42—48. https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.05.
- Ігнатишин В., Малицький Д., Іжак Т., Молнар С., Ігнатишин М., Ігнатишин А. Геодинамічний стан Закарпатського внутрішнього прогину за результатами деформометричних спостережень у регіоні. *Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2024. Т. 1. № 104. С. 13—21. https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.02.
- Doskich, S., Savchuk, S., & Dzhuman, B. (2023). Determination of horizontal deformation of

смічності Закарпатського внутрішнього прогину в інтервалі двох місяців, що може бути підтвердженням зв'язку сейсмічності цих сейсмогенеруючих регіонів.

the Earth's crust on the territory of Ukraine based on GNSS measurements. *Geodynamics*, *2*(35), 89—98. https://doi.org/10.23939/jgd2023.02.089.

- Gnyp, A. (2022). Determination of differential locations and focal mechanism of the 2013—2015. Earthquake in Trosnyk, Transcarpathians: methodological aspects and analysis of the results. *Geodynamics*, 2(33), 50—63. https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.050.
- Nazarevych, A., Nazarevych, L., Bayrak, H., & Pyrizhok, N. (2022). Seismotectonics of the Oash and Transcarpathian deep faults junction zone (Ukrainian Transcarpathians). *Geodynamics*, 2(33), 99—114. https://doi. org/10.23939/jgd2022.02.100.
- Savchyn, I. (2022). Determination of the recent rotation poles of the main tectonic plates on the base of GNSS data. *Geodynamics*, 2(33), 17—27. https://doi.org/10.23939/ jgd2022.02.017.
- Tretiak, K., & Brusak, I. (2022). Modern deformations of the earth's crust in Western Ukraine based on «GEOTERRACE» GNSS network data. *Geodynamics*, 1(32), 16—25. https://doi. org/10.23939/jgd2022.02.016.

# Geophysical aspects of modern horizontal movements in the central part of the Transcarpathian Internal Trough

V.V. Ignatyshyn<sup>1,2</sup>, D.V. Malytskyy<sup>1</sup>, B.E. Kuplovskyi<sup>1</sup>, T.Y. Izhak<sup>2</sup>, S.S. Molnar D<sup>2</sup>, A.Y. Rats<sup>2</sup>, M.B. Ignatyshyn<sup>1</sup>, A.V. Ignatyshyn<sup>1</sup>, 2025

<sup>1</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine <sup>2</sup>Ferenc Rakoczi II Transcarpathian Hungarian College of Higher Education, Berehove, Ukraine

The work studies the spatial-temporal distribution of seismicity in the Carpathian region in 2023 and analyzes the results of research and scientific achievements in the study of geophysical processes in seismic-generating regions. The urgency of the research is due to the fact that recently, certain features of seismic activity in the seismic-generating region have been noted, and the probability estimates of strong, noticeable earthquakes have increased. The observations of modern horizontal crustal movements in the Oash deep fault zone for the studied period have been analyzed. The relationship between the modern crustal movements and the spatial-temporal distribution of seismicity in the Carpathian region (particularly the Transcarpathian Inner Trough and the Vrancea zone (Romania)) has been studied. The existence of sign-changing processes in horizontal crustal movements in the Transcarpathian Inner Trough in the studied time interval has been shown. In modern horizontal crustal movements, there has not been found a signchanging process that determines the nature of crustal movements for up to 10-12 years and is important in the formation of seismic activity in the region. The local seismicity correlates with the seismicity of a powerful seismic-generating region, the Vrancea zone: seismicity increases in both regions starting from May-June 2023. The seismicity of the region is associated with the processes of local compression of rocks measured in the tunnel of the deformometric observation station «Koroleve» of the Department of Seismicity of the Carpathian Region (S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine).

**Key words:** crustal movements, deformations, earthquakes, Transcarpathian Inner Trough, Oash deep fault zone.

#### References

- Andruschenko, Yu.A., Liaschuk, O.I., Farfuliak, L.V., Amashukeli, T.A., Haniiev, O.Z., Osadchyi, V.I., Petrenko, K.S., & Verbytskyi, S.T. (2023). National seismological bulletin of Ukraine for 2021. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(6), 162–180. https://doi.org/10.24028/ gj.v44i6.273649 (in Ukrainian).
- Ihnatyshyn, V., Malytskyi, D., Izhak, T., Ihnatyshyn, M., & Ihnatyshyn, A. (2022). Monitoring seismotectonic processes in the Transcarpathian inner trough based on the results of complex geophysical observations. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 3(98), 42—48. https://doi. org/10.17721/1728-2713.98.05 (in Ukrainian).
- Ihnatyshyn, V., Malytskyi, D., Izhak, T., Molnar, S., Ihnatyshyn, M., & Ihnatyshyn, A. (2024). Geodynamic state of the Transcarpathian inner trough based on the results of deformation monitoring observations in the region. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 1(104), 13—21. https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.02 (in Ukrainian).
- Doskich, S., Savchuk, S., & Dzhuman, B. (2023). Determination of horizontal deformation of

the Earth's crust on the territory of Ukraine based on GNSS measurements. *Geodynamics*, 2(35), 89—98. https://doi.org/10.23939/jgd2023.02.089.

- Gnyp, A. (2022). Determination of differential locations and focal mechanism of the 2013—2015. Earthquake in Trosnyk, Transcarpathians: methodological aspects and analysis of the results. *Geodynamics*, 2(33), 50—63. https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.050.
- Nazarevych, A., Nazarevych, L., Bayrak, H., & Pyrizhok, N. (2022). Seismotectonics of the Oash and Transcarpathian deep faults junction zone (Ukrainian Transcarpathians). *Geodynamics*, 2(33), 99—114. https://doi.org/10. 23939/jgd2022.02.100.
- Savchyn, I. (2022). Determination of the recent rotation poles of the main tectonic plates on the base of GNSS data. *Geodynamics*, 2(33), 17—27. https://doi.org/10.23939/jgd2022.02. 017.
- Tretiak, K., & Brusak, I. (2022). Modern deformations of the earth's crust in Western Ukraine based on «GEOTERRACE» GNSS network data. *Geodynamics*, 1(32), 16—25. https://doi. org/10.23939/jgd2022.02.016.

УДК552.1:53/551.14/.16

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322539

# Кореляційні залежності петрофізичних параметрів порід Українського щита за різних тисків і температур

О. Є. Карнаухова, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Використовуючи розширений банк даних Українського щита, проведено пошук кореляційних взаємозалежностей між петрофізичними параметрами порід. Підтверджено диференціацію виділених груп порід різного мінерального складу за швидкостями поширення у них пружних хвиль і щільності за різних тисків і температур. Встановлено наявність однозначних, переважно прямо пропорційних залежностей між пружними, пружними та електричними параметрами з достатньо високими парними коефіцієнтами кореляції.

Ключові слова: Український щит, структурно-текстурні особливості, мінеральний склад гірських порід, фізичні параметри, тиск, температура, кореляційні залежності.

Вступ. Комплексне дослідження пружно-щільнісних, теплових та електричних властивостей гірських порід в умовах одночасного впливу високих тисків (Р) і температур (Т), що відповідають різним глибинам їх залягання, дало можливість розробити низку методик, зокрема петрофізичного термобаричного моделювання при інтерпретації геофізичної інформації польових спостережень і особливо деяких аномалій [Корчини др., 2016; Буртний та ін., 2023]. Прямого фізичного зв'язку між петрофізичними параметрами часто немає. Проте, вивчаючи дефектно-структурні та фізичні характеристики порід у різних РТ-умовах (лабораторних або натурних), виявлено досить цікаві взаємодоповнюючі закономірності їх зміни залежно від пористості, вологості, структурної дезінтеграції. Цьому сприяв розвиток та вдосконалення методики статистичної обробки петрофізичних даних за високих Р і Т, яка багато в чому є самостійним та оригінальним напрямом дослідження твердих тіл. Основна особливість гірських порід — різноманітність їх речовинного (мінерального) складу, текстур, структур, дефектності, а звідси їх фізичних параметрів навіть для зразків одного родовища. Тому в зниженні неоднозначності отриманих результатів моделювання основне значення набуває статистична обробка даних при виборі об'єктів дослідження. За таких досліджень також мають враховуватися геолого-геофізичні дані, місце відбору зразків, зміни умов довкілля, часу тощо.

Результати досліджень. Досліджувані породи були розбиті на групи за мінеральним складом, структурно-текстурними особливостями, які найповніше характеризують Український щит (УЩ). Це різноманітні гранітоїди, діорити, основні та ультраосновні породи, гнейси. Було відібрано близько 300 зразків, менш змінених і без прихованих дефектів. Всі матеріали досліджень фізичних характеристик порід спільно з мінеральним складом кожного зразка були піддані статистичній обробці. Використовували програму STATISTICA 12, аналітичний пакет EXCEL, а також метод багатовимірного кореляційно-регресійного аналізу.

Citation: Karnaukhova, O.Ye. (2025). Correlation dependences of petrophysical parameters of rocks of the Ukrainian Shield under different pressures and temperatures. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 226—230. https://doi. org/10.24028/gj.v47i2.322539.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Для всіх груп порід УЩ різного мінерального складу підтверджено диференціацію за швидкостями поширення в них пружних хвиль і щільністю (р). Ця властивість порід, виявлена за атмосферних умов і кімнатної температури, також існує в умовах високого гідростатичного тиску  $(P_{r})$  і зберігається за одночасного впливу високих P i T. Значення пружнощільнісних параметрів у магматичних і ультраметаморфічних породах зростають від кислих до основних різновидів (таблиця). У метаморфічних порід диференціація більше залежить від відсоткового вмісту високошвидкісних та високощільнісних мінералів — піроксену і амфіболу, а також від структурно-текстурних особливостей.

Аналіз парних кореляційних залежностей швидкостей поширення пружних

хвиль поздовжньої  $(V_p)$  і поперечної поляризації  $(V_S)$  від вмісту головних породоутворюючих мінералів у гранітоїдах за дії на них різних P і T показав, що зі збільшенням вмісту кварцу пружні швидкості падають, зі збільшенням вмісту плагіоклазу — зростають, збільшення вмісту біотиту зменшує їх значення. Зі збільшенням вмісту піроксену, амфіболу зростають і швидкості поширення пружних хвиль [Буртний та ін., 2023].

Зі збільшенням основності порід істотну роль у залежностях пружних швидкостей від зовнішніх навантажень має вміст темноколірних мінералів — амфіболу і піроксену. Калісвий польовий шпат меншою мірою впливає на значення пружних швидкостей. Для більшості груп порід спостерігається тенденція до зменшення вели-

Середні значення пружно-щільнісних параметрів та середній мінеральний склад осно-
вних груп порід УЩ за атмосферних умов

Мінеральний склад (об.%)													
<i>V<sub>P</sub>,</i> км/с	<i>V<sub>S'</sub></i> км/с	р, г/см <sup>3</sup>	Плагіоклаз	КПШ	Кварц	Біотит	Піроксен	Αмφίδολ	Олівін	Актиноліт	Дроблена маса	Акцесорні мін.	Вторинні мін.
Граніти рівномірнозернисті													
5,73	3,23	2,626	35,3	29,1	26,6	6,6	2,8					1,8	1,3
Граніти порфіроподібні													
5,81	3,38	2,691	35,5	20,4	27,3	11,6		3,1				2,1	16,2
Граніти новоукраїнські													
5,75	3,46	2,661	27,3	38,1	26,5	4,3	1,2	2,9	_		3,9	1,0	3,2
Плагіограніти													
5,95	3,42	2,706	54,8	20,7	22,5	12,5	2,0	6,3			50,4	1,6	17,7
						Діој	рити						
6,09	3,43	2,774	70,1	0,5	10,9	6,6		10,0			—	2,3	
Чарнокітоїди													
6,26	3,59	2,770	39,4	17,7	28,1	3,1	11,5	4,8	_			2,9	0,6
				1	Пород	и осно	вного (	складу					
6,73	3,65	2,863	72,1	0,5	2,80	3,2	13,8	3,00	_	_	_	4,1	0,8
Породи ультраосновного складу													
6,37	3,73	3,180				—	23,9	22,3	3,92	17,4	—	14	15,1
Гнейси біотитові													
5,79	3,42	2,715	35,9	3,3	44,1	15,6	—	—	—		_	—	1,1
Гнейси амфібол-піроксенового складу													
6,67	3,75	3,096	31,3		3,3	3,3	38,6	26,7	_			4,2	

чин коефіцієнтів парних (r) і множинних кореляцій із зростанням PT-параметрів. Це свідчить про те, що з глибиною диференціація порід за пружними параметрами слабшає (у межах земної кори). На ділянці інверсії швидкості залежностей  $V_{P,S}=f(PT)=f(H)$  або у зонах низьких швидкостей (ЗНШ), які можуть бути провідниками міграції та локалізації вуглеводнів глибинного походження, вплив мінерального складу на пружні параметри порід виявляється невисоким і значно меншим, ніж структурні перетворення порід [Korchin, 2017; Буртний та ін., 2023].

Пористість і структурно-текстурні особливості гранітоїдів є основними факторами, що зумовлюють зміну V<sub>P</sub> за тиску до 3,5 кбар у зразках однакового мінерального складу. Встановлено, що вищі значення пружних параметрів мають породи з низькою тріщинуватістю і пористістю (*n*). Виявлено чітку нелінійну залежність швидкості від *n* за атмосферного тиску для гранітоїдів, що відрізняються за величиною зерен породоутворюючих мінералів. Градієнти зміни  $V_P = f(n)$  зростають із збільшенням їх розмірів. Серед кислих порід близького мінерального складу найбільші значення  $V_{P,S}$ мають грубозернисті утворення і зразки з помірним і підвищеним вмістом кварцу.

Вміст кварцу є суттєвим фактором, що впливає на величину теплопровідності (λ) породи загалом. На це вказує досить високий коефіцієнт парної кореляції (r=0,87÷ ÷0,89). За характером осереднених температурних залежностей проявляється чітка диференціація кварцвмісних (граніти, кварцові діорити) і безкварцових порід (габро, піроксеніти). Перші мають вищі градієнти зменшення теплопровідності з нагріванням, в останніх вона залишається майже не змінною.

Аналіз впливу мінерального складу на електричні параметри показав, що для більшості груп порід УЩ із підвищенням сумарного вмісту кварцу та плагіоклазу з різною інтенсивністю для різних типів порід зростає питомий електричний опір (*R*<sub>п</sub>)



Кореляційні залежності між пружними та електричними параметрами для гранітоїдів і гнейсів Українського щита за атмосферних умов.

Correlations between elastic and electrical parameters for granitoids and gneisses of the Ukrainian Shield under atmospheric conditions.

і знижується діелектрична проникність (є). Зі збільшенням кількості рудних мінералів зменшується R<sub>п</sub> та збільшується є.

Статистичними дослідженнями встановлено, що за атмосферних умов, за дії  $P_{\Gamma'}$  а також за дії високих P і T, зберігаються високі парні кореляційні залежності між  $V_P$  та  $V_S$  (r=0,94÷0,96). Існування такого тісного зв'язку можна використовувати у випадках, коли немає достатньої інформації про швидкості  $V_S$ . Наприклад, матеріали ГСЗ зазвичай представлені зміною із глибиною  $V_P$ . Тому, використовуючи розрахункові залежності  $V_S=f(V_P)$ , можна зробити розріз ГСЗ більш інформативним.

У результаті статистичного аналізу встановлено наявність однозначних, хоч і відносно слабких взаємозалежностей між теплопровідністю порід та їх пружними характеристиками (величина коефіцієнтів парних кореляцій варіює у межах від 0,3 до 0,5). Фіксуються чіткі прямопропорційні залежності.

Проаналізовано кореляційні залежності між  $V_{P,S'}$  р, стисливістю ( $\beta$ ),  $R_{\Pi'}$  відносною діелектричною проникністю зразків на частоті 700 кГц ( $\varepsilon_{700}$ ) в умовах атмосферного тиску і кімнатної температури повітряно-сухих проб.  $R_{\Pi}$  вимірювали на постійному струмі [Буртний та ін., 2023]. Виявлено чітку кореляцію між цими параметрами з достатньо високими коефіцієнтами *г*. Деякі результати представлені на рисунку.

Для гранітоїдів виявлено лінійні залежності виду  $\varepsilon_{700}$ =-*A*+*BV*<sub>P</sub>(*r*=0,76) та lgR<sub>µ</sub>=

#### Список літератури

- Буртний П.О., Карнаухова О.Є., Коболев В.П., Корчін В.О., Кравчук М.В., Денисенко Б.В., Нех О.С. Довідник (кадастр) фізичних параметрів гірських порід Українського щита за високих тисків і температур. Київ: Наук. думка, 2023, 281 с. https://doi. org/10.15407/978-966-00-1878-5.
- Корчин В.А., Буртный П.А., Коболев В.П. Зоны разуплотнения земной коры центральной части Украинского щита (по материалам петрофизического и сейсмогравитацион-

= $A-BV_P(r=-0,71)$ і нелінійна  $\varepsilon_{700}=20,757\beta^{-1,021}$ (r=-0,72); для гнейсів —  $\varepsilon_{700}=-A+BV_P(r=0,52)$ і  $\varepsilon_{700}=A-B\beta(r=-0,64)$ . Розкид точок від апроксимаційних кривих становить трохи більше 20 %. Значення *r* значною мірою зумовлені структурними особливостями та дефектним станом мінеральної речовини. Для дрібно-і середньозернистих порід досконалої структури ці залежності проявляються чіткіше порівняно із крупнозернистими, які мають ослаблені міжзернові контакти. Тісний зв'язок між цими параметрами може порушитись лише при великих значеннях пористості у високоомних породах.

Висновки. У результаті виконаної статистичної обробки достатньо великого обсягу експериментального фактичного матеріалу встановлено наявність однозначних, хоч і різного ступеня достовірності, кореляційних взаємозалежностей між різними фізичними параметрами, мінеральним складом, структурно-текстурними особливостями для виділених типів порід УЩ. Отримані результати були використані під час петрофізичного термобаричного моделювання окремих ділянок УЩ з використанням даних ГСЗ [Корчин и др., 2016].

Результати аналізу структурно-дефектного стану мінеральної речовини в кореляційній залежності від електричних параметрів ( $R_{\rm n}$  і є) можуть бути використані при побудові глибинних геоелектричних розрізів на підставі даних вибухової сейсмології, а також при створенні комплексних моделей літосфери та інтерпретації матеріалів польових геофізичних спостережень.

ного моделирования). *Геофиз. журн*. 2016. Т. 38. № 3. С. 84—99. https://doi.org/10.24028/ gzh.0203-3100.v38i3.2016.107781.

Korchin, V. (2017). Anomalies of low density in the crystal line crust of thermobaric origin: a new insight into migration and localization of hydrocarbons. In S. Gaci, O. Hachay (Eds.), Monograph 72: Oil and Gas Exploration: Methods and Application (pp. 237—257). American Geophysical Union, Wiley. https:// doi.org/10.1002/9781119227519.ch15.

# Correlation dependences of petrophysical parameters of rocks of the Ukrainian Shield under different pressures and temperatures

## O.Ye. Karnaukhova, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Using an extended data bank of the Ukrainian Shield, a search for correlations between petrophysical parameters of rocks was conducted. The differentiation of selected groups of rocks of different mineral composition by the propagation velocities of elastic waves and density at different pressures and temperatures has been confirmed. Unambiguous, mainly directly proportional dependencies have been established between elastic, elastic and electrical parameters with high enough pair-wise correlation coefficients.

**Key words:** Ukrainian Shield, structural and textural features, mineral composition of rocks, physical parameters, pressure, temperature, correlation dependencies.

#### References

- Burtny, P.V., Karnaukhova, O.Ye., Kobolev, V.P., Korchin, V.O., Kravchuk, M.V., Denysenko, B.V., & Nech, O.S. (2023). Directory (cadastre) of physical parameters of rocks of the Ukrainian shield at high pressures and temperatures. Kyiv: Naukova Dumka, 281 p. https://doi. org/10.15407/978-966-00-1878-5 (in Ukrainian).
- Korchin, V., Burtny, P.A., & Kobolev, V.P. (2016). Zones of decompaction of the Earth crust of the central part of the Ukrainian Shield (according to materials of petrophysical and seismigravita-

tional modeling). *Geofizicheskiy Zhurnal, 38*(3), 84—99. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107781 (in Russian).

Korchin, V. (2017). Anomalies of low density in the crystal line crust of thermobaric origin: a new insight into migration and localization of hydrocarbons. In S. Gaci, O. Hachay (Eds.), Monograph 72: Oil and Gas Exploration: Methods and Application (pp. 237—257). American Geophysical Union, Wiley. https:// doi.org/10.1002/9781119227519.ch15.

УДК 550.8+553.9

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322540

# Визначення та основні петрофізичні параметри ущільненого колектора на прикладі Дніпровсько-Донецької западини

## Г.О. Кашуба<sup>1</sup>,С.С. Куровець<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>АТ «Укргазвидобування», Київ, Україна <sup>2</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Citation: Kashuba H.O., & Kurovets S.S. (2025). Identification and main petrophysical parameters of a compacted reservoir on the example of the Dnipro-Donets Depression. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 230—236. https://doi. org/10.24028/gj.v47i2.322540.

Питання енергетичної безпеки України та диверсифікації напрямів пошукових робіт на сьогодні має надзвичайно велике значення. При цьому низькопроникні, низькопористі гірські породи становлять значну частину продуктивних комплексів нафтогазоносних регіонів України. Дослідження зосереджено на відкладах Дніпровсько-Донецької западини як основного нафтогазоносного регіону України. Проведено аналіз зміни граничного значення пористості залежно від глибини залягання для практично всіх продуктивних комплексів западини. Наведено граничні значення основних петрофізичних параметрів для ущільнених колекторів.

**Ключові слова**: ущільнений колектор, продуктивні відклади, петрофізичні параметри, пористість, Дніпровсько-Донецька западина.

Вступ. Поняття та критерії виділення низькопористого колектора введено в монографії [Федишин, 2005]. Автором запропоновано розділяти високопористі породи від низькопористих за коефіцієнтом відкритої пористості (К<sub>п</sub>). Як граничне значення  $K_n^{rp}$  запропоновано пористість 10—12 %. На сьогодні немає чіткого визначення загальноприйнятого терміну ущільнений колектор. Різні автори трактують його по-різному і тому має місце повна його невизначеність. Появі терміну ущільнений колектор передував термін «напівколектор». Перше вживання цього терміну відноситься до 2000-х років при дослідженнях нижнього поверху нафтогазоносності Шебелинського газоконденсатного родовища (Західношебелинська площа).

Результати досліджень. Після нашої публікації [Кашуба та ін., 2015] термін ущільнений колектор почали використовувати для означення низькопроникних порід, які містять сланцювато-глинисті та ущільнені карбонатні та теригенні породи [Лукин, 2014; Вакарчук, 2015]. За даними авторів нафту і газ, що видобувають з цих порід, називають в англомовній літератуpi «natural shale oil and gas» (нафта і газ сланців) і «tight oil and gas» (нафта і газ ущільнених порід). Важливо, автори [Кашуба та ін., 2015] звернули увагу на високу дисперсність гірських порід, віднесених до напівколекторів, і що вони «можуть бути означені і як наноколектори». Отже, згідно з проведеними нами дослідженнямидо визначення ущільнений колектор можна віднести: «tight oil and gas» (нафта і газ ущільнених порід, поклади газу «центральнобасейнового» типу), низькопористі породи (ущільнені різновиди у покладі), сланці, що містять газоподібні та рідкі вуглеводні.

Згідно з класичними поняттями [Sylvain, 1978], граничне значення пористості порідколекторів зменшується із збільшенням глибини через процеси ущільнення. Методологія та способи визначення граничних значень пористості досить детально описані в літературі [Методичні..., 2016] і не потребують додаткових коментарів. Проведені у цьому напрямі дослідження так і не були узагальнені, а отримані граничні значення пористостей для різних глибин залягання та різних стратотипів порід часто суперечили один одному — більші значення  $K_n^{\rm rp}$  відповідали породам, що залягають значно глибше. Авторами проведено дослідження зміни граничної пористості з глибиною для колекторів, літологічно представлених пісковиками, які належать до різних стратиграфічних відкладів. Об'єктом досліджень були продуктивні комплекси Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), оскільки вони характеризуються не тільки різними стратиграфічними рівнями, а й широким діапазоном глибин залягання одновікових відкладів (від продуктивних пісковиків картамиської світи нижньої пермі до відкладів турнейського ярусу нижньокам'яновугільної системи). В аналізі брало участь понад 100 родовищ і площ, які належать до різних тектонічних елементів ДДЗ, характеризуються продуктивними відкладами різної стратиграфії, де визначені граничні значення пористості, і затверджені державною комісією запасів України. На рис. 1 приведено основні результати досліджень.



Рис. 1. Зміна граничного значення пористості залежно від глибини залягання для нижньопермськонижньокам'яновугільних пісковиків ДДЗ.

Fig. 1. Change in the porosity limit depending on the depth of occurrence for the Lower Permian-Lower Carboniferous sandstones of the DDD.

Таблиця 1. Числові значення граничного коефіцієнту пористості для різних стратиграфічних відкладів ДДЗ

Вік	$P_1^{\text{kt}} + C_3$	$C_2^{\mathrm{m}}$	$C_2^{b}$	$C_2^{s2}$	$C_1^{s1}$	$C_1^{\mathbf{v}+\mathbf{t}}$
К <sup>гр</sup> , д.од.	0,11	0,105	0,105	0,1	0,085	0,075

Зазначимо, що на рис. 1 червоним кольором позначено точки, що відповідають за прийняті граничні значення пористості, які були зменшені при наступних перерахунках запасів вуглеводнів (наприклад, для підсольових родовищ — Єфремівське родовище 1968, 2020 рр., Кегечівське родовище 1968, 2020 рр., Кегечівське родовище 1972, 2017 рр.). До цієї групи увійшли також дані щодо родовищ, де відклади об'єднувалися з іншими та за запасами не є основними на родовищі (Рибальське, Качанівське родовище та ін.).

Отже, для піщано-алевритових порід ДДЗ числове значення  $K_n^{rp}$  не залежить від глибини їхнього залягання (у межах доступних глибин досліджень), але зменшується в міру збільшення віку порід від  $K_n^{rp} \approx 0,11(P_1^{kt}+C_3)$  до  $K_n^{rp} \approx 0,075(C_1^{v+t})$ . Отриманий результат є доконаним фактом, що змінює класичні уявлення про зміну граничного значення пористості з глибиною (у межах доступних глибин досліджень) та приводить до ряду основоположних висновків, які є темою окремих досліджень і будуть опубліковані нами надалі. Водночас отримані результати вказують, що для визначення ущільнений колектор використовувати якесь одне усереднене значення граничної пористості (10—12 %) для різних стратотипів порід неправильно. Для різновікових відкладів ДДЗ числові значення граничного коефіцієнту пористості наведено у табл. 1.

Для таких умов термін низькопористий колектор, для визначення якого використовується одне граничне значення  $K_n^{rp}$  на рівні 10 %, є не зовсім коректним. Якщо пласт характеризується пористістю 9 %, то для одних стратиграфічних відкладів він буде характеризуватися пористістю вищою за їх граничне значення (для пісковиків візейського ярусу нижнього карбону  $(C_1^{v+t})$ ,  $K_{\Pi}^{rp} = 0,075$ , ДДЗ) і буде досить хорошим колектором, а для інших — меншою (для пісковиків московського ярусу середнього карбону  $(C_2^m)$ ,  $K_{\pi}^{rp} = 0,105$ , ДДЗ), власне буде ущільненим згідно з класичним підходом. У такому разі термін «ущільнений колектор» відповідає фізичній сутності таких геологічних різновидів (утримує, але не віддає пластовий флюїд). Отже, ущільнений колектор — це гірська порода, пористість якої менша від її кондиційного (граничного) значення  $K_{\Pi}^{rp}$ , але яка здатна містити вільний флюїд (пористість якої більша від граничного абсолютного значення пористості).

Граничне абсолютне значення пористості  $(K_n^{rp.a6c})$  визначається за наявності значень ефективної пористості  $(K_{ne\phi})$ , отриманих на керновому матеріалі. Аналіз зв'язку  $K_{ne\phi} = f(K_n)$  для різних стратотипів колекторів показує, що вільний флюїд  $(K_{ne\phi} > 0)$  у порах з'являється тільки за умови, якщо відкрита пористість досягає якоїсь величини, набагато меншої заїї граничне значення [Кашуба, Башкіров, 2024]. Власне, вона відповідає  $K_n^{rp.a6c}$ . Ця величина для різних стратиграфічних і літологічних відкладів буде різною, як і зв'язок

 $K_{\text{пеф}} = f(K_{\text{п}})$ . Для прикладу на рис. 2 наведено узагальнені петрофізичні зв'язки  $K_{\text{пеф}} = f(K_{\text{п}})$ ,  $K_{3\text{B}} = f(K_{\text{п}})$  типу «кернкерн» для піщано-алевритових порід нижньопермських і верхноьокарбонових відкладів підсольових родовищ центрального грабену ДДЗ. До уваги взято всі доступні кернові дані з вищезгаданих родовищ, де є прямі визначення параметрів  $K_{\text{пеф}}$ ,  $K_{3\text{B}}$ (коефіцієнт зв'язаної води).

На рис. 2 наведено зв'язок  $K_{neb} = f(K_n)$ і показано, що вільний флюїд (*К*<sub>пеф</sub> > 0) у порах порід-колекторів може бути тільки за умови, якщо відкрита пористість більша або дорівнює 6,0 %. Власне, вона відповідає граничному абсолютному значенню пористості для піщано-алевритових порід нижньопермських і верхноьокарбонових відкладів ДДЗ. Оскільки при побудові зв'язків  $K_{neb} = f(K_n), K_{3B} = f(K_n)$  використано дані різних підсольових родовищ центрального грабена ДДЗ, відклади яких залягають на різних глибинах, а отриманий узагальнений зв'язок  $K_{neb} = f(K_n) \in$ досить тісним (коефіцієнт кореляції ~0,95), можна стверджувати, що числове значення  $K_n^{\text{rp.abc}}$ , як і граничної для одного стратиграфічного рівня, не залежить від глибини залягання відкладів.



Рис. 2. Узагальнені петрофізичні зв'язки  $K_{\Pi \ e \varphi} = f(K_{\Pi})$ ,  $K_{3B} = f(K_{\Pi})$  типу «керн-керн» для піщано-алевритових порід нижньопермських і верхньокарбонових відкладів ДДЗ.

Fig. 2. Generalized petrophysical relations  $m_{\text{ef}} = f(mK_{\Pi})$ ,  $K_{\text{sw}} = f(m)$ , of the «core-core» type for sandy-siltstone rocks of the Lower Permian and Upper Carboniferous deposits of the DDD.

Інший узагальнений зв'язок, наведений на рис. 2  $(K_{3B} = f(K_{\Pi}))$ , показує, що зв'язана вода в порах при граничній пористості 11 % становить ~48 %, а на вільний флюїд припадає 52% об'єму порового простору. Такі дані досить добре можна порівняти з граничними значеннями коефіцієнтів нафтогазонасиченості  $(K_{\rm Hr}^{\rm rp})$ , отриманими незалежно при обґрунтуванні підрахункових параметрів різними авторами цієї групи родовищ. В умовах граничного насичення:  $K_{\rm Hr}^{\rm rp} = 1 - K_{_{3B}}$ . Тому при граничній пористості у нашому випадку  $K_{\rm Hr}^{\rm rp}$ дорівнюватиме 0,52. Враховуючи зв'язок  $K_{_{3B}} = f(K_{_{\Pi}})$  і вищенаведені міркування для ущільнених колекторів коефіцієнт нафтогазонасичення буде меншим за його граничне значення  $K_{\rm Hr}^{\rm rp}$ , обґрунтованого для класичних колекторів. Це все логічно, оскільки при зменшенні пористості від її граничного значення (область ущільнених колекторів) збільшується відсоткове заповнення пор зв'язаною водою — зменшується об'єм порового простору, причому вміст зв'язаної води зменшується не пропорційно пористості (за рахунок капілярних сил у системі капілярів, що створюють пори). Ці висновки потребують приведення великої кількості фактичного матеріалу та аналізів розробки родовищ, особливо на їх завершальних стадіях.

Згідно з дослідженнями [Федишин, 2005], з наближенням водонасичення до 50—60 % фазова проникність для газу різко зменшується і незалежно від пористості фільтрація газу при депресії, що може бути створена в реальних умовах свердловини, починається за умови газонасичення породи дещо більше 20 %, тобто при К<sub>зв</sub><80 %. Отже, величина нижньої межі ущільнено-го колектора  $K_{\Pi}^{\mathrm{rp.a6c}}$  має бути скорегована з огляду на зв'язок  $K_{3B} = f(K_{\Pi})$ , наведений на рис. 2. Так, для піщано-алевритових порід нижньопермських і верхноьокарбонових відкладів ДДЗ вона становитиме ~0,07 д.од. Що ж до області коричневих точок на усередненому зв'язку  $K_{3B} = f(K_{\Pi})$ , то вони відповідають глинистим (заглинизованим) пісковикам. На цьому етапі вони не бралися до уваги, хоча чітко ілюструють, що глинистість буде однією з основних властивостей ущільнених колекторів при оцінюванні їхньої промислової цінності.

Такі дослідження проведено нами практично для всіх продуктивних комплексів ДДЗ (від продуктивних пісковиків картамиської світи нижньої пермі до відкладів турнейського ярусу нижньокам'яновугільної системи). Числові значення вищеописаних петрофізичних параметрів для різновікових відкладів ДДЗ наведено у табл. 2.

Для піщано-алевритових порід ДДЗ числове значення  $K_{\Pi}^{\text{rp.a6c}}$ , як і граничної, не залежить від глибини їх залягання (у межах доступних глибин досліджень), але зменшується у міру збільшення віку порід від  $K_{\Pi}^{\text{rp.a6c}} \approx 0,06 \left( P_1^{\text{kt}} + C_3 \right) до K_{\Pi}^{\text{rp}} \approx 0,003 \left( C_1^{\text{v+t}} \right).$ 

Для означення ущільненого колектора через кількісні значення пористості нами пропонується використовувати граничну

Вік	$P_1^{\text{kt}} + C_3$	$C_2^{\mathrm{m}}$	$C_2^{b}$	$C_2^{s2}$	$C_1^{\rm s1}$	$C_1^{\mathbf{v}+\mathbf{t}}$
К <sup>гр</sup> , д.од.	0,11	0,105	0,105	0,1	0,085	0,075
К <sup>гр.абс</sup> , д.од.	0,06	0,055	0,052	0,047	0,033	0,03
К <sup>гр</sup> , д.од.	0,057	0,053	0,054	0,55	0,52	0,053
К <sup>гр.абс</sup> при К <sub>3В</sub> =0,8 д.од.	0,07	0,06	0,06	0,053	0,43	0,4
К <sub>зв</sub> , д.од.	0,48	0,49	0,48	0,45	0,4	0,3

Таблиця 2. Граничні значення петрофізичних параметрів для ущільнених колекторів

 $K_{n}^{rp}$  та абсолютно граничну  $K_{n}^{rp.abc}$ . У такому разі ущільнений колектор — це гірська порода, пористість якої змінюється в наступних межах:  $K_{\Pi}^{\text{rp.abc}} \leq K_{\Pi} \leq K_{\Pi}^{\text{rp}}$ .

З урахуванням вищевикладеного підсумовуємо, що за значенням коефіцієнта пористості гірські породи можна розділити так:

- К<sub>п</sub> ≥ К<sup>гр</sup><sub>п</sub> порода колектор;
   К<sup>гр.абс</sup><sub>п</sub> ≤ К<sub>п</sub> ≤ К<sup>гр</sup><sub>п</sub> ущільнений ко-
- $K_{n} \leq K_{n}^{\text{гр.абс}}$  не колектор (щільна порода).

Отже, для різних стратиграфічних відкладів ДДЗ при розділенні гірських порід на колектор — ущільнений колектор щільна порода слід використовувати значення граничних коефіцієнтів пористості, наведені у табл. 2.

Висновки. 1. Отримано числові значення петрофізичних параметрів, що описують ущільнені колектори (див. табл. 2).

2. Запропоновано використовувати конкретні значення граничних пористостей  $\left(K_{\Pi}^{\mathrm{rp}},K_{\Pi}^{\mathrm{rp.a6c}}
ight)$  для розділення гірських порід на колектор — ущільнений колектор —

#### Список літератури

- Вакарчук С.Г. Ресурсний потенціал нетрадиційних вуглеводнів ущільнених карбонатних порід турнейського ярусу ДДЗ. Нафтогазова галузь України. 2015. № 5. С. 46—49.
- Кашуба Г.О., Башкіров Г.Л. До питання з визначення граничних значень петрофізичних параметрів. Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування. Матеріали Дев'ятої між нар. наук.-практ. конф, 7—11 жовтня 2024 р., м. Львів. Київ: ДКЗ, 2024, C. 131-138.
- Кашуба Г., Карпенко І., Колісніченко В., Лелик Б. Нижньопермські антикліналі Дніпровсько-Донецької западини — як потенційні резервуари газу ущільнених порід. Зб.

щільна порода для різних стратиграфічних відкладів (див. табл. 2).

3. Числове значення граничної пористості  $\left(K_{n}^{rp}\right)$  є практично постійною величиною для одновікових порід і не залежить від глибини їхнього залягання.

4. Числове значення граничної пористості  $(K_n^{rp})$  зменшується в міру збільшен-ня віку порід від  $K_n^{rp} \approx 0.11 (P_1^{kt} + C_3)$  до  $K_{\Pi}^{\Gamma p} \approx 0,075 \left( C_{1}^{\nu+t} \right).$ 

5. Числове значення граничної ефективної пористості  $\left(K_{\mathrm{ne}\phi}^{\mathrm{rp}}\right)$  є практично постійною величиною для всіх продуктивних стратиграфічних комплексів та становить у середньому 0,055 (див. рис. 2).

6. Добуток граничних значень коефіцієнтів пористості та нафтогазонасиченості є постійною величиною для різних стратиграфічних відкладів та у середньому становить  $K_{\Pi}^{\Gamma p} \cdot K_{H\Gamma}^{\Gamma p} = 0,055$ .

7. Для ущільнених колекторів коефіцієнт нафтогазонасичення буде меншим за його граничне значення *К*<sup>гр</sup><sub>нг</sub>, обґрунтованого для класичних колекторів і буде постійно зменшуватися у міру зменшення пористості.

наук. праць Ін-ту геол. наук НАН України. 2015. T. 8. C. 181-189.

- Лукин А.Е. Геофизические методы и проблема выявления нетрадиционных источников природного газа. Геол. журн. 2014. № 1. C. 7-22.
- Методичні рекомендації з підрахунку запасів та оцінки ресурсів нафти та газу у надрах і їхньої класифікації. Київ: Вид. ДКЗ України, 2016, 325 c.
- Федишин В.О. Низькопористі породи-колектори газу промислового значення. Київ: Вид. УкрДГРІ, 2005, 148 с.
- Sylvain, J. (1978). Geologic Well Log Analysis by Pirson. Gulf Pub. Co., Book Division, 377 p.

# Identification and main petrophysical parameters of a compacted reservoir on the example of the Dnipro-Donets Depression

H.O. Kashuba<sup>1</sup>, S.S. Kurovets<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>JSC «Ukrgazvydobuvannya», Kyiv, Ukraine <sup>2</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

The issue of Ukraine's energy security and diversification of exploration directions is of extremely great importance today. At the same time, low-permeability, low-porosity rocks make up a significant part of Ukraine's productive complexes of the oil and gas regions. The research is focused on the deposits of the Dnieper-Donets Depression as Ukraine's main oil and gas region. An analysis of the change in the threshold value of porosity depending on the depth of occurrence for almost all productive complexes of the Dnieper-Donets Depression was carried out. The threshold values of the main petrophysical parameters for compacted reservoirs are given.

**Key words:** compacted reservoir, productive deposits, petrophysical parameters, porosity, Dnieper-Donets Depression.

#### References

- Vakarchuk, S.G. (2015). Resource potential of unconventional hydrocarbons of compacted carbonate rocks of the Tournei stage of the DDD. *Oil and gas industry of Ukraine*, (5), 46—49 (in Ukrainian).
- Kashuba, G.O., & Bashkirov, G.L. (2024). To the issue of determining the limit values of petrophysical parameters. Subsoil use in Ukraine. Investment prospects. Materials of the Ninth International Scientific and Practical Conference, October 7—11, 2024, Lviv (pp. 131—138). Kyiv: DKZ (in Ukrainian).
- Kashuba, G., Karpenko, I., Kolisnichenko, V., & Lelyk, B. (2015). Lower Permian anticlines of the Dnipro-Donets basin as potential gas reservoirs of compacted rocks. *Collection of papers*

of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, 8, 181–189 (in Ukrainian).

- Lukin, A.E. (2014). Geophysical methods and the problem of identifying non-traditional sources of natural gas. *Geological Journal*, (1), 7–22 (in Russian).
- Methodological recommendations for the calculation of reserves and assessment of oil and gas resources in the subsurface and classification. (2016). Kyiv: DKZ of Ukraine, 325 p. (in Ukrainian).
- Fedyshyn, V.O. (2005). *Low-porosity rocks-collectors of gas of industrial importance*. Kyiv: Publ. UkrDGRI, 148 p. (in Ukrainian).
- Sylvain, J. (1978). *Geologic Well Log Analysis by Pirson*. Gulf Pub. Co., Book Division, 377 p.

УДК 550.341

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322542

# Глибинна будова та вуглеводневий потенціал середньої частини північно-західного шельфу Чорного моря за даними густинного моделювання

## М.В. Козленко, Ю.В. Козленко, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Зважаючи на необхідність забезпечити енергетичну незалежність України після закінчення війни, доцільно заздалегідь виявити структури, придатні для видобутку вуглеводневої сировини у недосяжному на сьогодні регіоні північно-західного шельфу Чорного моря. Для цього було проведено двовимірне гравітаційне моделювання за мережею субмеридіональних профілів, яке дозволило визначити глибинну будову та розломну тектоніку. На основі аналізу результатів розрахунків визначено перспективність району досліджень на поклади вуглеводнів, що може бути використано під час пошукових роботах на зазначеній акваторії.

Ключові слова: північно-західний шельф Чорного моря, гравітаційне моделювання, глибинна будова, розломна тектоніка, вуглеводневий потенціал.

Вступ. Ця робота підсумовує вивчення густинної структури центральної частини північно-західного шельфу Чорного моря (ПЗШ) для отримання об'ємної картини будови земної кори з подальшим виявленням структур, придатних для видобутку вуглеводневої сировини (ВВ).

Мета статті — вивчення глибинної будови земної кори методом двовимірного густинного моделювання з подальшим визначенням вуглеводневого потенціалу за системою субмеридіональних профілів у середній частині ПЗШ між півостровом Тарханкут на сході та островом Зміїний на заході.

При розрахунках використовувалася схема аномалій сили тяжіння у вільному повітрі з перерізом 0,5 мГал, побудована авторами за фондовими матеріалами гравіметричних зйомок, проведених донними гравіметрами в масштабі 1:100 000 з точністю вимірювань 0,18 мГал. На рис. 1 надано спрощену схему з перерізом 2,5 мГал. Методику моделювання викладено в статті [Козленко, 1978]. Розрахунки виконувалися за програмою [Козленко та ін., 1997].

Глибинна будова за результатами двовимірного моделювання. Системне двовимірне густинне моделювання дозволило впевнено виділити блоки земної кори з принципово різною будовою (рис. 2). На всіх п'яти профілях Східноєвропейська платформа (СЄП) чітко відрізняється від Скіфської плити (СП), кора якої характеризується наявністю осадово-метаморфічного шару.

Завдяки комплексному використанню результатів проведеного моделювання та характерним ознакам гравітаційного поля було виявлено просторове положення південної межі СЄП. Її визначення необхідно для виділення районів, більш перспективних на пошуки вуглеводневої сировини. Вочевидь, чим молодша в тектонічному плані структура, тим більший потік флюїдів надходить з її глибин, і тим більша ймовір-

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Kozlenko M.V., & Kozlenko Yu.V. (2025).Depth structure and hydrocarbon potential of the middle part of the northwestern Black Sea shelf, according to density modeling. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 237—241. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322542.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



Рис. 1. Схема аномалій сили тяжіння у вільному повітрі середньої частини північно-західного шельфу Чорного моря, мГал, з положенням інтерпретаційних профілів. Червоним прямокутником позначено район досліджень.

Fig. 1. Scheme of free-air gravity anomalies in the middle part of the northwestern shelf of the Black Sea, mGal, with the interpretation profiles shown. The red rectangle indicates the study area.

ність виникнення родовищ ВВ. Оскільки СЄП — дорифейське утворення, майже не порушене пізнішою активізацією, а в межах Скіфської плити відзначаються ознаки тектонічної активності до альпійської епохи включно, остання є більш привабливою для пошуків покладів вуглеводнів.

Згідно з результатами проведеного моделювання, СП складається з розділених транскоровими розломами декількох блоків, які, незважаючи на відмінності між профілями, мають достатньо спільну будову. З півночі на південь це зона Біостромна, Каркінітський прогин (КП) та Каламітський вал (КВ), які відрізняються один від одного різними характеристиками осадового чохла та консолідованої кори. Між КП і КВ виявлено блок, в якому досить потужний осадовий чохол з одного боку та наявність консолідованих відкладів з іншого не дозволяють віднести цю ділянку ані до КП, ані до КВ.

Південною межею Скіфської плити в районі досліджень є Північноевксинський



Рис. 2. Гравітаційні моделі вздовж інтерпретаційних профілів: 1 — спостережена аномалія поля сили тяжіння у вільному повітрі; 2 — модельна аномалія; 3—16 — шари моделі, цифри — значення середньої густини, г/см<sup>3</sup> (3 — вода, 4 —  $N_1^2$ -Q, 5 —  $P_3$ - $N_1^1$ , 6 – Р<sub>1-2</sub>, 7—К<sub>2</sub>, 8—К<sub>1</sub>, 9—Ј<sub>2-3</sub>, 10—Т<sub>3</sub>-Ј<sub>1</sub>, 11—граніти, 12 — осадово-метаморфічні породи, 13 — гранодіоріти, 14 — діоріти, 15 — габро, 16 — верхня мантія); 17 — ущільнені ділянки; 18 — розущільнені ділянки; 19 — межа СЄП/СП; 20 — розломи. Б — зона Біостромна, Гр — Голіцинське родовище, Д — прогин Дворянина, KB — Каламітський вал, KП — Каркінітський прогин, ПнЕ — Північноевксинський розлом. Fig. 2. Gravity models along the interpretive profiles: 1 — the observed free-air gravity anomaly; 2 — model anomaly; 3-16 — model layers, numbers — density values, g/cm<sup>3</sup> (3 — water, 4 —  $N_1^{2}$ -Q, 5 —  $P_3$ - $N_1^{1}$ , 6  $-P_{1-2'}$  7  $-K_{2'}$  8  $-K_{1'}$  9  $-J_{2-3'}$  10  $-T_{3}$   $J_{1'}$  11 granites, 12 — sedimentary-metamorphic rocks, 13 granodiorites, 14 — diorites, 15 — gabbro, 16 — upper mantle); 17 — pressed rock areas; 18 — soft rock areas; 19 — EEP/SP boundary; 20 — faults. B — Biostromna Zone, Γp — Golitsynske Field, Δ — Dvoryanin Trough, KB — Kalamitsky Swell, KΠ — Karkinitsky Trough, ПнЕ — North Euxine Fault.



Рис. 3. Схема вуглеводневого потенціалу досліджуваного району за результатами густинного моделювання: 1— межа СЄП/СП; 2— межа Каламітського валу за [Козленко, Козленко, 2024]; 3— межа зони Біостромна; 4— рифтогени Каркінітського прогину; 5— розломи; 6— область розповсюдження газових сипів; 7— родовища; 8—11— локальні структури (8 — перспективні, 9— малоперспективні, 10— умовно перспективні, 11— неперспективні). На врізці прямокутником позначено район досліджень.

Fig. 3. Scheme of the hydrocarbon potential of the study area based on the results of the density modeling: 1 - EEP/SP boundary; 2 - Kalamitsky Swell boundary according to [Kozlenko, Kozlenko, 2024]; 3 - Biostrom-na Zone boundary; 4 - riftogens of the Karkinitsky Trough; 5 - faults; 6 - gas plume distribution area; 7 - hydrocarbon fields; 8 - 11 - local structures (8 - promising, 9 - not as promising, 10 - conditionally promising, 11 - unpromising). The study area is shown in the inset by the rectangle.

розлом. Південніше знаходиться прогин Дворянина, який різко відрізняється від СП за будовою літосфери. Зменшена потужність осадово-метаморфічної основи і консолідованої кори загалом дозволяють віднести його до блока субконтинентального типа, який є перехідним до Західно-Чорноморської западини.

Вуглеводневий потенціал за результатами проведених досліджень. Критеріїв дистанційного визначення ВВ-перспективності досить багато. Авторами пропонується варіант вирішення цієї проблеми за допомогою інтерпретації результатів густинного моделювання. Серед критеріїв оцінки ВВ-перспективності можна виділити:

1. Наявність розломів в межах локальних потенційно перспективних структур, оскільки дерівати у вигляді струменів метану та інших вуглеводнів проникають до земної поверхні по тріщинам природного флюїдорозриву [Лукин, 2015].

2. Глибина залягання поверхні кристалічних порід. Здіймання цієї поверхні і зближення її з осадовим чохлом зменшує розсіювання мантійного матеріалу та збільшує його надходження до потенційних пасток вуглеводнів.

3. *Розущільнення в осадовому шарі*, оскільки воно зафіксовано моделюванням в межах Голіцинського родовища (пр. IV рис. 2).

4. Значення різницевої аномалії (Δg<sub>p</sub>). За результатами моделювання Голіцинське родовище характеризується невеликими від'ємними значеннями, які, скоріш за все, викликані підвищеною тріщинуватістю, що є фактором забезпечення колекторських властивостей.

Список літератури

- Козленко В.Г. Гравитационная модель тектоносферы и нормальные значения силы тяжести. Докл. АН УРСР. Сер. Б. 1978. № 7. С. 591—593.
- Козленко М.В., Козленко Ю.В. Глибинна будова, тектонічна еволюція та вуглеводневий потенціал Каламітського валу (північнозахідний шельф Чорного моря) за даними густинного моделювання. Геологія і корисні копалини Світового океану. 2024. Т. 20. № 2. С. 41—62. https:// doi.org/10.15407/ gpimo 2024.02.041.
- Козленко Ю.В., Корчагін І.М., Михайлюк С.Ф. Програмний комплекс обробки та інтерпре-

5. Наявність рифтогенів. Пов'язана з ними підвищена магматична активність, яка в густинних моделях проявляється ущільненням кристалічної кори, супроводжується збільшенням надходження в осадову товщу мантійних флюїдів.

6. Потужність продуктивних товщ. Безперечно, якщо товщина шару недостатня для формування повноцінної пастки, чекати там скупчення ВВ марно.

7. Наявність газових сипів. Оскільки в цьому районі відсутня альбська глиниста товща, яка слугує субрегіональною покришкою [Stovba et al., 2020], тут нема умов для накопичення BB— нема надійних літологічно обмежених, стратіграфічно екранованих пасток, і флюїди проходять від мантії скрізь осадову товщу не затримуючись.

Виходячи з вказаних факторів, автори розділили локальні структури на чотири групи — перспективні, малоперспективні, умовно перспективні та неперспективні, що показано на рис. 3.

Висновки. Проведене гравітаційне моделювання за мережею субмеридіональних профілів дозволило визначити глибинну будову та розломну тектоніку середньої частини ПЗШ. На основі аналізу результатів розрахунків визначено перспективність району досліджень на поклади вуглеводнів, що може бути використано при пошукових роботах на зазначеній акваторії.

тації гравіметричних і магнітометричних даних і аномалій геоїду. *Бюлетень УАЦ*. 1997. Вип. 1. С. 245—250.

- Аукин А.Е. Система «суперплюм глубокозалегающие сегменты нефтегазоносных бассейнов» — неисчерпаемый источник углеводородов. *Геол. журн.* 2015. № 2(351). С. 7—20.
- Stovba, S.M., Popadyuk, I.V., Fenota, P.O., & Khryashchevska, O.I. (2020). Geological structure and tectonic evolution of the Ukrainian sector of the Black Sea. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(5), 53—106. https://doi.org/10.24028/ qzh.0203-3100.v42i5.2020.215072.

ISSN 0203-3100. Геофізичний журнал. 2025. Т. 47. № 2

# Depth structure and hydrocarbon potential of the middle part of the northwestern Black Sea shelf, according to density modeling

## M.V. Kozlenko, Yu.V. Kozlenko, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Considering the need to ensure Ukraine's energy independence after the war, it is expedient to identify in advance the structures suitable for extracting hydrocarbon materials in the currently inaccessible region of the northwestern shelf of the Black Sea. To do this, gravity modeling was carried out using a network of submeridional profiles, which made it possible to determine the deep structure and fault tectonics. Based on the calculations, the prospects of exploring the research area for hydrocarbon deposits were determined. **Key words:** northwestern shelf of the Black Sea, gravity modeling, deep structure, fault

tectonics, hydrocarbon potential.

#### References

- Kozlenko, V.G. (1978). Gravitational model of the tectonosphere and normal values of gravity. *Doklady ANUkrSSR. Ser. B*, (7), 591—593 (in Russian).
- Kozlenko, M.V., & Kozlenko, Yu.V. (2024). Deep structure, tectonic evolution and hydrocarbon potential of the Kalamitsky shaft (northwestern shelf of the Black Sea) according to the data of density modeling. *Geologiya i poleznye ickopaemye Mirovogo okeana*, 20(2), 41—62. https:// doi.org/10.15407/ gpimo2024.02.041 (in Ukrainian).
- Kozlenko, Yu.V., Korchagin, I.M., & Mykhailiuk, S.F. (1997). Software complex for process-

ing and interpretation of gravimetric and magnetometric data and geoid anomalies. *Bulletin of the UAC*, (1), 245—250 (in Ukrainian).

- Lukin, A.E. (2015). The system «superplume deep segments of oil and gas basins» is an inexhaustible source of hydrocarbons. *Geological Journal*, (2), 7—20 (in Russian).
- Stovba, S.M., Popadyuk, I.V., Fenota, P.O., & Khryashchevska, O.I. (2020). Geological structure and tectonic evolution of the Ukrainian sector of the Black Sea. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(5), 53—106. https://doi.org/10.24028/ gzh.0203-3100.v42i5.2020.215072.

УДК 553.981+551.24 (477.8)

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322544

# Основні типи порід-колекторів та їхні петрофізичні властивості Західного нафтогазоносного регіону України

## І.М. Куровець, Р.-Д. А.Кучер, Ю.Є. Лисак, С.П. Мельничук, С.О. Михальчук, П.С. Чепусенко, 2025

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, м. Львів, Україна

Citation: Kurovets, I.M., Kucher, R.-D.A. Lysak, Yu.Ye., Melnychuk, S.P., Mykhalchuk, S.O., & Chepusenko, P.S. (2025). Main types of reservoir rocks and their petrophysical properties of the western oil-gas region of Ukraine. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 241—246. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322544.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Ефективність геологорозвідувальних робіт при пошуках і розвідці покладів вуглеводнів, вибір оптимальних технологій розкриття і їх розробки значною мірою залежать від наявності достовірної інформації про прогнозні типи порід-колекторів та їхні петрофізичні властивості. Викладено результати дослідження перспективних літолого-стратиграфічних комплексів Західного нафтогазоносного регіону України та встановлено основні типи порід-колекторів та їхні петрофізичні властивості для Волино-Подільської окраїни Східноєвропейської платформи, Передкарпатського прогину (Зовнішня і Внутрішня зони) і Закарпатського прогину. Методика досліджень включала аналіз наявної геолого-петрофізичної інформації про літологопетрографічні, структурно-текстурні особливості та петрофізичні властивості відкладів, лабораторні дослідження керна, математично-статистичну обробку даних, вивчення впливу термобаричних умов та складнонапруженого стану розрізу на формування різних типів колекторів та їхні ємнісно-фільтраційні параметри, побудову типових геолого-петрофізичних розрізів перспективних продуктивних товщ. Виконані дослідження показали, що в осадовому комплексі присутні колектори різних типів від низькопористих ущільнених гранулярних до складнопобудованих порово-тріщинно-кавернозних, що зумовлено впливом седиментаційних, геотектонічних, термобаричних, геотермічних, геохімічних та низки інших геологічних факторів, якого породи зазнали в процесі свого формування.

**Ключові слова**: Західний нафтогазоносний регіон України, типи порід-колекторів, керн, фліш, петрофізичні властивості.

Вступ. Західний нафтогазоносний регіон, найстаріший не лише в Україні, а й у Європі, є перспективним на відкриття нових покладів вуглеводнів, пов'язаних як із традиційними,так і з нетрадиційними [Крупський та ін., 2014; Михайлов та ін., 2021] колекторами. Ефективність геологорозвідувальних робіт при пошуках та розвідці покладів вуглеводнів, вибір оптимальних технологій розкриття і їх розробки значною мірою залежать від наявності достовірної інформації про прогнозні типи порід-колекторів та їхні петрофізичні властивості. Роботу присвячено висвітленню результатів досліджень із цієї проблематики.

**Об'єкти і методи досліджень.** Досліджувалися нафтогазоперспективні осадові товщі Західного нафтогазоносного регіону. Методика досліджень включала аналіз наявної геолого-петрофізичної інформації про літолого-петрографічні, структурнотекстурні особливості та петрофізичні властивості відкладів, лабораторні дослі-

Світа	Літологічна характеристика	Потужність відкладів, м	Тип колектора	Пористість,%	Проникність, мкм <sup>2</sup> ·10 <sup>-3</sup>
Бистрицька	Чергування проверстків аргілітів і глин з піско- виками і алевролітами.	250—340	Тріщинний, поровий	9—13	0—183
Вигодська	Пісковики з тонким пе- решаруванням аргілітів і глин	200—300	Поровий, тріщинно- поровий	12,5—23	2,6—340
Манявська	Чергування проверстків аргілітів, алевролітів та пісковиків.	120—350	Тріщинно- поровий	1,5—19,4	0,2—47

Узагальнений геолого-петрофізичний розріз продуктивних еоценових відкладів Внутрішньої зони Передкарпатського прогину



Типовий геолого-петрофізичний розріз продуктивної товщі еоценових відкладів. Standard geological-petrophysical section of the Eocene deposits

дження керна, математично-статистичну обробку даних, вивчення впливу термобаричних умов і складнонапруженого стану розрізу на формування різних типів колекторів та їхні ємнісно-фільтраційні параметри [Куровець та ін., 2023].

Результати та їх обговорення. Отримані результати досліджень висвітлено у низці публікацій, де наведено інформацію про основні літолого-стратиграфічні комплекси (Волино-Подільська окраїна Східноєвропейської платформи, Передкарпатський прогин (Зовнішня та Внутрішня зони) і Закарпатський прогин), для яких побудовано узагальнені і типові геолого-петрофізичні розрізи перспективних продуктивних товщ [Kurovets et al., 2011; Куровець та ін., 2019, 2021; Artym et al., 2019]. З огляду на вимоги щодо обмеження обсягу тез нижче, як приклад, наведено інформацію (таблиця і рисунок) для еоценових відкладів Внутрішньої зони Передкарпатського прогину.

Еоценовий нафтоносний комплекс утворений відкладами бистрицької, вигодської та манявської світ. Породи бистрицької світи представлені двома фаціями

кої світи представлені двома фаціями 145 м, вони ч ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

— власне бистрицькою та попільскою. Перша — це товща тонкоритмічного сірозеленого флішу, складеного зеленкуватосірими невапнистими аргілітами, які перешаровуються з тонкими проверстками алевролітів і пісковиків, друга — карбонатні попелясті породи: сірі, темно-сірі і брунатні мергелі, аргіліти, алевроліти та мергельні пісковики. Загалом, у всій зоні відмічається наявність незначних покладів, пов'язаних з прошарками та лінзами алевролітів і пісковиків. Вони неоднорідні за ступенем зцементованості, мають абсолютну пористість 3,7—27 %, значна зміна їхньої проникності зумовлює різкі зміни початкових дебітів флюїдів. Манявська світа складена переважно неоднорідним тонкоритмічним піщано-глинистим флішем, у розрізі якого можна простежити шари пісковиків та алевролітів потужністю 0,3—1,0 м. У підошві світи залягає строкатий надямненський горизонт завтовшки 10—20 м з тонкими верствами зелених і червоних аргілітів та алевролітів. Потужність піщаних горизонтів світи змінюється в широких межах від 10 до 145 м, вони часто виклинюються, іноді аж до повної відсутності. Загальна товщина світи становить 300—320 м. Колекторами є шари пісковиків з абсолютною пористістю 18—22 % і проникністю (2,5— 300) 10<sup>-3</sup> мкм<sup>2</sup>. Відклади вигодської світи характеризуються значною мінливістю літофацій і потужностей. У Долинському нафтогазопромисловому районі вони представлені світло-сірими, масивними, товстошаруватими, різнозернистими пісковиками, подекуди з прошарками гравелітів і конгломератів, а також тонкими прошарками зеленувато-сірих піщаних аргілітів. Сумарна потужність пісковиків становить 65—80 % розрізу. У Надвірнянському нафтогазопромисловому районі пісковики заміщаються сірими і темносірими вапняками, перешарованими щільними сірими мергелями. Потужність горизонту тут змінюється в межах 0—40 м. На Покутті пасічнянська світа переходить у буковинську, в якій верстви пісковиків

### Список літератури

- Крупський Ю.З., Куровець І.М., Сеньковський Ю.М., Михайлов В.А., Чепіль П.М., Дригант Д.М., Шлапінський В.Є., Колтун Ю.В., Чепіль В.П., Куровець С.С., Бодлак В.П. Нетрадиційні джерела вуглеводнів України: у 8 кн. Кн. 2: Західний нафтогазоносний регіон. Київ: Ніка-Центр, 2014, 400 с.
- Куровець І., Грицик І., Приходько О., Чепусенко П., Кучер З., Михальчук С., Мельничук С., Лисак Ю., Петелько Л. Петрофізичні моделі відкладів менілітової світи олігоценового флішу Карпат і Передкарпатського прогину. *Геологія і геохімія горючих копа*лин. 2021. № 3-4(185-186). С. 33—43. https:// doi.org/10.15407/ggcm2021.03-04.033.
- Куровець І., Зубко О., Грицик І., Приходько О., Кучер Р.-Д. Особливості формування ємнісно-фільтраційних властивостей порідколекторів Внутрішньої зони Передкарпатського прогину. Зб. матеріалів 9 Міжнар. наук. конф. «Геофізика і геодинаміка: прогнозування та моніторинг геологічного середовища», Львів, 10—12 жовтня 2023 р., С. 109—112.
- Куровець І.М., Лисак Ю.Є., Чепусенко П.С., Михальчук С.О., Кучер Р.-Д.А. Геолого-

досягають 130 м. Пісковики світло-сірі й сірі, грубошаруваті до брилових, у нижній частині розрізу — з тонкими прошарками зеленувато-сірих аргілітів. Загальна товщина відкладів світи сягає 250 м, де пісковики становлять 17—20 %.

У досліджуваному розрізі присутні порові, порово-тріщинні та тріщинно-порові колектори, пористість яких змінюється від 0 до 15 %, а проникність може досягати 25·10<sup>-3</sup> мкм<sup>2</sup>.

Висновки. Виконані дослідження показали, що в осадовому комплексі досліджуваного регіону присутні колектори різних типів від низькопористих ущільнених гранулярних до складнопобудованих порово-тріщинно-кавернозних, що зумовлено впливом седиментаційних, геотектонічних, термобаричних, геотермічних, геохімічних та низки інших геологічних факторів, якого породи зазнали в процесі свого формування.

петрофізична характеристика відкладів силуру Волино-Подільської окраїни Східноєвропейскої платформи. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2019. № 4(181). С. 17—31. https://doi.org/10.15407/ggcm2019.04.

- Михайлов В.А., Вакарчук С.Г., Вижва С.А. Коваль А.М., Крупський Ю.З., Куровець І.М., Харченко М.В. Перспективи нарощування ресурсної бази вуглеводнів України за рахунок нетрадиційних джерел. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2021, 335 с.
- Artym, I.V., Kurovets, S.S., Zderka, T.V., Yarema, A.V., & Kurovets, I.M. (2019). Development of the rocks fracturing model on the Carpathian region example. Paper presented at the 18th International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, EAGE 13–16 may, 2019, Kyiv, Ukraine. Retrieved fromhttps://www. earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.201902064?crawler=true.
- Kurovets, I., Prytulka, H., Shyra, A., Shuflyak, Yu., & Peryt, T.M. (2011). Petrophysical properties of the Pre-Miocene rocks of the Outer zone of the Ukrainian Carpathian Foredeep. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 81(3), 363—375.

# Main types of reservoir rocks and their petrophysical properties of the western oil-gas region of Ukraine

## I.M. Kurovets, R.-D.A. Kucher, Yu.Ye. Lysak, S.P. Melnychuk, S.O. Mykhalchuk, P.S. Chepusenko, 2025

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

The effectiveness of exploration of hydrocarbon deposits, selection of optimal discovery technologies, and their development largely depend on the reliable forecast of reservoir rock types and their petrophysical properties. Here, we review the findings for lithological-stratigraphic complexes of the Western oil-gas region of Ukraine and establish the main types of reservoir rocks and their petrophysical properties for the Volyn-Podillya edge of the East European Platform, the Carpathian Foredeep (Outer and Inner zones), and the Transcarpathian depression. Methods included an analysis of the available geological-petrophysical information on lithological-petrographical, structural-textural peculiarities and petrophysical properties of deposits; laboratory investigations of cores; mathematical-statistical processing of data; study of the influence of thermobaric conditions and compound stressed state of the section upon the formation of different types of reservoir rocks and their capacity-filtration parameters; and construction of standard geological-petrophysical sections of the promising producing areas. According to the findings, in the sedimentary complex, there are reservoir rocks of different types (from low-porous consolidated? granular to composite porous-fractured-cavernous) due to the influence of sedimentary, geotectonic, thermobaric, geothermal, and other factors influencing their formation.

**Key words:** Western oil-gas region of Ukraine, types of reservoir rocks,core, flysh, petrophysical properties.

#### References

- Krupsky, Yu.Z., Kurovets, I.M., Senkovsky, Yu.M., Mykhailov, V.A., Chepil, P.M., Drygant, D.M., Shlapinsky, V.Ye., Koltun, Yu.V., Chepil, V.P., Kurovets, S.S., & Bodlak, V.P. (2014). Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine: in 8 books. Book 2. Westerngas-bearingregion. Kyiv: Nika-Centre, 400 p. (in Ukrainian).
- Kurovets, I., Hrytsyk, I., Prykhodko, O., Chepusenko, P., Kucher, Z., Mykhalchuk, S., Melnychuk, S., Lysak, Yu., & Petelko, L. (2021).
  Petrophysical models of deposits of the menilite suite of the oligocene flysh of the Carpathians and the Precarpathian deep. *Geology & Geochemistry of Combustible Minerals*, (3-4), 33—43. https://doi.org/10.15407/ggcm2021.03-04.033 (in Ukrainian).
- Kurovets, I., Zubko, O., Hrytsyk, I., Prykhodko, O., & Kucher, R.-D. (2023). Peculiarities of the formation of capacity-filtration properties of reservoir rocks of the Inner zone of the Carpath-

ian Foredeep. Materials of Intern. Sci. Conf. «Geophysics and geodynamics: prediction and moniroring of geological medium», Lviv, 10Ï12 October 2023 (pp. 109Ï112) (in Ukrainian).

- Kurovets, I.M., Lysak, Yu.E., Chepusenko, P.S., Mykhalchuk, S.O., & Kucher, R.-D.A. (2019). Geological-petrophysical characteristic of silurian deposits of the Volyn-Podillya edge of the East-European platform. *Geology & Geochemistry of Combustible Minerals*, (4), 17—31. https://doi.org/10.15407/ggcm2019.04 (in Ukrainian).
- Mykhailov, V.A., Vakarchuk, S.G., Vyzhva, S.A., Koval, A.M., Krupsky, Yu.Z., Kurovets, I.M., & Kharchenko, M.V. (2021). Prospects of the increase in resource base of hydrocarbons of Ukraine at the expense of unconventional sources. Kyiv: VPC «Kyiv University», 335 p.
- Artym, I.V., Kurovets, S.S., Zderka, T.V., Yarema, A.V., & Kurovets, I.M. (2019). Development of the rocks fracturing model on the Carpath-

УДК 550.382.553

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322545

# Магнітна неоднорідність земної кори Дніпровсько-Донецької западини вздовж профілів GEORIFT 2013 та Диканька—Дружківка

## Т.В. Лебідь, М.І. Орлюк, 2025

#### Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Вперше виконано комплексний аналіз геомагнітного поля та магнітної неоднорідності земної кори зі структурними особливостями та швидкістю повздовжніх хвиль, які були виявлені за даними глибинного сейсмічного зондування (ГСЗ) вздовж профілів GEORIFT 2013 та Диканька—Дружківка (XII) в межах Дніпровсько-Донецької западини. Показано зв'язок магнітної неоднорідності кристалічної земної кори з сейсмічними границями за заломленими і відбитими хвилями, а також з глибинними розломами меридіонального та субмеридіонального напрямків. Виявлено приуроченість родовищ вуглеводнів до вузлів перетину розломів та трансрегіональних тектонічних швів з повздовжніми та субширотними розломами, які часто супроводжуються локальними магнітними аномаліями.

Ключові слова: Дніпровсько-Донецька западина, її сегменти, профілі GEORIFT 2013 і Диканька—Дружківка, магнітні та швидкісні моделі.

Вступ. Дніпровсько-Донецька западина (ДДЗ) досить добре вивчена комплексом геофізичних методів у зв'язку з дослідженням глибинної будови та геодинаміки цієї внутрішньоконтинентальної девонської рифтової структури, а також як основного нафтогазовидобувного регіону України. Наразі досліджено розломно-блокову тектоніку і поперечну зональність ДДЗ та вивчено її вуглеводневий потенціал за сейсмічними та геомагнітними даними [Тектоника..., 2015; Муровська та ін., 2024]. Практично всю цю інформацію було отримано за профілями впоперек простягання ДДЗ, що дало змогу досить детально висвітлити поперечну структуру останньої. Для визначення поздовжньої зональності ДДЗ і виділення її сегментів може бути використаний профіль GEORIFT 2013 і профіль ГСЗ Диканька—Дружківка (XII), які простягаються вздовж центральної, найбільш зануреної частини западини до Складчастого Донбасу. Спільний аналіз результатів сейсмічних і геомагнітних досліджень за профілями ГСЗ дасть можливість отримати регіональні та локальні закономір-

Citation: Lebed, T.V., & Orlyuk, M.I. (2025). Magnetic inhomogeneity of the Earth's crust of the Dnieper-Donetsk Basin along the profiles GEORIFT 2013 and Dykanka-Druzhkivka. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 246—251. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322545.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ності зв'язку магнітної неоднорідності зі структурно-швидкісними особливостями будови земної кори ДДЗ.

**Об'єкт дослідження:** земна кора Чернігівського, Лохвицького, Полтавського та Ізюмського сегментів ДДЗ в районі профілів GEORIFT 2013 та Диканька—Дружківка.

Мета дослідження: аналіз геомагнітного поля та магнітної неоднорідності земної кори ДДЗ з її структурними та швидкісними особливостями за даними ГСЗ, дослідження будови кристалічної кори та осадової товщі регіональних структур, розломів і шовних зон і пов'язаних з ними родовищ вуглеводнів.

**Методика дослідження:** якісний та кількісний аналіз геомагнітного поля для

виділення регіональної та локальної компонент, оцінка намагніченості земної кори шляхом математичного моделювання і зіставлення магнітної неоднорідності зі структурною та швидкісною моделями земної кори.

Результати дослідження. У досліджуваних сегментах ДДЗ спостерігається характерний і досить складний характер аномального магнітного поля з наявністю регіональної та локальної складових [Тектоника..., 2015].

У регіональному полі профіль GEORIFT 2013 перетинає позитивні регіональні магнітні аномалії — Чернігівську (інтенсивністю 300—350 нТл) і Лохвицьку (250— 300 нТл). Лохвицьку аномалію частково перетинає і профіль Диканька—Дружків-



Рис. 1. Схема рельєфу кристалічного фундаменту та рельєфу поділу Мохо в співвідношенні з головними тектонічними розломами [Тектоника ..., 2015; Макаренко та ін., 2021]: 1 — межа ДДЗ; 2 — сегменти ДДЗ (Ч — Чернігівський, Лх — Лохвицький, П — Полтавський, Із — Ізюмський); 3 — профіль GEORIFT 2013; 4 — профіль Диканька—Дружківка; 5 — трансрегіональні тектонічні шви Херсон—Смоленськ (Х-См) та Донецьк—Брянськ (Д-Бр); 6 — Центральний поздовжній розлом (Ц); 7 — розломи ортогональні до поздовжніх; 8 — розломи ортогональної системи (а — першого рангу, б — передбачувані в межах ДДЗ, в — більш вищих рангів); 9 — напрямок зміщень вздовж розломів; 10 — ізолінії глибин поділу Мохо, км; 11 — ізолінії глибин кристалічного фундаменту, км. Розломи: В-Лг — Верховцевсько-Льговський, К-Кр — Криворізько-Крупецький, З-Ін — Західноінгулецький, Смл — Смілянський, Анд — Андрушівський, П-Пр — Переяслав-Хмельницько-Прилуцький, Я-Тр — Ядлівсько-Трахтемирівський, Пл — Поліський, О-П — Оріхово-Павлоградський.

Fig. 1. The topography of the crystalline basement and the topography of the Moho divide in relation to the main tectonic faults [Tectonics..., 2015.; Makarenko et al., 2021]: *1*—DDB boundary; 2—DDB segments (Ч—Chernihivskyi,  $\Lambda X$ —Lokhvytskyi,  $\Pi$ —Poltavskyi, I3—Iziumskyi); 3—GEORIFT 2013 profile; 4—Dykanka-Druzhkivka profile; 5—transregional tectonic sutures Kherson-Smolensk (X-CM) and Donetsk-Bryansk ( $\Lambda$ -Bp); 6—Central lengthwise fault (Ц); 7—faults, orthogonal to the lengthwise ones; 8—faults of the orthogonal system (*a*—of the first order, 6— predicted within the DDB, *b*—of higher orders); 9—direction of displacements along the faults; 10—the Moho isolines, km; 11—crystalline basement isolines, km; faults: B- $\Lambda r$ —Verkhovtsevsko-Lhovskyi, K-Kp—Kryvorizko-Krupetskyi, 3-IH—Zakhidnoinguletskyi, CMA—Smilyanskyi, AHA—Andrushivskyi,  $\Pi$ - $\Pi p$ —Pereyaslav-Khmelnytsko-Prylutskyi,  $\Re$ -Tp—Yadlivsko-Trakhtemyrivskyi,  $\Pi \Lambda$ —Poliskyi, O- $\Pi$ —Orikhovo-Pavlohradskyi.



Рис. 2. Магнітні моделі в співставленні зі швидкісними моделями земної кори по профілю GEORIFT 2013 [Starostenko et al., 2018] та профілю Диканька—Дружківка [Тектоника..., 2015]: 1 — трансрегіональні тектонічні шви Херсон—Смоленськ та Донецьк—Брянськ, 2 — зони розломів (*a* — першого рангу),  $\delta$  — другого рангу), 3 — Центральний поздовжній розлом (*a* — першого рангу,  $\delta$  — другого рангу), 4 — родовища вуглеводнів (*a* — газоконденсатні,  $\delta$  — нафтогазоконденсатні). Інші умовні позначення і скорочення див. на рис. 1. Fig. 2. Magnetic models in comparison with velocity models of the Earth's crust according to the GEORIFT 2013 profile [Starostenko et al., 2018] and the Dykanka-Druzhkivka profile [Starostenko, 2015]: 1 — transregional tectonic suture Kherson-Smolensk and Donetsk-Bryansk, 2 — zones of the first-order faults (*a*), of the second order ( $\delta$ ), 3 — the Central lengthwise fault (*a*), faults of the second order ( $\delta$ ), 4 — hydrocarbon deposits (*a*) gas-bearing, ( $\delta$ ) oil-and-gas-bearing. Other labels follow Fig. 1.

ка, але більша частина цього профілю проходить уздовж нульової ізолінії між позитивною Куп'янською аномалією (значної інтенсивності) на півночі і зоною негативного поля з максимальною інтенсивністю -200 нТл на півдні. У локальному магнітному полі в північно-західний частині профілю GEORIFT 2013, західніше та східніше трансрегіонального шва Херсон-Смоленськ спостерігається субмеридіональне простягання смуг позитивних аномалій. Далі, на південний схід від шва Херсон— Смоленськ в Лохвицькому сегменті, локальні аномалії утворюють витягнуту за простяганням овалоподібну структуру, яку на сході обмежує Верховцевсько-Льговський розлом. Локальне магнітне поле на більшій частині профілю Диканька— Дружківка характеризується негативними значеннями. При цьому профіль перетинає дві локальні позитивні аномалії субширотного простягання незначної інтенсивності — в Полтавському сегменті в зоні Оріхово-Павлоградського розлому і в Ізюмському сегменті в зоні трансрегіонального тектонічного шва Донецьк—Брянськ.

Рельєф поверхні кристалічного фундаменту асиметричний і змінюється за простяганням ДДЗ від 5 км в Чернігівському сегменті до 20 км в Полтавському, далі, східніше Донецько-Брянського шва, збільшується до 25 км (рис. 1). Глибина залягання поверхні Мохо змінюється від 40 км у Чернігівському сегменті до 35 км у Лох-
вицькому та Полтавському. В Ізюмському сегменті глибина поверхні Мохо знаходиться в межах 40—45 км [Макаренко та ін., 2021].

Згідно з результатами робіт уздовж профілів GEORIFT 2013 та Диканька—Дружківка виділено низку структурно-швидкісних границь в земній корі і верхній мантії (рис. 2). Зазначимо, що простягання профілів близьке до простягання Центрального розлому, а між пунктами SP10 і SP12 та східніше Верховцево-Льговського розлому повністю збігається з Центральним розломом. Це може призводити до певного спотворення сейсмічного хвильового поля, що напевне проявиться у виділених швидкісній та структурній неоднорідності земної кори.

Намагніченість глибинних джерел по профілю GEORIFT 2013 змінюється в межах 1,0—3,0 А/м, залягання нижніх кромок обмежується глибиною Мохо. У районі Чернігівської аномалії кора намагнічена на всю потужність, а намагніченість глибинного джерела досягає 3,0 А/м, що може свідчити про «базифікацію» земної кори, яка підтверджується інтрузіями основного складу, виявленими бурінням [Орлюк, Друкаренко, 2010; Тектоника..., 2015]. Глибинній магнітній неоднорідності відповідають підвищені швидкості поширення поздовжніх сейсмічних хвиль і підйом сейсмічних границь за заломленими та відбитими хвилями. Далі по профілю виділяється ділянка зі слабомагнітною нижньою корою, яка є продовженням Інгульського мегаблока та обмежується Ядлівсько-Трахтемирівським розломом на заході і Переяслав-Хмельницько-Прилуцьким на сході території. Глибинне джерело Лохвицької магнітної аномалії, обмежене на сході Верховцевсько-Льговським розломом, має намагніченість 2,5 А/м, східне падіння і супроводжується порушеним рельєфом поверхні з різними швидкостями поширення сейсмічних хвиль на глибинах 10—20 км (див. рис. 2). Розріз цієї частини земної кори характеризується підйомом сейсмічних границь за заломленими та відбитими хвилями та незначним зануренням поверхні кристалічного фундаменту.

Джерела верхньої частини кристалічної кори та низу осадового чохла, з глибиною залягання від 5 до 20 км, характеризуються намагніченістю 1,0—4,0 А/м, імовірно. зумовлені вулкано-плутонічними утвореннями девону, приурочені до розломних зон поздовжніх і поперечних розломів або їх перетину. За сейсмічними даними цим зонам притаманна підвищена насиченість границями заломлених і відбитих хвиль, а також втрата їх кореляції та зміни кутів нахилу. У межах Ландорійської западини є локальна магнітна аномалія, яка, ймовірно, відображає шляхи надходження вуглеводнів у верхню частину розрізу земної кори (див. рис. 1, 2). Відповідними змінами рельєфу поверхні з різними швидкостями поширення поздовжніх сейсмічних хвиль характеризується також зона Оріхово-Павлоградського розлому та Донецько-Брянського шва. В обох випадках їх надрозломні зони супроводжуються локальними позитивними аномаліями геомагнітного поля субширотного простягання незначної інтенсивності. Джерела цих аномалій також можуть пов'язуватися з міграцією вуглеводнів, що призводить до збільшення намагніченості порід. Отже, спостерігається певна закономірність стосовно приуроченості покладів вуглеводнів до перетину розломних зон і швів субмеридіонального простягання з субширотними, які супроводжуються локальними аномаліями [Орлюк, Лебідь, 2022].

Висновки. За результатами аналізу геомагнітного поля зі структурними та швидкісними особливостями земної кори вздовж поздовжніх профілів GEORIFT 2013 та Диканька—Дружківка (XII) виявлено зв'язок магнітної неоднорідності кристалічної кори з сейсмічними границями, а також з глибинними розломами меридіонального та субмеридіонального напрямків. Показано приуроченість родовищ вуглеводнів до вузлів перетину розломів і трансрегіональних тектонічних швів з поздовжніми та субширотними розломами, які часто супроводжуються локальними магнітними аномаліями.

#### Список літератури

- Макаренко І.Б., Старостенко В.І., Купрієнко П.Я., Савченко О.С., Легостаєва О.В. *Неоднорідність земної кори України і суміжних регіонів за результатами 3D гравітаційного моделювання*. Київ: Наук. думка, 2021, 212 с.
- Муровська Г.М., Стовба С.М., Верпаховська О.В., Гнилко О.М., Орлюк М.І., Мичак С.В. Структура та геодинаміка літосфери нафтогазоносних і рудних регіонів України (за новітніми геолого-геофізичними даними). Київ: Наук. думка, 2024, 152 с. https://doi.org/10.15407/978-966-00-1912-6.
- Орлюк М.И., Друкаренко В.В. Магнитная восприимчивость пород северо-западной части Днепровско-Донецкой впадины. *Геофиз.* журн. 2010. Т. 32. № 1. С. 78—92. https:// doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i1.2010. 117571.
- Орлюк М.І., Лебідь Т.В. Нафтогазоносність земної кори України в зв'язку з її геомаг-

нітним полем та намагніченістю. Геологічна будова та корисні копалини України: Збірник тез всеукраїнської наукової конференції (Київ, 12—13 жовтня 2022 р.). Київ, 2022, С. 307—311.

- Тектоника и углеводородный потенциал кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины. Ред. В.И. Старостенко. Киев: Галактика, 2015, 252 с.
- Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Czuba, W., Sroda, P., Lysynchuk, D., Aizberg, R., Garetsky, R., Karataev, G., Gribik, Y., Farfuliak, L., Kolomiyets, K., Omelchenko, V., Komminaho, K., Tiira, T., Gryn, D., Guterch, A., Legostaeva, O., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2018). Lithospheric structure along wide-angle seismic profile GEORIFT 2013 in Pripyat-Dnieper-Donets Basin (Belarus and Ukraine). *Geophysical Journal International*, 212, 1932—1962. https://doi.org/10.1093/gji/ggx509.

## Magnetic inhomogeneity of the Earth's crust of the Dnieper-Donetsk Basin along the profiles GEORIFT 2013 and Dykanka-Druzhkivka

#### T.V. Lebed, M.I. Orlyuk, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

For the first time, there was performed a comprehensive analysis of the geomagnetic field and magnetic heterogeneity of the Earth's crust with structural features and longitudinal wave velocities, detected according to deep seismic sounding (DSS) data along the GEORIFT 2013 and Dykanka-Druzhkivka (XII) profiles within the Dnieper-Donets Basin. The relationship of the magnetic heterogeneity of the crystalline Earth's crust with seismic boundaries along refracted and reflected waves, as well as with deep faults in the meridional and submeridional directions, was shown. The hydrocarbon deposits are localization, the intersections of faults and transregional tectonic seams with longitudinal and sublatitudinal faults, which are often accompanied by local magnetic anomalies.

**Key words:** Dnieper-Donetsk Basin, its segments, GEORIFT 2013 and Dykanka-Druzhkivka profiles, magnetic and velocity models.

#### References

Makarenko, I.B., Starostenko, V.I., Kuprienko, P. Ya., Savchenko, O.S., & Legostaeva, O.V. (2021). *Heterogeneity of the Earth's Crust of*  Ukraine and Adjacent Regions Based on the Results of 3D Gravity Modeling. Kyiv: Naukova Dumka, 212 p. ( in Ukrainian).

- Murovska, G.M., Stovba, S.M., Verpakhovska, O.V., Hnylko, O.M., Orlyuk, M.I., & Mychak, S.V. (2024). Structure and Geodynamics of the Lithosphere of Oil and Gas-Borne and Ore Regions of Ukraine (Based on the Latest Geological and Geophysical Data). Kyiv: Naukova Dumka, 152 p. https://doi.org/10.15407/978-966-00-1912-6 (in Ukrainian).
- Orlyuk, M.I., & Drukarenko, V.V. (2010). Magnetic susceptibility of rocks of the northwestern part of the Dnieper-Donets Basin. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 32(1), 78—92. https://doi. org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i1.2010.117571 (in Russian).
- Orlyuk, M.I., & Lebid, T.V. (2022). Oil and gas potential of the earth's crust of Ukraine in connection with its geomagnetic field and magnetization. *Geological structure and minerals of Ukraine: Collection of abstracts of the*

All-Ukrainian scientific conference, Kyiv, October 12—13, 2022 (pp. 307—311). Kyiv (in Ukrainian).

- Starostenko, V.I. (Ed.). (2015). Tectonics and hydrocarbon potential of the crystalline basement of the Dnieper-Donets Basin. Kyiv: Galaktika, 252 p. (in Russian).
- Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Czuba, W., Sroda, P., Lysynchuk, D., Aizberg, R., Garetsky, R., Karataev, G., Gribik, Y., Farfuliak, L., Kolomiyets, K., Omelchenko, V., Komminaho, K., Tiira, T., Gryn, D., Guterch, A., Legostaeva, O., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2018). Lithospheric structure along wide-angle seismic profile GEORIFT 2013 in Pripyat-Dnieper-Donets Basin (Belarus and Ukraine). *Geophysical Journal International*, 212, 1932—1962. https://doi.org/10.1093/gji/ggx509.

УДК 550.837

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322547

## Застосування диференційних характеристик при аналізі даних вертикального електричного зондування

В.М. Логвін<sup>1</sup>, П.Г. Пігулевський<sup>1,2</sup>, С.О. Яремій<sup>1</sup>, 2025

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна <sup>2</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Розглянуто результати переобробки польових геоелектричних досліджень ДГЕ «Дніпрогеофізика» з використанням додаткових диференційних характеристик потенційних полів на території, що прилягає з півдня до м. Кривий Ріг. Пропонується при аналізі вимірювань за методом вертикального електричного зондування використовувати аналоги повного градієнта та кривизни позірного питомого електричного опору. Ці характеристики суттєво допомагають при вивченні особливостей будови геологічного середовища (підняття, западини, межі пластів, зони розломів) і визначенні величини мінералізації підземних вод.

Використання диференційних характеристик дає змогу значно підвищити ефективність робіт з виділення та локалізації обводнених масивів порід мінералізованими підземними водами на території Кривбасу.

**Ключові слова**: Український щит, зона тріщинуватості, підземні води, електророзвідка, обробка та інтерпретація, диференційні характеристики поля.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Logvin, V.M., Pigulevskiy, P.G., & Yaremii, S.O. (2025). Application of differential characteristics in the analysis of vertical electrical sounding data. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 251—256. https://doi.org/10.24028/gj. v47i2.322547.

Вступ. Попередній аналіз результатів раніше виконаних гідрогеологічних, інженерно-геологічних матеріалів ΔЛЯ Криворізького басейну [Рудько, Яковлєв, 2018; Довгийта ін., 2021] і геофізичних досліджень на території, прилеглої до південної частини м. Кривий Ріг, показав наявність постійних змін стану гідрогеологічного середовища. Аналіз результатів геоелектричних досліджень Дніпропетровської геофізичної експедиції «Дніпрогеофізика» свідчить про необхідність більш поглибленої якісної обробки за рахунок використання диференційних характеристик електричного поля.

**Об'єкти і методи дослідження.** У межах досліджуваної території виділено два основні водоносні горизонти — в четвертинних відкладах з глибиною залягання від 2,5 до 13,1 м і в неогенових — від 10,5 до 22,7 м. Однозначне картування зон з особливо високою мінералізацією підземних вод попередніми дослідженнями не вирішувало поставлених завдань, оскільки поява та поширення їх зумовлені дуже складним комплексом природних (літологічні, тектонічні, геоморфологічні умови та кліматичні явища) і техногенних факторів.

Геофізичні дослідження було виконано ДГЕ «Дніпрогеофізика» методом вертикального електричного зондування (ВЕЗ) з використанням генераторів ГЕР-1/300 і АНЧ-3 та вимірювачами ЕІН-209М і МЕРІ-24. Вимірювання виконувалися в режимі змінного низькочастотного струму (4,88 Гц) симетричною установкою Шлюмберже з мідними вимірювальними електродами (MN) і сталевими живильними електродами (АВ). Крок точок вимірювань на профілях спостереження дорівнював 20 м, що в 2—2,5 рази менше



Рис. 1. Геоелектричний розріз ізоліній позірного питомого опору ( $\rho_{\Pi}$ ) за профілем 7. Fig. 1. Geoelectric section of isolines of apparent resistivity ( $\rho_{a}$ ) along profile 7.



Рис. 2. Геоелектричний розріз з використанням перетвореної логарифмічної шкали осі AB/2 в еквівалентні глибини дослідження ( $h_{\rm ekb}$ ).

Fig. 2. Geoelectric section using a transformed logarithmically scale of the AB/2 axis values to equivalent survey depths ( $h_{e_{KB}}$ ).

загальноприйнятого стандартного. Це було зроблено для збільшення детальності вивчення верхньої частини геоелектричного розрізу та підвищення надійності досліджень в умовах присутності інтенсивних промислових електромагнітних завад.

За результатами попередніх досліджень було отримано криві ВЕЗ і побудовано класичні геоелектричні розрізи ізоліній позірного питомого опору на всіх спостережених профілях. На рис. 1, як приклад, показано геоелектричний розріз за профілем 7. На ньому видно наявність диференціації геологічного середовища за позірним електричним опором.

При побудові розрізу ізоліній р<sub>п</sub> по осі глибин AB/2 особливості верхньої частини стратиграфічного горизонту стають менш розпізнаваними. Це пов'язано з дуже складною залежністю глибини дослідження від параметрів установки живильних електродів AB, крок яких в процесі спостережень змінюється нелінійно, що не дає змоги забезпечити чітке встановлення усього стратиграфічного розрізу від перших метрів до максимальних глибин зондування.

Для підвищення ефективності якісної інтерпретації результатів ВЕЗ було запропоновано підхід, заснований на нескладній додатковій обробці при побудові геоелектричних розрізів. Він полягає, по-перше, у використанні більш виразної візуалізації елементів у верхній частині геоелектричних розрізів, по-друге, у застосуванні аналогів похідних р<sub>п</sub>, розрахованих на підставі формул відповідних трансформант для карт потенційних геофізичних полів.

Для збільшення виразності візуалізації розрізів геоелектричних даних замість традиційних значень AB/2 для вертикальної осі пропонується використовувати значення еквівалентної глибини дослідження ( $h_{\rm eKB}$ ). Еквівалентну глибини дослідження ( $h_{\rm eKB}$ ). Еквівалентну глибини можна розрахувати на підставі логарифмічного перетворення значень напіврозносів лінії живлення установки BE3 (AB/2) за формулою:  $h_{\rm eKB} = \infty_i \ln AB/2_i$ , де  $\infty_i$  — коефіцієнт перетворення. Чисельне значення ∝<sub>i</sub> знаходиться за евристичним оцінюванням можливої ефективної глибини дослідження для характеристичних розносів АВ/2. Таке оцінювання можна виконати за результатами кількісної інтерпретації відповідних кривих ВЕЗ або за аналізом параметричних ВЕЗ на території досліджень.

Ефективність заміни на геоелектричних розрізах AB/2 на  $h_{\rm ekB}$  наочно показано на порівняні класичного виду геоелектричного розрізу ізоліній  $\rho_{\rm II}$  (див. рис. 1) і з використанням  $h_{\rm ekB}$  (рис. 2).

Верхня частина розрізу не перекривається нижньою та сприяє хорошому простеженню морфології водоносних горизонтів у четвертинних і неогенових відкладах.

Для експрес-оцінювання літологічних, тектонічних особливостей території під впливом техногенних факторів були використані диференціальні характеристики полів, що мають більш локалізуючи здатності. За даними польових вимірювань було розраховано повний градієнт Grad ( $\rho_{\pi}$ ) (рис. 3) і кривизну С( $\rho_{\pi}$ ) (рис. 4) поля ρ<sub>п</sub>. Для розрахунку зазначених диференційних характеристик поля р<sub>п</sub> були використані відповідні ідеї та формули з публікації [Logvin, Pigulevskiy, 2016]. Ці характеристики широко використовуються під час аналізу карт потенційних геофізичних полів. Диференційні характеристики знаходились за скінченно-різницевими формулами:

$$Grad(\rho_{n})_{i,j} = \sqrt{(\rho_{n(i+1)j} - \rho_{n(i-1)j})^{2} + \sqrt{(\rho_{ni(j+1)} - \rho_{ni(j-1)})^{2}},$$
$$C(\rho_{n})_{ij} = 4\rho_{nij} - (\rho_{n(i+1)j} + \rho_{n(i-1)j} + \rho_{ni(j+1)} + \rho_{ni}),$$

Диференційні характеристики розраховано за скінченно-різницевими формулами без урахування розмірів комірки сітки, тому в назві відповідних характеристик використовується термін «аналог».

Завдяки запропонованому підходу до якісної інтерпретації можна значно змен-



Рис. 3. Аналог повного градієнта позірного питомого опору Grad ( $\rho_{\pi}$ ). Fig. 3. Analogue of the full gradient of the apparent resistivity Grad ( $\rho_{a}$ ).



Рис. 4. Аналог кривизни позірного питомого опору  $C(\rho_{II})$ . Fig. 4. Analogue of the curvature of the apparent resistivity  $C(\rho_{a})$ .

шити терміни виконання робіт (виконувати експрес-інтерпретацію) і підвищити надійність отримуваних первинних геологічних результатів.

Вибір трансформант ґрунтувався на зручності перетворення розрізу ізоліній в «геологічні об'єкти». Зони мінімальних значень аналога повного градієнта контролюють місцезнаходження та структуру окремих пластів порід (див. рис. 3). Нульові ізолінії аналога кривизни відповідають межам основних пластів, а локальні області його екстремальних значень зонам другорядних ускладнень геологічної будови цих пластів (рис. 4).

Результати та їх обговорення. Аналіз отриманих побудов (див. рис. 3, 4) показує, що шари осадових порід мають широкий розмах висотних позначок як покрівлі, так і підошви, які можна пояснити наявністю розривних тектонічних порушень.

За результатами запропонованої обробки польових геоелектричних дослі-

джень та узагальнення геологічних, гідрогеологічних і геофізичних матеріалів можна зазначити, що просторово виділені аномалії відносяться до певних тектонічних зон. Високі значення мінералізації підземних вод переважно поширені між Західним і Тарапаківським розломами. Виділені підвищені або знижені значення мінералізації також попадають у такі зони чи локальні ділянки. Це дає змогу зробити висновок, що основними носіями підвищених показників мінералізації підземних вод є великі тектонічні порушення, які є лінійними зонами завширшки від десятків до сотень метрів. Шляхи міграції високомінералізованих вод і накопичення хімічних елементів залежить від тектонічних особливостей території, водопроникності та пористості порід, потужності покривних відкладів, тривалості експлуатації гірничотехнічних об'єктів. Тектонічні порушення і закарстовані зони є шляхами циркуляції підземних вод і

визначають гідравлічний зв'язок між водами всіх водоносних горизонтів.

Висновки. Розробка нових методичних прийомів, що покращують кількісні та якісні показники у сфері вивчення геологічного розрізу, є актуальною проблемою. Використання диференційних характеристик значно підвищує ефективність робіт з виділення та локалізації обводнених масивів порід мінералізованими підземними водами на території всього Кривбасу. Результати виконаного аналізу раніше отриманих матеріалів електророзвідки показують, що велике значення при їх переінтерпретації мають детальні характеристики розрізу, які дають змогу оперативно картувати положення стратиграфічних меж, зон розривних порушень з інтенсивною тріщинуватістю відкритого типу та локальні прирозломні зони. Використання диференційних характеристик потенційних полів свідчить, що найбільшим обводненими є породи в межах зон крупних розривних порушень з інтенсивною площинною тріщинуватістю відкритого типу.

#### Список літератури

- Довгий С.О., Іванченко В.В., Коржнев М.М., Трофимчук О.М., Яковлєв Є.О. та ін. Дослідження екологічного стану територій пост-майнінгу в Україні на прикладі Криворізького басейну та його оточення. Київ: Ніка-Центр, 2021, 196 с.
- Рудько Г.І., Яковлєв Є.О. Регіональні техногенні зміни еколого-геодинамічних умов розробки залізорудних родовищ Кривба-

су. *Мінеральні ресурси України*. 2018. № 2. 43—50.

Logvin, V., & Pigulevskiy, P. (2016). The analysis of the initial field transformations for their sources formalized delineation Geoinformatics 2016 — XVth International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. 2016 (Vol. 2016, pp. 1—5). https://doi. org/10.3997/2214-4609.201600506.

## Application of differential characteristics in the analysis of vertical electrical sounding data

### V.M. Logvin<sup>1</sup>, P.G. Pigulevskiy<sup>1,2</sup>, S.O. Yaremii<sup>1</sup>, 2025

<sup>1</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine <sup>2</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

We consider the results of processing of field geoelectric surveys of the Dniprogeofizyka State Geological Survey using additional differential characteristics of potential fields in the territory adjacent to the city of Kryvyi Rih from the south. It is proposed to use analogues of the total gradient and curvature of the apparent resistivity when analysing measurements by the vertical electrical sounding method. These characteristics significantly help in studying the structure of the geological environment (uplifts, depressions, strata boundaries, fault zones) and the magnitude of groundwater mineralisation. Differential characteristics can significantly increase the efficiency of identification and localisation of waterlogged rock masses by mineralised groundwater in the territory of Kryvbas.

**Key words:** Ukrainian Shield, fracture zone, groundwater, electrical survey, processing and interpretation, differential field characteristics.

#### References

- Dovgiy, S.O., Ivanchenko, V.V., Korzhnev, M.M., Trofymchuk, O.M., Yakovlev, E.O. et al. (2021). Research on the ecological state of post-mining areas in Ukraine on the example of the Kryvyi Rih basin and its surroundings. Kyiv: Nika-Center, 196 p. (in Ukrainian).
- Rudko, G.I., & Yakovlev, E.O. (2018). Regional technogenic changes in ecological and geodynamic conditions of development of iron

УДК 551.24.03

ore deposits of Kryvbas. *Mineral Resources of Ukraine*, (2), 43—50 (in Ukrainian).

Logvin, V., & Pigulevskiy, P. (2016). The analysis of the initial field transformations for their sources formalized delineation Geoinformatics 2016 — XVth International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. 2016 (Vol. 2016, pp. 1—5). https://doi. org/10.3997/2214-4609.201600506.

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322548

## Напружено-деформований стан навколо вогнища землетрусу

#### М.В. Лубков, 2025

Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Полтава, Україна

На підставі варіаційного скінченно-елементного методу для пружних багатошарових ортотропних оболонок обертання, з урахуванням зсувної жорсткості, проведено чисельне моделювання розподілу переміщень і напружень у різних напрямках літосфери навколо вогнища землетрусу. Показано, що збільшення товщини шару осадових порід та, відповідно, зменшення потужності шарів кристалічного фундаменту призводить до збільшення амплітуд переміщень і зниження амплітуд напружень. Зміна жорсткості порід у зсувному напрямку літосфери найбільше впливає на кількісні та якісні зміни в розподілі переміщень і напружень. Зниження жорсткості відповідних порід літосфери у вертикальному напрямку веде до значного збільшення амплітуд вертикальних переміщень. Найменше впливають на розподіли переміщень і напружень в околі вогнища землетрусу зміни жорсткості геологічних порід літосфери у поздовжньому напрямку, перпендикулярному до зсуву.

**Ключові слова**: напружено-деформований стан літосфери, вогнище землетрусу, моделювання на підставі методу скінченних елементів.

Вступ. У наш час добре відомо, що виникнення землетрусів часто пов'язане з активними тектонічними рухами уздовж розломів. У результаті зачеплення протилежних бортів розлому, що взаємно рухаються, у масиві твердих порід навколо заблокованої ділянки розлому накопичується енергія пружної деформації, оскільки відносний рух порід, віддалених від цієї ділянки, триває. Коли напруження навколо заблокованої ділянки розлому сягає критичної величини, у деякій локальній області, що умовно називають вогнищем землетрусу, відбувається пружне розрядження накопичених напружень. Цей процес супроводжується деформуванням території,

Citation: Lubkov, M.V. (2025). Stress-deformable state near the earthquake focus. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 256—260. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322548.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

що прилягає до вогнища землетрусу, а також перенесенням сейсмічної й теплової енергій [Шерман, 2005; Karato, 2008]. Традиційно у вивченні проблем, пов'язаних з виникненням землетрусів та їх наслідків, основну увагу приділяють розробці критеріїв прогнозу землетрусів і пошуку закономірностей деформування, руйнування прилеглих територій та швидкості поширення сейсмічних хвиль на підставі тих або інших моделей навколо вогнищ землетрусів. Наприклад, моделі лавино нестійкого тріщиноутворення, ділатансно-дифузійні моделі, моделі консолідації, моделі stickslip та ін. [Шерман, 2005; Wright, 2016], які характеризують виникнення землетрусів у пружному тріщинуватому розломноблоковому середовищі. Згідно із цими моделями деформаційні й сейсмічні процеси, що виникають в околі вогнища землетрусу, мають зазвичай хаотичний характер, у них складно виділити будь-які стійкі фази. Як зазначено в статті [Шерман, 2005], жодна з відомих моделей вогнищ землетрусу не описує закономірностей просторовочасової міграції сейсмічних подій у межах пружного тріщинуватого середовища, що залучене до деформування. Таким чином, становить інтерес дослідження закономірностей напружено-деформованого стану, з урахуванням анізотропії тріщинуватопружного середовища, в околі вогнища землетрусу. У цій роботі на підставі варіаційного скінченно-елементного методу [Лубков, 2011] для багатошарових пружних ортотропних оболонок обертання, з огляду на зсувну жорсткість, змодельовано напружено-деформований стан верхнього, пружного шару літосфери, що виникає навколо вогнища землетрусу зі зсувом за простяганням розлому. Дослідження проведено для типового складу твердих геологічних порід, характерних для верхнього пружного шару літосфери: пісковиків, гранітоїдів і базальтів з урахуванням анізотропії. Розглянуто шаруваті фрагменти пружної частини літосфери, що примикають до лінії активного розриву, по якому відбувся черговий сейсмогенний зсув масиву геологічних порід.

Постановка та метод розв'язання задачі. Розглянемо тривимірну модель релаксації напружень на розриві зі зсувом за простяганням у верхньому пружному шарі літосфери, де по розриву відбувається горизонтальний рух між двома літосферними блоками. Припустимо, що глибше пружного шару розлом замкнений і в цій ділянці області напруження не передаються. Приймемо також, що підошва пружного шару літосфери вільна від напружень. У результаті відносного руху літосферних блоків в околі заблокованої ділянки розлому концентрується зсувне напруження. При досягненні на цій ділянці напруження, яке можна порівняти з межею міцності твердих порід, відбувається землетрус [Шерман, 2005; Karato, 2008]. Напруження поблизу замкненої ділянки знімається й передається в прилеглому літосферному блоку, що супроводжується деформуванням земної поверхні. Вважатимемо, що шаруваті фрагменти пружної частини літосфери складаються з типових твердих геологічних порід, таких як пісковики, гранітоїди та базальти.

Для моделювання напружено-деформованого стану в анізотропних шарах пружної літосфери скористаємося теорією багатошарових ортотропних пружних оболонок з урахуванням зсувної жорсткості [Карнаухов, Киричок, 1986; Лубков, 2011]. Розглянемо ортотропні оболонки у криволінійній системі координат (s,  $\varphi$ , z). Тут s — координата у поздовжньому напрямку поверхні оболонки, ф — координата в кутовому (зсувному) напрямку поверхні оболонки; z — координата за товщиною оболонки. Для розв'язання згаданої вище задачі деформування скористаємось методом скінченних елементів, заснованому на варіаційному принципі Лагранжа, що виражає мінімум потенціальної механічної енергії системи [Лубков, 2011].

Моделювання напружено-деформованого стану в околі вогнища землетрусу. Вважатимемо, що напружено-деформований стан виникає у верхньому, пружному шарі ділянки літосферного блока з лінійними розмірами 100×100 км, який



Рис. 1. Розподіл вертикальних переміщень ділянки пружної анізотропної літосфери, що складається з шару пісковиків ( $B_{\phi}=10^{10}$  Па,  $v_{s\phi}=0,3$ ) завтовшки 14 км, шару гранітоїдів ( $B_{\phi}=2\cdot10^{10}$  Па,  $v_{s\phi}=0,2$ ) — 8 км, базальтів ( $B_{\phi}=5\cdot10^{10}$  Па,  $v_{s\phi}=0,27$ ) — 8 км: a — відповідає описаному вище випадку; б, b — вертикальні переміщення, зміна жорсткості у пісковиках ( $\overline{o}$  —  $B_s=2\cdot10^9$  Па,  $v_{s\phi}=0,3$ ); b —  $B_z=2\cdot10^9$  Па,  $v_{qz}=0,3$ ); r — вертикальні переміщення, властивості порід (пісковики —  $B_i=2\cdot10^9$  Па,  $v_{ij}=0,25$ , гранітоїди —  $B_i=8\cdot10^9$  Па,  $v_{ij}=0,2$ ; базальти —  $B_i=2\cdot10^{10}$  Па,  $v_{ij}=0,27$ ).

Fig. 1. Distribution of the vertical displacements of the area of elastic lithosphere consisting of a sandstone layer  $(B_{\varphi}=10^{10} \text{ Pa}, v_{s\varphi}=0.3)$  14 km thick, a granitoids layer  $(B_{\varphi}=2\cdot10^{10} \text{ Pa}, v_{s\varphi}=0.2)$  — 8 km, a basalt layer  $(B_{\varphi}=5\cdot10^{10} \text{ Pa}, v_{s\varphi}=0.27)$  — 8 km; *a* — responds to the described case; *G*, *B* — vertical displacements at sandstones rigidity changes  $(G - B_s=2\cdot10^9 \text{ Pa}, v_{s\varphi}=0.3)$ ; *B* —  $B_z=2\cdot10^9 \text{ Pa}, v_{\varphi z}=0.3)$ ; *r* — vertical displacements with sandstones  $(B_i=2\cdot10^9 \text{ Pa}, v_{ij}=0.25)$  granitoids  $(B_i=8\cdot10^9 \text{ Pa}, v_{ij}=0.2)$ , and basalts  $(B_i=2\cdot10^{10} \text{ Pa}, v_{ij}=0.27)$ .

примикає до зони активного розлому. Припустимо, що в результаті пружної розрядки зсувних напружень на заблокованій частині, розташованій посередині лівої сторони цієї ділянки, яка прилягає до лінії розлому, відбувається розрив. Він спричинює переміщення відрізка розвантаження завдовжки 5 км на відстань 1 м і, відповідно, деформування всієї зазначеної ділянки пружної літосфери. Розглянемо анізотропні шаруваті фрагменти пружної літосфери з різним ступенем тріщинуватості порід (рис. 1, 2). Тут *B<sub>i</sub>* — модуль Юнга в *i*-му напрямку, v<sub>ii</sub> — коефіцієнт Пуассона в напрямку і, ў [Карнаухов, Киричок, 1986].

Висновки. Встановлено, що розподіли переміщень і напружень в околі вогнища землетрусу у різних напрямках залежать від товщини шару осадових порід і товщини порід кристалічного фундаменту літосфери, а також від розподілу жорсткості різних порід у різних напрямках. Збільшення товщини шару осадових порід та, відповідно, зменшення потужності шарів кристалічного фундаменту приводить до збільшення амплітуд переміщень і зниження амплітуд напружень. Зміна жорсткості порід у зсувному напрямку найбільше впливає на кількісні та якісні зміни в розподілі переміщень і напружень. Зменшення жорсткості відповідних по-



Рис. 2. Розподіл напружень анізотропної пружної ділянки літосфери, що складається з шару пісковиків  $(B_{\varphi}=2\cdot10^9 \,\Pi a, v_{s\varphi}=0.3)$  завтовшки 14 км, шару гранітоїдів  $(B_i=8\cdot10^9 \,\Pi a, v_{ij}=0.2)$ — 8 км, базальтів  $(B_i=2\cdot10^{10} \,\Pi a, v_{ij}=0.28)$ — 8 км. Напруження: a— поздовжні  $(\sigma_{ss})$ ;  $\overline{b}$ — зсувні  $(\sigma_{\varphi\varphi})$ ;  $\overline{b}$ — вертикальні  $(\sigma_{zz})$ ; r— згинальні  $(\sigma_{\varphi z})$ . Fig. 2. Strain distribution of the area of elastic lithosphere consisting of the sandstone layer  $(B_{\varphi}=2\cdot10^9 \,\mathrm{Pa}, v_{s\varphi}=0.3)$  14 km thick, granitoids layer  $(B_i=8\cdot10^9 \,\mathrm{Pa}, v_{ij}=0.2)$ — 8 km, basalts  $(B_i=2\cdot10^{10} \,\mathrm{Pa}, v_{ij}=0.28)$ — 8 km: a— longitudinal strains  $(\sigma_{ss})$ ;  $\overline{b}$ — shifting strains  $(\sigma_{\varphi\varphi})$ ;  $\overline{b}$ — vertical strains  $(\sigma_{zz})$ ; r— bending strains  $(\sigma_{\varphi z})$ .

рід літосфери у вертикальному напрямку приводить до значного збільшення амплітуд вертикальних переміщень. Найменше впливають на розподіли переміщень і напружень в околі вогнища землетрусу зміни жорсткості гірських порід літосфери у поздовжньому напрямку. Якісні картини роз-

#### Список літератури

- Карнаухов В.Г., Киричок И.Ф. *Связанные задачи теории вязкоупругих пластин и оболочек.* Киев: Наук. думка, 1986, 221 с.
- Лубков М.В. Моделювання напружено-деформованого стану та аномального гравітаційного поля у вогнищі землетрусу. *Геоінформатика.* 2011. № 1. С. 51—56.
- Шерман С.И. Тектонофизический анализ сейсмического процесса в зонах активных

поділу зсувних і вертикальних переміщень та напружень у поздовжньому, зсувному й вертикальному напрямках мають подібний характер. Найбільші переміщення та напруження концентруються поблизу лінії розвантаження розлому, вони швидко спадають у поперечному напрямку.

разломов литосферы и проблема среднесуточного прогноза землетрясений. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 1. С. 20—38.

- Karato, S. (2008). Deformation of Earth materials. An introduction to the rheology solid Earth. Cambridge University Press, 454 p.
- Wright, T.J. (2016). The earthquake deformation cycle. *Astronomy and Geophysics*, 57(4), 4.20–4.26. https://doi.org/10.1093/astrogeo/atw148.

## Stress-deformable state near the earthquake focus

#### *M.V. Lubkov, 2025*

Poltava gravimetric observatory of the S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Poltava, Ukraine

The article models the distribution of displacements and stresses of the lithosphere around the earthquake's focus. It is based on the variational finite element method for elastic multilayered orthotropic shells of rotation and considers the shear rigidity. With increasing thickness of the layer of sedimentary rocks (and, accordingly, decreasing strength of the layers of the crystalline foundation), displacement amplitudes grow, and stress amplitudes become smaller. The change in rock rigidity in the shear direction has the greatest effect on the quantitative and qualitative changes in the distribution of displacements and stresses. Rock rigidity in the vertical direction is somewhat less influential. A decrease in rigidity in this direction leads to a significant increase in the amplitude of vertical movements. The least effect on the displacements' and stresses' distribution belongs to rigidity changes in the longitudinal direction, perpendicular to the lithosphere shifting.

**Key words:** stress-strain state of the lithosphere, earthquake focus, modeling based on the finite element method.

#### References

- Karnauhov, V.G., & Kirichok, I.F. (1986). *Connected problems of viscoelastic plates and shells.* Kiev: Naukova Dumka, 221 p. (in Russian).
- Lubkov, M.V. (2011). Modeling of the strain-deformable state and anomalous gravity field in the epicenter of the earthquake. *Geoinformatika*, (1), 51—56 (in Ukrainian).
- Sherman, S.I. (2005). Tectonophysical analysis of the seismic processes in the lithosphere ac-

tive faults zones and problem of average daily earthquake forecast. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 27(1), 20—38 (in Russian).

- Karato, S. (2008). Deformation of Earth materials. An introduction to the rheology solid Earth. Cambridge University Press, 454 p.
- Wright, T.J. (2016). The earthquake deformation cycle. *Astronomy and Geophysics*, *57*(4), 4.20—4.26. https://doi.org/10.1093/astrogeo/atw148.

УДК 553.94:553.981:551.735(477.83)

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322549

## Вплив тектонічних порушень на газоносність вугленосних відкладів Любельського родовища Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну

#### М.М. Матрофайло, 2025

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна

У статті викладено результати дослідження газоносності вугільних пластів Любельського родовища Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну. За вмістом

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Citation: Matrofailo, M.M. (2025). The influence of tectonic disturbances on the gas content of coal-bearing deposits of the Lyubelya field of the Lviv-Volyn coal basin. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 260—265. https://doi. org/10.24028/gj.v47i2.322549.

метану, вуглекислого газу і азоту на родовищі виділено метаново-азотну і метанову газові зони. На основі даних геологорозвідувальних і тематичних досліджень схарактеризовано структурно-тектонічні особливості карбонових відкладів родовища. Зазначено вплив геодинамічних процесів формування території Львівсько-Волинського басейну на дегазацію кам'яновугільних відкладів. Визначено основні чинники накопичення вуглеводневих газів у вугленосній товщі Любельського родовища.

**Ключові слова:** вугільний пласт, вуглеводневі гази, метан, газова зональність, тектонічні порушення, Любельське вугільне родовище.

Вступ. Зростаючий попит на природний газ як в Україні так і за її межами, обумовив підвищення уваги до використання газу метану вугільних родовищ [Про газ..., 2009; Загальнодержавна..., 2011]. Метан вугільних родовищ в Україні розглядається як ресурс для забезпечення енергетичних потреб країни. Його видобування — важливий чинник створення безпечних умов роботи на шахтах, а з екологічних міркувань це зменшення викидів газу метану в атмосферу.

Газоносність Львівсько-Волинського басейну (ЛВБ) є наслідком тривалої історії геологічного розвитку Львівського палеозойського прогину і формування у його надрах скупчень метанових газів обумовлених низкою чинників, які визначали генерацію, міграцію, акумуляцію та дегазацію газів у вугленосній товщі [Матрофайло та ін., 2017]. Метан генерувався як концентрованою, так і розсіяною вуглефікованою органічною речовиною порід. Водночас геодинамічний і диференційний геологічний розвиток території басейну відіграв вагому роль у формуванні його структурних особливостей і у процесах вуглефікації органічної речовини, які обумовили сучасну газоносність ЛВБ.

**Об'єкти, мета і методи дослідження.** *Об'єктами дослідження* є вутільні гази, газоносність і структурно-тектонічні особливості карбонових відкладів Любельського родовища Південно-Західного вугленосного району ЛВБ.

Мета дослідження — визначення впливу структурно-тектонічних чинників на газоносність Любельського родовища ЛВБ. При дослідженні було застосовано комплексний підхід до вивчення газоносності ЛВБ, який за нинішніми оцінками є газовугільним. Вивчали величину і закономірність зміни природної газоносності вугленосної товщі, геодинамічні умови формування басейну та тектонічні особливості Любельського родовища.

Результати досліджень. Структурнотектонічні особливості. У структурно-регіональному плані Любельське родовище розташоване на території Південно-Західного вугленосного району ЛВБ. Найповніший стратиграфічний розріз схарактеризований свердловинами в межах цього родовища, яке є найбільш опущеною частиною басейну. Східніше воно відділяється від Тяглівського родовища Бутинською антиклінальною зоною, яка ускладнена Бутин-Хлівчанською зоною насувів, складеною трьома-чотирма, а місяцями п'ятьма зближеними порушеннями. Родовище характеризується лінійною синклінальною складчастістю північно-західного простягання, до складу якої входить Карівська синкліналь. В її межах виділено поздовжні й поперечні диз'юнктивні порушення скидонасувного типу (рисунок), які розділяють пологозалягаючу складку на окремі блоки [Сокоренко та ін., 2011]. Загалом тектонічна порушеність родовища є більш інтенсивною у південній частині. У межах Карівської синкліналі особливо поширені зони насувів субмеридіонального простягання, які характеризуються каскадом з 10—14 субпаралельних насувів з крутим падінням зміщувачів (10—80°). Кількість розривних тектонічних порушень, розкритих свердловинами на площі Любельського родовища, становить 19 насувів амплітудою 3—79 м і шість скидів амплітудою 3—75 м.

Проведений аналіз показав, що Любельське родовище належить до найбільш



Поширення тектонічних порушень на площі Любельського і Тяглівського родовищ Південно-Західного вутленосного району Львівсько-Волинського басейну: 1, 2— тектонічні порушення за даними геологорозвідувальних робіт (1— насуви (а— достовірні,  $\delta$ — ймовірні); 2— скиди (а— достовірні,  $\delta$ — ймовірні); 3— тектонічні порушення за даними сейсморозвідувальних робіт (а— вірогідні,  $\delta$ — ймовірні); 4— зони підвищеної тріщинуватості порід за даними газового знімання; 5— контури родовищ;  $\delta$ — границя шахтного поля; 7— державний кордон.

The spread of tectonic disturbances in the area of the Lyubelyaand Tyagliv deposits of the South-Western coalbearing district of the Lviv-Volyn basin: 1, 2—tectonic disturbances according to geological survey data (1—thrusts (a—reliable,  $\delta$ — probable); 2—downthrows (a—reliable,  $\delta$ — probable); 3—tectonic disturbances according to seismic survey data (a—probable),  $\delta$ — probable); 4— zones of increased fracturing of rocks according to gas survey data; 5— contours of deposits;  $\delta$ —boundary of the mine field; 7— state border. складних у структурно-тектонічному відношенні родовищ басейну. Ці дані підтверджуються результатами сейсморозвідувальних робіт, якими виявлено значну кількість нових розривних порушень. Газовим зніманням у південно-східній частині родовища встановлені просторі зони підвищеної тріщинуватості порід (див. рисунок). Порівняно з Тяглівським родовищем кількість розривних тектонічних порушень скидонасувного типу тільки за даними геологорозвідувальних робіт майже у 3 рази більша.

Важливо зазначити, що формування основних дислокацій на території ЛВБ і утворення лінійних складчастих структур в його південно-західній частині, ускладнених розривними тектонічними порушеннями, обумовлено кінцевими фазами герцинської складчастості, під впливом тектонічних рухів суміжної складчастогірської області. Активізація герцинських тектонічних рухів та загальне підняття території басейну обумовили перетворення ії на суходіл і встановлення континентальних умов, які зберігалися до початку юрського періоду. Ерозійно-денудаційні процеси кам'яновугільних відкладів у післякарбоновий час привели до скорочення стратиграфічного розрізу карбону басейну, де відсутні відклади, молодші пізньобашкирських (вестфал А), чималого зменшення обсягів вугленосної формації і промислових запасів вугілля, переміщення (у напрямку скорочення) межі поширення вугленосних порід, утворення характерного для ЛВБ обрису виходу промислових вугільних пластів на домезозойську поверхню та значно вплинули на дегазацію вугленосної товщі Любельського родовища [Matrofailo, 2023].

Природна газоносність вугільних пластів. За вмістом метану, вуглекислого газу і азоту на родовищі виділено метановоазотну і метанову газові зони (таблиця). У метановій зоні основним компонентом вугільних газів є метан, вміст якого змінюється від 51,1 до 97,34 %. З глибиною кількість його збільшується, а вміст азоту закономірно знижується і дорівнює 3,82—

		1				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
Поле шахти (номер)	Газова зона	Синоніміка вугільного пласта	Компонентний склад газу, %			Природна
			CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	вугільного пласта, м <sup>3</sup> /т с. б. м.
1	метаново- азотна	$n_{7}, n_{7}^{1}, n_{7}^{B-1}, n_{7}^{B-1}, n_{7}^{B-2}, n_{8}, n_{8}^{0}$	0,10—5,68	0,00—28,55	61,5—99,7	0,00—1,98
	метанова	$n_0^{6}$	0,71—1,40	53,9—93,8	5,64—39,16	12,30—20,57
2	метаново- азотна	$n_7, n_7^{-1}, n_7^{-1}, n_7^{-1}, n_7^{-1}, n_8, n_8^{-1}, n_9$	0,51—16,50	0,25—28,55	63,30—99,32	0,0—1,78
	метанова	$n_0^6$	0,05—2,10	51,14—92,24	6,77—49,93	4,61—30,70
3	»	$n_7, n_7^{-1}, n_7^{-1}, n_8, n_8, n_9$	0,08—3,64	50,55—97,34	3,82—41,22	9,78—22,48
4	метаново- азотна	п <sub>8</sub> <sup>в</sup> , п <sub>9</sub>	0,20-0,48	1,65—15,34	71,72—97,02	0,00—0,70
	метанова	n <sub>7</sub> <sup>B</sup>	0,09—0,15	51,5—84,55	39,70—48,50	9,60
5	метаново- азотна	$n_7^{\rm B}, n_8^{\rm 0}, n_8^{\rm B}, n_9$	0,16—0,63	11,97—33,95	52,19—98,07	0,00—2,26
	метанова	v <sup>6</sup>	0,2-0,45	69,05—80,79	19,21—30,95	10,90—20,50

## Природна газоносність і компонентний склад газу вугільних пластів Любельського родовища Південно-Західного району Львівсько-Волинського басейну

48,50 %. Зменшується і вміст вуглекислого газу — до 1,14 %, лиш в поодиноких пробах його кількість досягає 10,06 %. Практично відсутні тяжкі вуглеводні (бутан і пропан) і тільки у пласті *n*<sub>9</sub> на полі шахти Любельська № 3 у свердловині 6302 їх кількість становить, %: бутан — 1,34—5,61; пропан — 0,40—1,34.

У метаново-азотній зоні, де розміщується більшість вугільних пластів, вміст метану досягає 28,55 %. Кількість азоту переважає і становить 61,47—99,68 %. Кількість вуглекислого газу змінюється від 0,10 до 5,68 % з переважними значеннями 0,31—0,84 %. Він утворювався у результаті біохімічних і окиснювальних процесів перетворення фітомаси у вугілля і привнесення його інфільтраційними водами, а в окремих випадках він має глибинне походження. Водень трапляється в кількості від слідів до 1,04—11,2 %, рідко його вміст досягає 14,7—25,3 %. Походження водню, можливо, пов'язане з біохімічним перетворенням рослинної речовини у вугілля, а також з метаморфізмом вугілля. Вміст кисню коливається від 0,15 до 22,9 % і переважно має повітряне походження.

Аналіз даних газового опробування показав, що вугільні пласти серпуховського і башкирського ярусів карбону залягають в метаново-азотній газовій зоні (газового вивітрювання), за винятком шахти Любельська № 3, де всі вугільні пласти до  $n_9$ , включно, залягають у метановій газовій зоні.

Вугільні пласти  $n_0^6$  і  $v_6$  на всій площі родовища розміщуються в метановій газовій зоні, поверхня якої відповідає глибинам 830—1130 м. Ізогаза 5 м<sup>3</sup>/т с. б. м. проходить на глибині 920—1020 м. На полях шахт Любельська № 1 і 2 поверхня метанової газової зони відповідає глибині 830 м, включаючи вугільний пласт  $n_0^6$ . У центральній частині родовища (поле шахти Любельська № 3) верхня границя метанової зони проходить безпосередньо під відкладами юри, крейди і заглиблюється зі сходу на захід до 500—700 м. Далі на полях шахт Любельська № 4 і 5 поверхня метанової газової зони починаючи з пласта  $n_7^8$  знову занурюється

і на крайньому північному заході родовища досягає глибини 1130 м. Така ундуляція верхньої границі метанових газів обумовлена будовою Карівської синкліналі, що розділена поздовжнім антиклінальним підняттям на дві синклінальні складки II порядку.

**Висновки.** Основними чинниками поширення зони газового вивітрювання на Любельському родовищі є інтенсивна диз'юнктивна тектоніка, підвищена тріщинуватість порід, а також умови геодинамічного розвитку регіону, коли від кінця карбону до початку крейди кам'яновугільні відклади перебували на денній поверхні і контактували безпосередньо з атмосферою. У результаті частина вуглеводневих газів звітрилася. Пізніше покривні верхньоюрські грубоуламкові утворення не становили значної перешкоди довготривалій (близько 54,1 млн років) дегазації вугільних пластів  $n_7$ — $b_3$ , особливо у південнозахідній частині Львівсько-Волинського басейну.

#### Список літератури

- Загальнодержавна програма розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року. Відомості Верховної Ради України (ВВР). 2011. № 44. ст. 457. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/ 3268-17#Text.
- Матрофайло М., Бучинська І., Побережський А. Розподіл і походження вуглеводневих газів у вугленосних відкладах Львівсько-Волинського басейну. *Геологія і геохімія горючих копалин.* 2017. № 3-4 (172-173). С. 87—105.

Про газ (метан) вугільних родовищ. Відомості

Верховної Ради України (ВВР). 2009. № 40. ст. 578. Режим доступу: https://zakon.rada. gov.ua/laws/show/1392-17#Text.

- Сокоренко С., Костик І., Матрофайло М. Особливості сучасної природної газоносності вугільних пластів та вуглевмісних порід Любельського родовища кам'яного вугілля Львівсько-Волинського басейну. *Геолог України*. 2011. № 2(34). С. 81—89.
- Matrofailo, M. (2023). Stages of geodynamic development of the Lviv-Volyn coalbasin. *Geodynamics*, (2), 33—52. https://doi.org/10.23939/ jgd2023.02.033.

## The influence of tectonic disturbances on the gas content of coal-bearing deposits of the Lyubelya field of the Lviv-Volyn coal basin

#### M.M. Matrofailo, 2025

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

The paper describes the gas content of the coal seams of the Lyubelya deposit of the Lviv-Volyn coal basin. According to methane, carbon dioxide, and nitrogen content, methane-nitrogen and methane zones are distinguished in the field. Structural and tectonic features of the Carbonaceous deposits were characterized based on geological exploration and thematic studies. The influence of geodynamic processes of formation of the territory of the Lviv-Volyn basin on the degassing of coal deposits is indicated. The main factors affecting the accumulation of hydrocarbon gases in the coal-bearing stratum of the Lyubelyacoal field were determined.

**Key words**: coal seam, hydrocarbon gases, methane, gas zonation, tectonic dislocation, Lyubelya coal field.

#### References

- The national program for the development of the mineral and raw material base of Ukraine for the period until 2030. Information of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR). 2011. 44. 457. (2011). Retrieved from https://zakon.rada. gov.ua/laws/show/3268-17#Text (in Ukrainian).
- Matrofailo, M., Buchynska, I., & Poberezhskyi, A. (2017). Distribution and origin of hydrocarbon gases in coal-bearing deposits of the Lviv-Volyn basin. *Geology & geochemistry of Combustible Minerals*, (3-4), 87—105 (in Ukrainian).
- About gas (methane) from coal deposits. Information of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR).

2009. 40. 578. (2009). Retrieved from https:// zakon.rada.gov.ua/laws/show/1392-17#Text (in Ukrainian).

- Sokorenko, S., Kostyk, I., & Matrofailo, M. (2011). Characteristic properties of present day natural gas potential of coal beds and coal-containing rocks of the Lyubelya coal field of the Iviv-Volyn basin. *Geologist of Ukraine*, (2), 81—89 (in Ukrainian).
- Matrofailo, M. (2023). Stages of geodynamic development of the Lviv-Volyn coalbasin. *Geodynamics*, (2), 33—52. https://doi.org/10. 23939/ jgd2023.02.033.

УДК 550.831.072.550.834

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322550

# Автоматизований підбір гравітаційних аномалій при пошуках родовищ корисних копалин

#### Т.Л. Міхеєва, О.П. Лапіна, Г.М. Дрогицька, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Вирішення завдань інтерпретації гравіметричних спостережень пов'язане з обробкою великих масивів різної інформації, це є причиною того, що розв'язання цих задач неможливе без використання сучасних комп'ютерних технологій.

В.І. Старостенко

Комп'ютерна автоматизована система спрямована на вивчення та розвиток методів інтерпретації даних гравітаційних і магнітних полів при розвідці родовищ корисних копалин. Створено програмно-аналітичний комплекс і розраховано типові геофізичні моделі, які можливо використовувати під час пошуків родовищ корисних копалин у межах досліджуваних регіонів.

Наведено приклади, для яких застосовано тривимірний алгоритм гравітаційного підбору з використанням апроксимаційної моделі у вигляді тристрижневої конструкції на території Торгайської нафтогазоносної області Республіки Казахстан, де відкрито нафтові родовища і зафіксовано нафто-газопрояви у свердловинах, і для габро-анортозитових масивів центральної частини Корсунь-Новомиргородського плутону Українського щита, що враховують всю наявну апріорну інформацію про фізичні та геометричні параметри аномалієзбурювальних об'єктів. У першому прикладі отримано контури перспективних ділянок для проведення прямих пошуків вуглеводнів, у другому — виділено і оконтурено у верхній частині розрізу тіла габро-

Citation: Mikheeva, T.L., Lapina, O.P., & Drogitskaya, G.M. (2025). Automated selection of gravity anomalies during the search for minerals. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 265—269. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322550. Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

анортозитів й встановлено глибину їх поширення. Ці моделі можуть бути використані для отримання додаткової достовірної геологічної інформації.

**Ключові слова:** тривимірне моделювання, обернена задача, метод підбору, нафтові родовища, плутон, габро-анортозити.

Вступ. Побудова геологічних моделей глибинної будови та окремих локальних структур нині неможлива без широкого використання геофізичних даних, інтерпретація яких залежить від рівня використаного алгоритмічного, програмного та методичного забезпечення. У зв'язку з цим проблема створення ефективних технологій процесу обробки геофізичної інформації, а також моделювання збурювальних джерел залишається однією з найбільш важливих проблем для вирішення широкого кола геологічних завдань. У практиці геологічної інтерпретації як гравітаційних, так і магнітних аномалій метод підбору отримав широкий розвиток, наприклад роботи В.І. Старостенка, Є.Г. Булаха, О.І. Кобрунова та ін. Щодо стійкості розв'язку таких задач можна впевнено говорити про стійкість градієнтного методу [Старостенко, 1978; Старостенко, Оганесян, 2001].

В основу цих розробок покладено ідеї та результати попередніх досліджень авторів: математичні методи та інформаційнокомп'ютерні технології визначення параметрів інтегральних геолого-геофізичних моделей складного геологічного середовища. Набутий великий досвід у напрямі розвитку теорії розв'язків нелінійних обернених задач гравіметрії, створення комп'ютерних технологій інтерпретації гравіметричних і магнітометричних даних з метою уточнення геологічної будови геосередовища та прогнозування родовищ корисних копалин [Корчагин и др., 2004; Булах, 2010; Лапина и др., 2016]. Запропонований комплекс методів є новим етапом геофізичних досліджень.

Використання розроблених алгоритмів при вирішенні практичних завдань. Обчислення поля, обумовленого апроксимаційною моделлю, яка зображує сукупність тривимірних стрижневих тіл. 1. Район досліджень розміщується на території Торгайської нафтогазоносної області Республіки Казахстан, де відкриті нафтові родовища та зафіксовано нафто- і газопрояви у свердловинах, які охоплюють горизонти від кори вивітрювання до фундаменту включно до неокому [Куадыков, 2020]. Особливий інтерес становлять локальні гравітаційні аномалії, отримані в результаті проведення високоточного гравіметричного знімання з урахуванням необхідних поправок. Проте аналіз гравітаційних аномалій без урахування неглибоких неоднорідностей може призвести до втрати точності, деталізація та рівень розрахунків якої залежить від складності геологічної будови розрізу. Так, за спостереженнями високої точності можна обчислити похідні вищих порядків і виключити вплив поверхневих неоднорідностей. Отже, поетапне усунення густинних неоднорідностей дає можливість точніше виділити аномальні ефекти, пов'язані з нафтовими родовищами. Якщо в аномальному полі внесок цих ефектів незначний, то в залишковому полі вони можуть бути домінуючими.

При розрахунках щільність проміжного шару задавали як 2,67 г/см<sup>3</sup>. Усі подальші інтерпретаційні побудови базувалися на використанні аномалії сили тяжіння у редукції Буге. Досліджували ділянку розміром 40×45 км. В аномальному полі зафіксовано 120 точок. Побудовано модель початкового наближення, що складається з 120 елементарних об'єктів. Як апроксимуючі осередки обрано тривимірні стрижневі тіла. Спочатку джерела були розташовані на глибині 1,2 км. З урахуванням апріорної інформації на всій ділянці досліджень при виборі початкової моделі задавали надлишкову густину –0,1 г/см<sup>3</sup>. На початку ітераційного циклу отримано значення функціонала  $F_0$ =47704,961 мГал<sup>2</sup>. Для вибору оптимального розв'язання задачі необхідним є значення середнього відхилення  $\Delta_{\rm cp.}$  між вихідним і теоретичним



Результати гравітаційного моделювання Торгайської нафтогазової області (Республіка Казахстан): a — карта ізодинам аномалій сили тяжіння, зумовленого апроксимаційною моделлю;  $\delta$  — контури нафтових родовищ. The result of gravity modeling of the Turgai oil-and-gas region (Republic of Kazakhstan): a — isodyne map of gravity anomalies determined by the approximation model;  $\delta$  — contours of oil fields.

полями. Оптимальним було розв'язання після 10 ітерацій, значення функціонала зменшилось до прийнятного рівня: F=1,1454 мГал<sup>2</sup>, значення середнього відхилення  $\Delta_{cp.}=0,039$ . Побудована модель, яка найточніше описує вихідне аномальне поле, показала, що глибини центрів тяжіння збурювальних джерел варіюють від 1,1 до 1,94 км, а значення густини коливається в межах від 0,2 до 1,26 г/см<sup>3</sup>. Результати розв'язання оберненої задачі використано для побудови карти ізодинам теоретичного поля. Глибина розміщення збурювальних об'єктів досягає 2,5 км.

Отже, побудовано апостеріорну інтерпретаційну модель розподілу густинних неоднорідностей, що відповідає як спостережуваному полю, так і геологічній інформації. На рисунку показано теоретичне поле, отримане в результаті розв'язування задачі, та контури перспективних ділянок для проведення прямих пошуків.

2. Тривимірне гравітаційне моделювання габро-анортозитових масивів центральної частини Корсунь-Новомиргородського плутону Українського щита. У межах досліджуваної ділянки було проведено тривимірне моделювання Городищенського і Смілянського габро-анортозитового комплексів і створено спільну 3D модель верхньої кори цих масивів [Міхеєва та ін., 2023, 2024]. Структура анортозит-рапаківіподібної формації та гнейсів, що її оточують, різна, і це відобразилось у сейсмічних хвильових полях. Для поділу порід основного складу та гранітів рапаківі, відмінних за густиною, було виконано тривимірне гравітаційне моделювання з використанням комп'ютерної технології автоматизованої інтерпретації геофізичних даних на підставі методу підбору.

Підібрана модель у результаті розв'язання оберненої гравітаційної задачі з використанням стрижневої апроксимаційної конструкції являє собою два аномальних тіла в районі Городищенського габроанортозитового масиву на заході та Смілянського масиву на сході з максимальною потужністю 4—5 км. До центру плутону потужність основних порід зменшується,

і на поверхні зафіксовані лише граніти рапаківі потужністю до 2 км. Максимальну потужність як гранітів рапаківі, так і габроанортозитів встановлено в районі західного та східного контактів плутону, що являють собою великі глибинні порушення, закартовані на поверхні та зафіксовані на глибині за сейсмічними даними. У процесі розв'язування задачі застосовували різні критерії оптимізації для моделювання джерел гравітаційного поля, що дало можливість мінімізувати завади в спостережуваних даних. Об'єднання кількох функціоналів якості допомогло зменшити вплив перешкод на результати спостережень. Результати тривимірного моделювання на великій кількості вхідних даних при дослідженні габро-анортозитових об'єктів продемонстрували стійкість і надійність комп'ютерного забезпечення, а отже, можливість його використовувати для вивчення глибинної будови подібних масивів інших плутонів.

Висновки. Наведена методика поєднує різні методи та способи інтерпретації стосовно головного цільового завдання побудова моделі гравітаційних мас. Підхід до її побудови мав такі етапи: вибір початкової моделі; оптимізації; аналіз моделейрозв'язків та їх геологічне тлумачення. На розглянутих прикладах було обрано структуру початкової моделі та визначено її кількісну характеристику. Оптимізація моделі виконувалась у режимі автоматичного підбору. У зв'язку з багатоекстремальністю цільової функції процес мінімізації розділений на глобальний та локальний пошук у просторі. Глобальний пошук є складним завданням, тому в даному випадку вибір екстремуму для локального пошуку здійснюється шляхом вибору першої моделі з урахуванням граничних умов.

#### Список літератури

- Булах Е.Г. Прямые и обратные задачи гравиметрии и магнитометрии. Киев: Наук. думка, 2010, 463 с.
- Корчагин И.Н., Левашов С.П., Михеева Т.Л., Орлова М.И., Прилуков В.В., Якимчук Н.А., Якимчук Ю.Н., Шумик С.В. Элементы многошаговых стратегий в технологиях автоматизированного подбора гравитационных и магнитных аномалий. В сб.: *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*. Т. 1. Київ, 2004, С. 143—158.
- Куадыков Б. Атлас нефтяных и газовых месторождений Республики Казахстан. *Нефть и газ.* 2020. № 5(119). С. 146—150.
- Аапина Е.П., Михеева Т.Л., Панченко Н.В. Аокализация геологических объектов по магнитометрическим данным с внедрением алгоритмов автоматизированного подбора. *Геофиз. журн.* 2016. № 6. Т. 38. С. 160— 173. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100. v38i6.2016.91904.

- Міхеєва Т.Л., Дрогицька Г.М., Лапіна О.П. Гравітаційне моделювання рудних габроїдів Корсунь-Новомиргородського плутону. *Геофіз. журн.* 2023. Т. 45. № 6. С. 127—140. https://doi.org/10.24028/gj.v45i6.293311.
- Міхеєва Т.Л., Дрогіцька Г.М., Лапіна О.П. Результати гравітаційного моделювання центральної частини Корсунь-Новомиргородського плутону (Український щит). *Геофіз. журн.* 2024. Т. 46. № 6. С. 120—137. https:// doi. org/10.24028/gj.v46i6.312203.
- Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. Киев: Наук. думка, 1978, 228 с.
- Старостенко В.И., Оганесян С.М. Некорректно поставленные задачи по Адамару и их приближенное решение методом регуляризации по А.Н. Тихонову. *Геофиз. журн.* 2001. Т. 23. № 6. С. 3—20.

## Automated selection of gravity anomalies during the search for minerals

#### T.L. Mikheeva, O.P. Lapina, G.M. Drogitskaya, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The computer automated system is aimed at the study and development of methods of interpreting data of gravity and magnetic fields in the exploration of mineral deposits.

Examples are presented that take into account all the *a priori* information about the physical and geometric parameters of anomaly-creating objects. A three-dimensional algorithm of gravity selection using an approximation model in the form of a three-bar structure was applied for the territory of the Torgai oil-and-gas-bearing region of the Republic of Kazakhstan, where oil deposits are discovered, and oil and gas shows are recorded in wells and for gabbro-anorthosite massifs of the central part of the Korsun-Novomyrhorod pluton of the Ukrainian Shield. In the first example, the contours of promising areas for conducting direct hydrocarbon searches were obtained. In the second, gabbro-anorthosite bodies were selected and outlined in the upper part of the section, and the depth of their distribution was established. These models can be used to obtain additional reliable geological information.

**Key words:** three-dimensional modeling, inverse problem, selection method, oil fields, pluton, gabbro-anorthosite.

#### References

- Bulakh, E.G. (2010). *Direct and inverse problems of gravimetry and magnetometry*. Kyiv: Naukova Dumka, 463 p. (in Russian).
- Korchagin, I.N., Levashov, S.P., Mikheeva, T.L., Orlova, M.I., Prilukov, V.V., Yakimchuk, N.A., Yakimchuk, Yu.N., & Shumik, S.V. (2004). Elements of multi-step strategies in technologies for automated selection of gravity and magnetic anomalies. In *Theoretical and applied aspects of geoinformatics* (Vol. 1, pp. 143–158). Kiev (in Russian).
- Kuadykov, B. (2020). Atlas of oil and gas fields of the Republic of Kazakhstan. *Oil and Gas*, (5), 146—150 (in Russian).
- Lapina, E.P., Mikheeva, T.L., & Panchenko, N.V. (2016). Localization of geological objects using magnetometric data with the introduction of automated selection algorithms. *Geophysical Journal*, 38(6), 160—173. https://doi. org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i6.2016.91904 (in Russian).

- Mikheeva, T.L., Drohytska, H.M., & Lapina, O.P. (2023). Gravitational modeling of ore gabroids of the Korsun-Novomyrhorod pluton. *Geophysical Journal*, 45(6), 127—140. https://doi. org/10.24028/gj.v45i6.293311 (in Ukrainian).
- Mikheeva, T.L., Drogitska, G.M., & Lapina, O.P. (2024). Results of gravity modeling of the central part of the Korsun-Novomyrgorodsky Pluin (Ukrainian Shield). *Geophysical Journal*, 46(6), 120—137. https://doi.org/10.24028/ gj.v46i6.312203 (in Ukrainian).
- Starostenko, V.I. (1978). *Robust numerical methods in gravimetry problems*. Kyiv: Naukova Dumka, 228 p. (in Russian).
- Starostenko, V.I., & Oganesyan, S.M. (2001). 3D problems according to Adamar and their approximate solution by the regularization method according to A.N. Tikhonov. *Geophysical Journal*, 23(6), 3—20 (in Russian).

УДК 550.36

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322551

## Особливості температурного режиму верхніх горизонтів кори зон нафтогазоносності заходу України

А.В. Назаревич<sup>1</sup>, Л.В. Скакальська<sup>1</sup>, Л.Є. Назаревич<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Львів, Україна <sup>2</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, відділ сейсмічності Карпатського регіону, Львів, Україна

У статті на підставі опублікованих і фондових термокаротажних даних проаналізовано особливості температурного режиму верхніх горизонтів кори зон нафтогазоносності заходу України. Встановлено, що характерні температури горизонтів порід на глибинах 1000, 2000, 3000, 4000 м на території Передкарпаття становлять 30±5, 50±10, 70±15, 90±20 °С відповідно. Середні вертикальні температурні градієнти тут дорівнюють 0,022±0,01 °C/м. На території Закарпаття характерні температури горизонтів порід на глибинах 1000, 2000, 3000 м переважно становлять у межах 55±10, 100±20, 145±25 °С відповідно. Середні вертикальні температурні градієнти на Закарпатті дорівнюють 0,05±0,015 °С/м. Наявна різниця в глибинних температурах між Закарпаттям і Передкарпаттям зумовлена високим глибинним тепловим потоком на Закарпатті, спричиненим впливом астеноліту з-під Паннонії, тоді як у Передкарпатті, яке тектонічно є південно-західною окраїною Східноєвропейської платформи, тепловий режим більш спокійний, характерний саме для платформ. Отримані в результаті досліджень дані використані для зіставлення з особливостями геодинамічного режиму відповідних зон регіону, а також для встановлення і врахування температурних поправок до петрофізичних характеристик порід-колекторів для методики прогнозування нафтогазоносності розрізів свердловин.

**Ключові слова:** західний регіон України, температурний режим, верхні горизонти кори, зони нафтогазоносності, температурні поправки, прогнозування нафтогазоносності свердловин.

Вступ. Одним з важливих факторів, що визначають особливості розподілу родовищ вуглеводнів і гідротермальних ресурсів, є температурний режим горизонтів земної кори. У західному регіоні України цей режим має значну диференціацію, пов'язану з впливом астенолітної складової регіонального геодинамічного процесу. Нами проаналізовано власні [Коváčiková et al., 2016; Назаревич, 2018; Назаревич та ін., 2024; Скакальська, 2024], опубліковані іншими авторами [Атлас ..., 1998; Осадчий та ін., 2008; Куровець та ін., 2014; Сучасна..., 2015; Локтєв, 2019 та ін.] і фондові дані щодо температурного режиму верхніх горизонтів кори зон нафтогазоносності заходу України.

**Об'єкти і методи досліджень.** Проведено збір, оцифрування та впорядкування даних термопрофілювання деяких свердловин у зонах нафтогазових родовищ і нафтогазоперспективних структур Західного нафтогазоносного регіону (Закарпаття, Передкарпаття, Буковина, Волино-Поділля), зокрема: Горохів-1, Вел. Мости-4, 5, 26, 30, Дубляни-4, Балучин-1,

Citation: Nazarevych, A.V., Skakalska, L.V., & Nazarevych, L.Ye. (2025). Features of the temperature regime of the crust's upper horizons in oil-and-gas bearing zones of the west of Ukraine. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 270—274. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322551.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

3, Перемишляни-1, Бучач-1, 2, Олесько-1, Давидени-1, Лопушна-7, 9, 13, Роженка-1, Пиняни-20, 34, В. Блажевська-4, 12, 13, Ст. Самбір-1, 7, 14, Півн. Меденичі-4, 8, 10, Свалява-5, Східниця-4, Болехів-4, Угерсько-9, 10, 13, 98, Долина-16, 30, 56, Делятин-9, Битків-457, Космач-3, 8, 11, Лопушна-2, та ін. З залученням цих та інших даних проаналізовано особливості температурного режиму верхніх горизонтів кори в районах нафтогазових родовищ регіону, зокрема, Старосамбірського нафтового, Бориславського нафтогазоконденсатного, Долинських нафтових, Битків-Бабченського нафтового, Лопушнянського нафтового та ін.

**Результати.** Характерні температури горизонтів порід на глибинах 1000, 2000, 3000, 4000 м на території Передкарпаття становлять 30±5, 50±10, 70±15, 90±20 °С відповідно. Середні вертикальні температурні градієнти тут дорівнюють 0,022±0,01 °С/м.

На Закарпатті характерні температури горизонтів порід на глибинах 1000, 2000, 3000 м переважно становлять 55±10, 100±20, 145±25 °С відповідно. Середні вертикальні температурні градієнти в дорівнюють 0,05±0,015 °С/м.

Наявна різниця у глибинних температурах між Закарпаттям і Передкарпаттям спричинена високим глибинним тепловим потоком у Закарпатті, що пов'язане із впливом астеноліту з-під Паннонії, тоді як на Передкарпатті, яке тектонічно є переважно південно-західною окраїною Східноєвропейської платформи, тепловий режим значно більш спокійний, характерний саме для платформ.

Напрями використання результатів. Результати геотемпературних досліджень використовуємо у різних напрямах, зокрема, для аналізу особливостей геодинаміки і сейсмотектонічного процесу в регіоні, нафтогазопошукових досліджень, пошуків гідротермальних ресурсів.

Геодинаміка і сейсмотектоніка. Температурний режим горизонтів кори заходу України пов'язаний, зокрема, з впливом астеноліту з-під Паннонії і, відповідно, відображає особливості астенолітної складо-

вої регіонального геодинамічного процесу. Це, у свою чергу, впливає на особливості сейсмотектонічних процесів у регіоні. Зазначене найбільше стосується Закарпаття, де внаслідок такого впливу спостерігаються велика реологічна розшарованість земної кори і багатоярусна сейсмотектоніка [Kováčiková et al., 2016; Назаревич та ін., 2024 та ін.].

Нафтогазопошукові дослідження. У сфері нафтогазопошукових досліджень наведені результати геотемпературних досліджень використовуємо, зокрема, для встановлення і врахування температурних поправок до петрофізичних характеристик порід-колекторів у методиці прогнозування нафтогазоносності розрізів свердловин [Скакальська, Назаревич, 2023; Скакальська, 2024]. Фізичною основою цих робіт є те, що температурний режим суттєво впливає на пружні характеристики порідколекторів, які, своєю чергою, впливають на характеристики поширення пружних хвиль при акустичному (АК) чи сейсмічному каротажі (СК). Встановлення і врахування відповідних температурних поправок при інтерпретації даних АК/СК за розробленою нами методикою [Скакальська, Назаревич, 2023] суттєво підвищує надійність прогнозування типу флюїду — заповнювача пор порід. Особливо це важливо для розрізнення нафти і води в породах розрізу свердловини, де різницеві ефекти є достатньо малими.

Гідротермальні ресурси. На Закарпатті, на відміну від Передкарпаття, значних родовищ вуглеводнів на розвіданих свердловинами глибинах (до 3—4 км) не виявлено. Зате Закарпаття є одним з найбільш перспективних регіонів України щодо геотермальних ресурсів. Ресурси термальних підземних вод поширені на значній території регіону, в основному у рівнинних і передгірських районах, що пов'язано, як зазначено вище, з впливом астеноліту з-під Паннонії. На сьогодні в межах Закарпаття пробурено, обладнано та протестовано близько 30 гідротермальних свердловин завглибшки до 1500 м (переважно в Іршавському, Берегівському, Ужгородському,

Хустському та Виноградівському районах), термальні води з яких активно використовують санаторії, водолікарні та оздоровчі заклади. Надалі планується використання унікального потенціалу геотермальних ресурсів Закарпаття для тепло- й електроенергетики, в цьому напрямку започатковано низку проєктів, що перебувають на різних стадіях розробки та реалізації. Підґрунтям для подальшої інтенсифікації використання гідротермальних ресурсів на Закарпатті є наявність встановленої нами під західною та центральною частинами Закарпатського прогину потужної тріщинуватої флюїдонасиченої гідротермальної зони (розмірами близько 90÷120×30÷50) км на глибинах 7—14 км (геофізичні оцінки температури сягають 400—450 °С),

#### Список літератури

- Атлас родовищ нафти і газу України. В 6 томах. Т. IV-V. Західний нафтогазоносний регіон. Київ: УНГА, 1998, 709 с.
- Куровець І.М., Сеньковський І.М., Михайлов В.А. та ін. *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. У 8-ми кн. Кн. II. Західний нафтогазоносний регіон*. Київ: Ніка-Центр, 2014, 400 с.
- Локтєв А.А. Геологічні чинники газоносності Закарпатського прогину: *guc. … канд. геол. наук.* Київ, 2019. 155 с.
- Назаревич А.В. До проблеми підвищення глибинності, чутливості і точності моніторингових та нафтогазопошукових свердловинних геотермічних досліджень. *Геодинаміка.* 2018. № 1(24). С. 60—79. https://doi. org/10.23939/jgd2018.01.060.
- Назаревич А.В., Назаревич Л.Є., Скакальська Л.В., Назаревич Р.А. Геодинаміка та температурний режим кори заходу України і енергоресурси. Матеріали дев'ятої міжнар. наук.-практ. конф. «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування». 7—11 жовтня 2024 р., м. Львів, Україна. Державна комісія України по запасах корисних копалин (ДКЗ). Київ: ДКЗ, 2024, С. 290—295.

пов'язаної численними субвертикальними геодинамічно активними розломами з приповерхневими осадовими товщами на глибинах 1—3 км [Kováčiková et al., 2016; Назаревич та ін., 2024]. Саме пошуки таких перспективних приповерхневих гідротермальних зон, пов'язаних розломами з високоресурсною глибинною гідротермальною зоною, є одним із завдань наших досліджень.

Висновки. Вивчення особливостей температурного режиму кори на заході України у зв'язку з пошуками вуглеводневих та гідротермальних енергоресурсів і надалі є актуальним завданням з огляду на нові виклики і нові дані стосовно цієї проблематики, отримані під час досліджень за останні роки.

- Осадчий В.Г., Крупський Ю.З., Куровець І.М., Грицик І.І., Приходько О.А. Геотермічні умовини Складчастих Карпат і Закарпатського прогину. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2008. № 1(17). С. 16—21.
- Скакальська Л. Оцінки впливу температури на петрофізичні та колекторські характеристики гірських порід. Збірник статей за матеріалами XXXV наукової сесії Наукового товариства імені Шевченка (20 березня 2024 р.). Львів: Растр-7, 2024, С. 45—48.
- Скакальська Л.В., Назаревич А.В. Спосіб прогнозування нафтогазоносності розрізів свердловин. Заявка на патент а 2023 02724 від 05.06.2023 р.
- Сучасна геодинаміка та геофізичні поля Карпат і суміжних територій. Ред. К.Р. Третяк, В.Ю. Максимчук, Р.І. Кутас. Львів: Львівська політехніка, 2015, 420 с.
- Kováčiková, S., Logvinov, I., Nazarevych, A., Nazarevych, L., Pek, J., Tarasov, V., & Kalenda, P. (2016). Seismic activity and deep conductivity structure of the Eastern Carpathians. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60, 280—296. https://doi.org/10.1007/s11200-014-0942-y.

## Features of the temperature regime of the crust's upper horizons in oil-and-gas bearing zones of the west of Ukraine

A.V. Nazarevych<sup>1</sup>, L.V. Skakalska<sup>1</sup>, L.Ye. Nazarevych<sup>2</sup>, 2025

 <sup>1</sup>Carpathian Branch of the S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine
 <sup>2</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Department of Seismicity of the Carpathian Region, Lviv, Ukraine

The paper analyzes the features of the temperature regime of the upper crustal horizons of the oil-and-gas bearing zones of western Ukraine based on the published and archival thermal logging data. It was established that the characteristic temperatures of rock horizons at depths of 1000, 2000, 3000, and 4000 m in the Forecarpathian region are 30±5, 50±10, 70±15, 90±20 °C, respectively. Average vertical temperature gradients here are characterized by values of  $0.022\pm0.01$  °C/m. In the Transcarpathian region, the characteristic temperatures of rock horizons at depths of 1000, 2000, and 3000 m are mostly within 55±10, 100±20, and 145±25 °C, respectively. Average vertical temperature gradients here are characterized 0.05±0.015 °C/m. The difference in deep temperatures between the Transcarpathians and the Forecarpathians is caused by the high deep heat flow in Transcarpathians induced by the influence of asthenolite from under Pannonia, while in Forecarpathians, which is tectonically mainly the southwestern edge of the East European Platform, the thermal regime is significantly calmer, typical for platforms. The findings will be compared with the features of the geodynamic regime of the corresponding zones and also used to establish and take into account temperature corrections to the petrophysical characteristics of the reservoir rocks for predicting the oil and gas capacity of well sections.

**Key words:** western region of Ukraine, temperature regime, upper horizons of the crust, oil-and-gas bearing zones, temperature corrections, predicting the oil and gas content of wells.

#### References

- Atlas of oil and gas deposits of Ukraine. In six volumes. Vol. IV—V. Western oil and gas region. (1998). Kyiv: UNGA, 709 p. (in Ukrainian).
- Kurovets, I.M., Senkovskyi, I.M., Mykhaylov, V.A. et al. (2014). Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine. In the 8th book. Book II. Western oil and gas region. Kyiv: Nika Center, 400 p. (in Ukrainian).
- Loktev, A.A. (2019).Geological factors of the gas capacity of the Transcarpathian depression. *Candidate's thesis*. Kyiv, 155 p. (in Ukrainian).
- Nazarevych, A.V. (2018). To the problem of increasing the depth, sensitivity and accuracy of monitoring and oil and gas prospecting well geothermal research. *Geodynamics*, (1), 60— 79. https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.060 (in Ukrainian).
- Nazarevych, A.V., Nazarevych, L.Ye., Skakal-

II. Lviv, Ukraine (pp. 290—295). Kyiv: SCR (in Ukrainian).
Osadchyi, V.G., Krupskyi, Y.Z., Kurovets, I.M., Hrytsyk, I.I., & Prykhod'ko, O.A. (2008). Geothermal conditions of the Folded Carpathians and the Transcarpathian depression. Scientific

Skakalska, L. (2024). Estimates of the influence of temperature on the petrophysical and reservoir characteristics of rocks. A collection of articles on the materials of the XXXV scientific session of the Shevchenko Scientific Society (March 20, 2024) (pp.45—48). Lviv: Rastr-7 (in Ukrainian).

bulletin of IFNTUOG, (1), 16–21 (in Ukrainian).

ska, L.V., & Nazarevych, R.A. (2024). Geo-

dynamics and temperature regime of the crust

of western Ukraine and energy resources. Materials of the ninth international scientific and

practical conference «Subsoil use in Ukraine.

Prospects for investment». October 7-11, 2024,

Skakalska, L.V., & Nazarevych, A.V. (2023). Method of predicting oil and gas content of wells sections. Patent application a 2023 02724 dated 06/05/2023 (in Ukrainian).

Tretyak, K.R., Maksymchuk, V.Yu., & Kutas, R.I. (Eds.). (2015). Modern geodynamics and geophysical fields of the Carpathians and adjacent territories. Lviv: Lviv Polytechnic Publ., 420 p. (in Ukrainian).

Kováčiková, S., Logvinov, I., Nazarevych, A., Nazarevych, L., Pek, J., Tarasov, V., & Kalenda, P. (2016). Seismic activity and deep conductivity structure of the Eastern Carpathians. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60, 280—296. https://doi.org/10.1007/s11200-014-0942-y.

УДК 550.34+550.83+553.98

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322552

## Сейсмічність, тектоніка і нафтогазоносність земної кори Буковини в зоні профілю РП-5

*А.Є. Назаревич*<sup>1</sup>, П.М. Шеремета<sup>2</sup>, А.В. Назаревич<sup>3</sup>, 2025

<sup>1</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, відділ сейсмічності Карпатського регіону, Львів, Україна <sup>2</sup>Українська нафтогазова академія, Київ, Україна <sup>3</sup>Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Львів, Україна

У статті розглянуто сейсмічність і нафтогазоносність території Буковини у зв'язку з глибинною будовою земної кори. Аналіз останньої проведено за опублікованими і фондовими даними, зокрема у зоні регіонального профілю РП-5, у зонах нафтогазових родовищ і в районі Дністровського гідровузла.

Встановлено помітну сейсмічну активність діагональних розломів карпатського простягання як під Карпатськими насувами, так і в зоні Дністровського гідрокаскаду, а також активність ортогональних розломних структур. Нафтогазоносність території значною мірою пов'язана з субкарпатськими складками автохтону (мезозой) у піднасуві Карпат, це чітко простежується на прикладі Лопушнянського нафтового родовища. Також простежено простягання тут транс'європейської давньої рифтової зони Тейссере—Торнквіста — між розломами Селятинським на південному заході і Передкарпатським на північному сході. Для подальших досліджень становить інтерес смуга інтрузій у фундаменті під форландом Карпат і нахилена на північний схід «контактна» зона ймовірно герцинського віку між структурами Передкарпатського прогину і краю консолідованої Східноєвропейської платформи в зоні південнозахідної окраїни Волино-Поділля.

**Ключові слова:** Буковина, земна кора, глибинна будова, сейсмічність, нафтогазоносність, Лопушняннське нафтове родовище, Дністровський гідровузол.

**Вступ.** Територія Буковини об'єднує східну частину Покутсько-Буковинських Карпат і Передкарпатського прогину. На

цей регіон доволі значно впливають сильні підкорові землетруси зони Вранча (Румунія) [Кендзера та ін., 1997]. Втім поряд з

Citation: Nazarevych, L.Ye., Sheremeta, P.M., & Nazarevych A.V. (2025). Seismicity, tectonics and oil-and-gas bearing of the crust of Bukovyna in the RP-5 profile zone. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 274—280. https://doi. org/10.24028/gj.v47i2.322552.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ними помітно впливають і місцеві землетруси [Кендзера та ін., 1997; Назаревич, Назаревич, 2007]. Тому аналіз місцевої сейсмотектоніки і сейсмічності є важливим з позиції оцінювання сейсмічної небезпеки для регіону. З метою такого аналізу нами досліджено зв'язок місцевої сейсмічності з глибинною будовою земної кори регіону [Шеремета, 1999; Заяць, 2013; Крупський, 2020; Starostenko et al., 2020; Sheremeta et al., 2023 та ін.]. Також досліджено зв'язок між глибинною будовою земної кори Буковини і нафтогазоносністю. Результати цих досліджень наведено нижче.

Об'єкти і методи досліджень. Проведено глибинно-просторовий аналіз місцевої сейсмічності на території Буковини, при цьому для уточнення локалізації вогнищ місцевих землетрусів застосовано розроблені нами раніше підходи і методики [Назаревич, Назаревич, 2007, 2023; Назаревич та ін., 2022 та ін.]. Результати цього аналізу зіставлено з даними щодо глибинної будови кори регіону [Шеремета, 1999; Заяць, 2013; Sheremeta et al., 2023 та ін.]. Також у зіставленні з глибинною будовою проаналізовано особливості вивченої нафтогазоностості регіону [Атлас..., 1998; Крупський, 2020; Sheremeta et al., 2023] i визначено інші потенційно нафтогазоперспективні структури.

Результати. Регіональними профілями [Шеремета, 1999; Заяць, 2013; Starostenko et al., 2020; Sheremeta et al., 2023], зокрема профілем РП-5 (рис. 1, 2), детально досліджено будову земної кори Буковини, зокрема осадових товщ і покривів Складчастих Карпат, Передкарпатського прогину і краю Східноєвропейської платформи, включно з різноглибинними ярусами карпатських насувів і складок та структурами фундаменту під Карпатами на глибинах до 25—30 км, глибші горизонти кори досліджено менш детально.

Глибинна будова кори регіону. Профіль РП-5 пройдено у південно-східній частині Буковини, від гори Чивчин до с. Диновці, на відстані приблизно 15 км уздовж державного кордону з Румунією [Шеремета, 1999; Sheremeta et al., 2023] (рис. 1). Детально простежено структуру карпатських насувів і складок (зокрема багатоярусних) Поркулецької, Чорногірської та Скибової зон Складчастих Карпат (рис. 2). Яруси складок виявлено як у тілі Орівської і Сколівської скиб, скиб Парашки і Зелемянки (глибини 1,5—4 км), так і в зоні підошви карпатських насувів (глибини 4—6 км). За даними досліджень уздовж профілю, а також детальних сейсморозвідувальних робіт на території субрегіону, зокрема у районі Лопушнянського нафтового родовища [Шеремета, 1999; Заяць, 2013; Sheremeta et al., 2023], виявлено східчасте занурення на території Покутсько-Буковинських Карпат краю Східноєвропейської платформи під Карпати (в цілому подібно, як і в інших сегментах Українських Карпат).

Під Карпатськими насувами виявлено слабо дислоковані автохтонні шари порід мезозойського віку [Шеремета, 1999; Sheremeta et al., 2023] і простежено особливості їх залягання. За даними вздовж профілю, а також за даними структурної карти Покутсько-Буковинських Карпат за відбивним горизонтом J (покрівля юри) [Sheremeta et al., 2023] виявлено кілька смуг складок карпатського простягання.



Рис. 1. Простягання профілю РП-5 на карті детального тектонічного районування Українських Карпат (фрагмент) [Шеремета, 1999; Sheremeta et al., 2023] (овалом позначено ділянку профілю, для якої на рис. 2 подано фрагмент розрізу).

Fig. 1. Extension of the profile RP-5 on the map of detailed tectonic zoning of the Ukrainian Carpathians (fragment) [Sheremeta, 1999; Sheremeta et al., 2023] (the oval indicates the segment for which the section is shown in Fig. 2).



До деяких з цих складок, зокрема до Лопушнянської, приурочені відкриті нафтогазові родовища [Атлас..., 1998; Крупський, 2020; Sheremeta et al., 2023].

Виявлено потовщення нижніх горизонтів кори під осьовою частиною Буковинських Складчастих Карпат. Це (як і карпатські насуви та складки в автохтоні) ми пов'язуємо з особливостями геомеханічного режиму стиску кори регіону в альпійський і постальпійський час [Sheremeta et al., 2023]. У передкарпатській частині території Буковини (за даними профілю РП-5) і Покуття (за даними профілю РП-4) простежуються дві заглиблені давні «сейсмофокальні» зони різного віку утворення та різної вергентності (детально досліджені С.Г. Слоницькою за спеціальними методиками), а також апофізоподібні інтрузії [Шеремета, 1999; Sheremeta et al., 2023]. У північно-східній частині регіону (близькій до долини р. Дністра) будова земної кори загалом є характерною для краю Східноєвропейської платформи [Шеремета, 1999; Заяць, 2013; Sheremeta et al., 2023].

Сейсмічність Покутсько-Буковинських Карпат. Сейсмічність субрегіону є відносно невеликою і доволі спорадичною [Кендзера та ін., 1997; Назаревич, Назаревич, 2007], що ми пов'язуємо з певною віддаленістю від основних зон дії сучасних сейсмотектонічних процесів (Паннонського сейсмоактивного кільця, зони контакту терейнів Алькапа і Тисія-Дакія на сході і північному сході Угорщини — північному заході Румунії, сейсмогенної зони Вранча на сході Румунії). Простежено сейсмічну активність зон субкарпатських розломів як під насувами Карпат — на глибинах 20—30 км ([Назаревич, Назаревич, 2007] і сейсмічність за 2000—2022 рр., див. рис. 2), так і в структурах фундаменту Передкарпатського прогину і краю платформи (аж до зони долини р. Дністер) на глибинах 2—15 км [Кендзера та ін., 1997; Назаревич, Назаревич, 2007; Назаревич та ін., 2022]. Крім того, у субрегіоні простежується певна активність ортогональних розломних структур, зони підошви карпатських насувів (на глибинах 3—10 км) і поверхонь окремих насувів, цих останніх особливо у південно-західній частині профілю, яка прилягає до державного кордону з Румунією і до Мармароського кристалічного масиву на глибинах 3—5 км (див. рис. 2). Таку сейсмічну активність ми пов'язуємо з альпійською/карпатською складовою (стиск у напрямку на північний схід) і терейновою складовою (трансляція тиску від зміщення на схід північно-східної частини терейну Алькапа — структур кори Закарпатського прогину) сучасного регіонального геодинамічного процесу [Назаревич, Назаревич, 2023]. Також певним внеском у місцеву сейсмічну активність може бути трансляція впливу тангенціального зміщення на схід-південний схід південно-східного краю Західноєвропейської платформи (Рава-Руської зони) уздовж структур зони Тейссейре-Торнквіста (зафіксованої на профілі РП-5 між Селятинським (C)<sup>1</sup> і Передкарпатським (Пр) розломами [Sheremeta et al., 2023]), на що вказує зазначена вище глибинна сейсмічна активність цих розломів (див. рис. 2). Ці самі особливості геомеханічного режиму кори регіону засвідчує також поширення 3-бальної ізосейсти найсильнішого з відомих на Передкарпатті (з М=5,4) землетрусу 1875 р. у Великих Мостах (біля державного кордону з Польщею) на відстань більш як 250 км, аж до Чернівців (майже до державного кордону з Румунією).

Сейсмічність району Дністровського гідровузла. На загальному фоні невеликої місцевої сейсмічності регіону [Кендзера та ін., 1997; Назаревич, Назаревич, 2007] в останні роки підвищеною кількістю слабих землетрусів помітно виділяється район Дністровського гідровузла [Назаревич та ін., 2022]. Така сейсмічна активізація, за нашими даними та результатами досліджень інших авторів (І. Савчин, Р. Пронишин), найімовірніше є індукованою і пов'язана з впливом навантажень (зокрема змінних у часі, включно з циклічними), відповідних

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Скорочені назви розломів на розрізі вздовж профілю РП-5 (див. рис. 2).

порід і зон тектонічних порушень у зоні впливу водосховищ гідровузла при його роботі. Це все потребує детального моніторингу сейсмічності даного району.

Нафтогазоносність. Щодо нафтогазоносності території Буковини зазначимо таке. Планомірні сейсмічні, зокрема нафтогазопошукові, дослідження в Покутсько-Буковинських Карпатах проводяться з 1969 р. За цей час тут відкрито кілька нафтогазових родовищ [Атлас..., 1998; Sheremeta et al., 2023], що розміщуються у південно-східній частині Бориславсько-Покутської зони Передкарпатського прогину і у складках насувів та у піднасуві Карпат — Яблунівське, Пилипівське, Дебеславецьке, Гуцулівське, Косівське, Ковалівське, Чорногузьке, Славецьке, Шереметівське, Лопушнянське. Значна частина виявлених покладів вуглеводнів (наприклад, поклади Лопушнянського нафтового родовища) розміщується у складках мезозойських порід у піднасуві Карпат, тому на нашу думку, перспективними в цьому сенсі можуть бути й інші складки мезозойських порід піднасуву, особливо підняті і обмежені ортогональними розломами окремі ділянки цих складок, зокрема Федьковицька і Путильська структури [Sheremeta et al., 2023]. Цікавими і перспективними можуть виявитись і структури в зоні крил апофізоподібних інтрузій у смузі Передкарпатського розлому і складки нижніх ярусів у тілі карпатських насувів.

Висновки. Підсумовуючи, зазначимо велику цінність даних, отриманих у результаті регіональних геофізичних досліджень, зокрема вздовж профілю РП-5, для вивчення глибинної будови, геодинаміки, сейсмотектоніки і нафтогазоносності території Буковини і всього Карпатського регіону.

#### Список літератури

- Атлас родовищ нафти і газу України. В шести томах. Т. IV—V. Західний нафтогазоносний регіон. Київ: УНГА, 1998, 709 с.
- Заяць Х.Б. Глибинна будова надр Західного регіону України на основі сейсмічних досліджень і напрямки пошукових робіт на нафту та газ. Львів: Центр Європи, 2013, 136 с.
- Кендзера О., Пронишин Р., Бень Я. Сейсмічна небезпека Передкарпаття. *Праці Наукового товариства імені Шевченка*. Т. 1. Львів, 1997, С. 104—113.
- Крупський Ю.З. Геологія і нафтогазоносність Західного регіону України. Львів: Сполом, 2020, 256 с.
- Назаревич А., Назаревич Л. Геодинаміка Карпатського регіону України і її відображення у сейсмічності та структурі рельєфу. В кн.: *Геофізика і геодинаміка: прогнозування та моніторинг геологічного середовища.* Львів: Растр-7, 2023, С. 144—147.
- Назаревич Л.С., Назаревич А.В. Характерні риси сейсмотектонічного процесу в літосфері Буковини та прилеглих територій. *Геодинаміка.* 2007. № 1(6). С. 49—54.

Назаревич Л.С., Назаревич А.В., Келеман I.М.

Сейсмічність району Дністровського гідровузла як чинник техногенних загроз. І Міжнародна наук.-практ.конф. «Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій — 2022» 26 — 27 травня 2022 р., Полтава — Львів, С. 431—434.

- Шеремета П.М. Сейсмогеологічний профіль РП-5 5393 по лінії: м. Бреаза (Румунія) г. Циблешу — г. Плак — м. Вишеул-де-Сус — г. Чивчин — г. Буракова — м. Путила г. Осередок — с. Долішній Шепіт — перевал Мочерна — с. Гільче — с. Диновці. ДГП «Укргеофізика», ЗУГРЕ, 1999.
- Sheremeta, P.M., Nazarevych, A.V., & Nazarevych, L.Ye. (2023). Earth crust of eastern segment of Ukrainian Carpathians in the regional profile RP-5 zone: structure, geodynamics, oil and gas bearing. *Geodynamics*, 2(35), 106–128. https://doi.org/10.23939/jgd2023.02.106.
- Starostenko, V., Janik, T., Mocanu, V. et al. (2020). RomUkrSeis: Seismic model of the crust and upper mantle across the Eastern Carpathians — From the Apuseni Mountains to the Ukrainian Shield. *Tectonophysics*, 794. 228620. https://doi. org/10.1016/j.tecto.2020.22862.

## Seismicity, tectonics and oil-and-gas bearing of the crust of Bukovyna in the RP-5 profile zone

L.Ye. Nazarevych<sup>1</sup>, P.M. Sheremeta<sup>2</sup>, A.V. Nazarevych<sup>3</sup>, 2025

<sup>1</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Department of Seismicity of the Carpathian Region, Lviv, Ukraine <sup>2</sup>Ukrainian Oil and Gas Academy, Kyiv, Ukraine <sup>3</sup>Carpathian Branch of the S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

The work analyzes the seismicity and oil and gas potential of Bukovyna in connection with the crust's deep structure. The crust's deep structure was analysed using published and archival data. These included data on the regional profile RP-5, data in the areas of oil and gas fields and in the area of the Dniester hydroelectric complex. Noticeable seismic activity of the diagonal faults of the Carpathian extension was established both under the Carpathian thrusts and in the area of the Dniester hydrocascade. Orthogonal fault structures were also found to be active. The oil and gas potential of the territory is largely associated with the Subcarpathian folds of the autochthon (Mesozoic) in the subthrust of the Carpathians, this is clearly seen in the example of the Lopushna oil field. The extension of the Trans-European ancient rift Teisseire-Tornquist Zone has also been traced here between the Selyatyn faults in the southwest and the Forecarpathian faults in the northeast. Also of interest are the band of intrusions in the basement under the foreland of the Carpathians and the northeast-dipping «contact» zone of probably Hercynian age between the structures of the Forecarpathian Trough and the edge of the consolidated East European platform in the southwestern outskirts of Volyn-Podillia.

**Key words:** Bukovyna, Earth's crust, deep structure, seismicity, oil and gas potential, Lopushna oil field, Dniester hydroelectric complex.

#### References

- Atlas of oil and gas deposits of Ukraine. In 6 volumes. Vol. IV—V. Western oil and gas region. (1998). Kyiv: UNGA, 709 p. (in Ukrainian).
- Zayats, H.B. (2013). The depth structure of the subsoil of the Western region of Ukraine based on seismic studies and the direction of exploration for oil and gas. Lviv: LB UkrSGEI, 136 p. (in Ukrainian).
- Kendzera, O., Pronyshyn, R., & Ben', Ya. (1997). Seismic hazard of the Precarpathians. In Proceedings of the Shevchenko Scientific Society (Vol. 1, pp. 104—113). Lviv (in Ukrainian).
- Krupskyy, Yu.Z. (2020). *Geology and oil and gas potential of the Western region of Ukraine*. Lviv: Spolom, 256 p. (in Ukrainian).
- Nazarevych, A., & Nazarevych, L. (2023). Geodynamics of the Carpathian Region of Ukraine and its Reflection in Seismicity and Relief Structure. In *Geophysics and Geodynamics:*

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

prediction and monitoring of geological medium (pp. 144—147). Lviv: Rastr-7 (in Ukrainian).

- Nazarevych, L.Ye., & Nazarevych, A.V. (2007). Features of seismotectonic process in lithosphere of Bukovyna and adjoining territories. *Geodynamics*, 1(6), 49—54 (in Ukrainian).
- Nazarevych, L.Ye., Nazarevych, A.V., & Keleman, I.M. (2022). Seismicity of the Dniester Hydroelectric Power Plant Area as a Factor of Technogenic Threats. I International Scientific and Practical Conference «Overcoming Environmental Risks and Threats to the Environment in Emergency Situations — 2022», May 26—27, 2022, Poltava — Lviv (pp. 431—434) (in Ukrainian).
- Sheremeta, P.M. (1999). Seismogeological profile RP-5 5393 along the line: c. Breaza (Romania)
  m. Cyblesu — m. Plak — c. Vysheul-de-Sus
  m. Chyvchyn — m. Burakova — c. Putyla m. Oseredok — v. Dolishniy Shepit — p. Mo-

cherna — v. Gilche — v. Dynovtsi. SGE «Ukrgeofizyka», WUGEE (in Ukrainian).

Sheremeta, P.M., Nazarevych, A.V., & Nazarevych, L.Ye. (2023). Earth crust of eastern segment of Ukrainian Carpathians in the regional profile RP-5 zone: structure, geodynamics, oil and gas bearing. *Geodynamics*, 2(35), 106—

128. https://doi.org/10.23939/jgd2023.02.106.

Starostenko, V., Janik, T., Mocanu, V. et al. (2020). RomUkrSeis: Seismic model of the crust and upper mantle across the Eastern Carpathians — From the Apuseni Mountains to the Ukrainian Shield. *Tectonophysics*, 794. 228620. https://doi. org/10.1016/j.tecto.2020.22862.

УДК 548.4:549:550:553.3/.9:551.1

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322553

## Термобарогеохімічна модель еволюції глибинних флюїдів у літосфері Землі

#### I.M. Наумко, 2025

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна

Створено термобарогеохімічну модель еволюції глибинних флюїдів у літосфері (тектоносфері) Землі, основні постулати якої обґрунтовано даними термобарогеохімії — фундаментальної науки про включення флюїдів у мінералах як природно збережені релікти флюїдного мінералорудонафтидоутворювального середовища, визначальність яких випливає з беззаперечного факту їхньої оклюзії мікровключеннями у кристалах та збереженості від часу захоплення донині. Аналіз отриманих результатів засвідчив реальну можливість використання включень для оцінювання флюїдонасиченості надр та прогнозування рудоносності і вуглеводненасиченості перспективних структур. Доповнення оригінальними даними еволюційної моделі наявних геолого-геофізичних і мінералого-геохімічних моделей складе підґрунтя термобарогеохімічної моделі Землі.

Ключові слова: флюїд, включення, мінерал, термобарогеохімія, модель, літосфера.

Вступ. Сучасні геолого-геофізичні і мінералого-геохімічні моделі Землі всебічно характеризують загальні закономірності будови земної кори і верхньої мантії як у планетарному, так і регіональному масштабах. У новітніх моделях планети, однак, ще неповною мірою враховано вплив процесів мінералорудонафтидогенезу в глибинних геосферах, перебіг яких не може бути однозначно з'ясований без вивчення включень флюїдів у мінералах як предмету досліджень термобарогеохімії — нової всесвітньо відомої галузі геологічних знань [Ермаков, Долгов, 1979; Калюжный, 1982; Roedder, 1984]. Це й зумовило потребу аналізу даних колосальної бази знань про типоморфні особливості флюїдних включень у мінералах, відтворення за якими геохімічних і термобаричних параметрів флюїдних мінералорудонафтидоутворювальних середовищ — потоків дало змогу створити термобарогеохімічну модель еволюції глибинних флюїдів у літосфері (тектоносфері) Землі у рамках єдиного геолого-геохімічного процесу тектономагмоседиментометаморфорудонафтоутворення (за І.І. Чебаненком).

Фактичний матеріал. Авторські і літературні матеріали дослідження флюїдних включень у мінералах розмаїтого похо-

Citation: Naumko, I.M. (2025). Thermobarogeochemical model of deep fluid's evolution in the Earth's lithosphere. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 280—284. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322553.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

дження в геологічних утвореннях як України, так і в межах колишнього Радянського Союзу, а також у світовому масштабі.

**Методологія досліджень.** Комплекс кристалогенних і методичних засобів термобарогеохімії як учення про мінералоутворювальні середовища (флюїди).

Результати досліджень та їх обговорення. Створено термобарогеохімічну модель глибинного мінералорудонафтидогенезу — модель еволюції глибинних флюїдів (за включеннями у мінералах) [Наумко, 2006, 2020] і показано шляхи її вдосконалення у фундаментальному плані [Наумко та ін., 2020; Матковський та ін., 2021 та ін.] як підґрунтя термобарогеохімічної моделі Землі. Це обґрунтовано узагальненням та аналізом авторських і літературних даних, отриманих на засадах типоморфізму флюїдних включень у мінералах [Павлишин та ін., 2021].

Глибинні парагенезиси. Типоморфною ознакою включень флюїдів у мінералах мантійного (субмантійного) походження є діоксид вуглецю і вуглеводні (метан, його гомологи, метаново-нафтові суміші тощо) [Наумко, 2006, 2020]. За обгрунтуванням джерел первинних сполук ядра (гідриди, карбіди, ціаніди, оксиди чи силікати) перевагу надаємо [Наумко, 2015] енергоємній гідридно-карбідній моделі М.П. Семененка, за якою зароджені у зовнішньому ядрі при розпаді гідридів і карбідів металів первинні H<sub>2</sub>, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, NH<sub>3</sub>-флюїди пронизують мантію, окиснюючись і розчиняючись. Власне водень з винятковою дифузійною здатністю і високою теплоємністю забезпечує механізм її «пропалювання», виділення потужної енергії, контроль у складі С-Н-фацій скупчень вуглеводнів. За відношеннями Н2/Н2О і СО/СО2 у двох групах включень мантійної приро- $H_2O-N_2-CO-CH_4-C_2H_2-C_2H_6-C_3H_8$ ди: i CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-CO-CH<sub>4</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>-C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> y діамантах визначають різницю мантійних і корових флюїдів. У шкурках загартування толеїтових базальтів серединноокеанічних хребтів СО2 субмантійних джерел (з  $\delta^{13}C = -6, 1 \pm 0, 5 \%$ ) і вода переважають над N<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>. У первинних включеннях у піроксені і олівіні лужних базальтоїдів тектонічно активних поясів також домінує СО<sub>2</sub> глибинної генези. Водночас виявлення впливу флюїдів, збагачених вуглеводнями (за включеннями у мінералах діамантовмісних асоціацій), на



ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

низи літосфери за умов термодинамічної стабільності діаманту показує, що С-О-Нфлюїд чи складніший, який містить розчинені лужні або лужноземельні карбонати, виконуватиме роль і джерела вуглеводнів, і збагаченого ними середовища кристалізації глибинних парагенезисів.

Пегматогенні парагенезиси. Типоморфними для гранітних пегматитів у породах різного складу є багатофазові включення з мінералами-в'язнями, головно хлоридами і фторидами, і, отже, висока загальна концентрація флюїдів у зоні мінералогенезу, що досягала 58—60 % (за масою) [Наумко, 2006]. Зміна типів флюїдних включень з переходом від магматогенного до пегматогенного класів дала змогу визначити межі магматичних, ультраметаморфічних і постмагматичних формувань та своєрідність відповідних флюїдних систем. Існування магматичного етапу пегматитів Українського щита (УЩ) підтверджується наявністю розплавних включень у кварці з графічної зони, що гомогенізуються за температури 750—660 °С — безтопазові і 660—620 °C — топазоносні пегматити. Кислотність-лужність флюїдів визначалася співвідношеннями CO<sub>2</sub>, фтору і лугів, що особливо відображають включення у топазі і берилі — надійних типоморфних мінералах. Виміряні значення температури засвідчують її зниження від 600 до 180—200 °С і тиску — від 30—40 до 23— 25 МПа. Тиск флюїду досягає 470 МПа у флюїдних включеннях за температури їх захоплення і 490 МПа у розплавних включеннях за температури солідуса; нижні межі — 20—30 МПа, аж до 23—25 МПа. Ці значення відповідають геологічним даним і добре збігаються з виділеними РТ-зонами кристалізації пегматитів різних формацій, зокрема камерних пегматитів УЩ з п'єзокварцом, топазом, берилом.

Рудогенні парагенезиси. Для метаморфогенно-гідротермальних і гідротермально-метасоматичних родовищ типоморфними є складні багатофазові включення з видимою фазою рідкого діоксиду вуглецю і, природно, перевагою CO<sub>2</sub> серед летких компонентів продуктивних парагенезисів.

Закономірну періодичність агрегатного стану і фазового складу, термобаричних і геохімічних параметрів, ізотопних характеристик флюїдів визначено для рідкіснометалевих і золоторудних та флюоритових проявів УЩ, золото-поліметалевих і ртутних родовищ Донбасу і Закарпаття [Наумко, 2006; Матковський та ін., 2021]. Водночас значну роль вуглеводнів, насамперед СН<sub>4</sub>, виявлено для родовищ золота серед метаморфічних товщ типу чорносланцевих (Мурунтау), родовищ і рудопроявів Рахівського району Закарпаття, а також Чукотки і Магаданської області. Родовища клинцівського типу формувалися в умовах лужного метасоматозу з гідрокарбонатних калій-натрієвих розчинів: Клинцівське — за температури 450—430—150—90 °С, тиску 140—90 МПа, концентрації 1,0—5,0 і до 10 % (за масою, NaCl-екв.), Петроострівське — 470—280 °С, 180—160 МПа, 17,0—7,1 % (рідкіснометалева мінералізація), 350—230 °С, 150—115 МПа, 7,6—2,6 % (халькофільна — з золотом). Золотопроявами супроводжувалася сульфідна мінералізація кварцово-жильних утворень пізньопротерозойської зони тектономагматичної активізації в УЩ. Асоціативну диференціацію різних сполук вуглецю, зокрема кореляцію ртутного зруденіння з нафтогазовими проявами, простежено на Закарпатті. Рудні парагенезиси родовищ Донбасу формувалися за еволюції флюїдів від високотемпературних водно-діоксидвуглецевих, які просторово відокремлені від зон прояву метано-(вуглеводне)-водних флюїдів Північної зони дрібної складчастості, до низькотемпературних водних.

Вуглеводневмісні парагенезиси. Типоморфними для жильної, прожилкової і прожилково-вкрапленої мінералізації гідротермально-метасоматичного і катагенного походження в осадових шарах нафтогазоносних областей і газовугільних басейнів, сформованої в температурному інтервалі в області 200 °С що відповідає оптимальним умовам збереженості вуглеводневих сполук нафти і газу в осадовій оболонці земної кори, незалежно від їхнього походження, є включення вуглеводнів

й, відповідно, метанова (вуглеводнева) спеціалізація палеофлюїдів та відновна спрямованість процесів. З'ясовано подібність й успадкованість складу флюїдних включень у прожилково-вкрапленій мінералізації як природному феномену літосфери Землі та одному із визначальних показників процесів і механізмів флюїдоперенесення вуглеводневої та мінеральної речовини і продукту заліковування міграційних тріщин [Наумко, 2006] і летких сполук у природних газах і газів, розчинених у пластових водах родовищ. Локально в околі покладів вуглеводнів виявлено термобаричні і геохімічні ореоли та характерну вертикальну і латеральну зональність, визначено послідовну зміну параметрів мігрувального вуглеводневмісного флюїду, як приклад, на південно-західному схилі Українських Карпат — від метано-водного до нафтово-метано-водного і від 210—225 °С і 80—100 МПа до 230—240 °С і 300 МПа та у межах Львівського прогину — від 250—200 до 110—60 °С і від 30—40 до 12—7 МПа.

У фундаментальному плані отримані результати чітко фіксують прояв потужних дефлюїдизаційних процесів у межах глибинних геосфер Землі з інтенсифікацією у земній корі. Залежно від співвідношення окиснених і відновлених сполук виділено діоксидвуглецево-водну і вуглеводне-(метано-)-водну гілки глибинної дегазації, якими й визначається геохімічна спеці-

#### алізація мінералоутворювальних флюїдів щодо рудо- чи нафтидогенезу та зв'язаність з ними рудопроявів поліметалів і золота, з одного боку, та деяких генетичних типів золоторудної мінералізації і скупчень вуглеводнів — з іншого. У рамках еволюційної моделі стверджено, що лише такі сполуки, як CO2 і H2O, можуть бути донаторами хімічних елементів Н і С для синтезу вуглеводнів. Вони разом з коровими складовими в умовах глибинного високотермобаричного абіогенного флюїду розкладалися на атомарні Карбон, Гідроген і С<sub>n</sub>H<sub>m</sub>радикали, які за хімічної взаємодії синтезували вуглеводні абіогенно-біогенного походження (газ, нафта, бітуми тощо) [Наумко, 2006, 2020], що заповнювали пастки з формуванням покладів нафти і газу.

Висновки. За матеріалами аналізу даних колосальної бази знань про геохімічні і термобаричні параметри флюїдних мінералорудонафтидоутворювальних середовищ-потоків створено термобарогеохімічну модель еволюції глибинних флюїдів у літосфері (тектоносфері) Землі, засадничі постулати якої доповнюють наявні геолого-геофізичні і мінералогогеохімічні моделі планети. Це у комплексі утворить підґрунтя для розробки термобарогеохімічної моделі Землі у розвиток геохімічної киснево-водневої (гідриднокарбідної) (М.П. Семененко) і мінералогічної (Є.К. Лазаренко) моделей Землі.

#### Список літератури

- Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. *Термобарогеохи*мия. Москва: Недра, 1979, 271 с.
- Калюжный В.А. Основы учения о минералообразующих флюидах. Киев: Наук. думка, 1982, 240 с.
- Матковський О., Наумко І., Павлунь М., Сливко Є. *Термобарогеохімія в Україні*. Львів: Простір-М, 2021, 282 с.
- Наумко І.М. Глибинні флюїди Землі (за киснево-водневою моделлю М. П. Семененка). Геохронологія та рудоносність докембрію та фанерозою (до 110 річниці від дня народження академіка АН УРСР Семе-

ненка Миколи Пантелеймоновича): збірник тез gonoвigeй наукової конференції з міжнародною участю (Київ, 17—18 листопада 2015 р.). Київ, 2015, С. 20—21.

- Наумко І.М. Мінералофлюїдологія та синтез і генезис природних вуглеводнів у надрах Землі. *Геофиз. журн.* 2020. Т. 42. № 4. С. 72—96. https:// doi.org/10.24028/gzf.0203-3100.v.42i4.2020.210673.
- Наумко І.М. Флюїдний режим мінералогенезу породно-рудних комплексів України (за включеннями у мінералах типових парагенезисів): *автореф. guc. … g-ра геол. наук.* Львів, 2006, 52 с.

Наумко I., Павлюк М., Побережський А. Геохімія і термобарометрія мінералоутворювальних флюїдів та термобарогеохімія евапоритів — всесвітньо відомі наукові школи. *Геологія і геохімія горючих копалин.* 2020. № 1(182). С. 62—75. Павлишин В.І., Матковський О.І., Довгий С.О. *Генезис мінералів*. Київ, 2021, 676 с.

Roedder, E. (1984). *Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy*. Virginia: Mineralogical Society of America. Vol. 12, 644 p.

# Thermobarogeochemical model of deep fluid's evolution in the Earth's lithosphere

#### I.M. Naumko, 2025

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

A thermobarogeochemical model of the evolution of deep fluids in the Earth's lithosphere (tectonosphere) was created, the main postulates of which is substantiated by the data of thermobarogeochemistry — the fundamental science on fluid inclusions as naturally preserved relics of the fluid mineral ore-oil-forming environment, the determinacy of which follows from the undeniable fact of their occlusion by microinclusions in crystals and preservation from the time of capture to the present. Analysis showed the real possibility of using inclusions to assess the fluid saturation of the subsoil and predict the ore-bearing and hydrocarbon saturation of promising structures. Supplementing the existing geological-geophysical and mineralogical-geochemical models with original data of the evolutionary model will form the basis of the Earth's thermobarogeochemical model. **Key words**: fluid, inclusion, mineral, thermobarogeochemistry, model, lithosphere.

#### References

- Ermakov, N.P., & Dolgov, Yu.A. (1979). *Thermobarogeochemistry*. Moscow: Nedra, 271 p. (in Russian).
- Kalyuzhnyi, V.A. (1982). *Principles of the knowledge on mineral-forming fluids*. Kiev: Naukova Dumka, 240 p. (in Russian).
- Matkovskyi, O., Naumko, I., Pavlun, M., & Slyvko. Ye. (2021). *Thermobarogeochemistry in Ukraine*. Lviv: Prostir-M, 282 p. (in Ukrainian).
- Naumko, I.M. (2015). Deep fluids of the Earth (according to the M.P. Semenenko oxygenhydrogen model). Geochronology and orebearing capacity of the Precambrian and Phanerozoic (to the 110th anniversary of the birth of Academician of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR Mykola Panteleimonovych Semenenko): collection of abstracts of a scientific conference with international participation, Kyiv, 17—18 November 2015 (pp. 20—21) (in Ukrainian).

Naumko, I.M. (2020). Mineralofluidology and syn-

thesis and genesis of natural hydrocarbons in the Earth's interior. *Geophysical Journal*, 42(4), 72—96. https://doi.org/10.24028/gzf.0203-3100. v.42i4.2020.210673 (in Ukrainian).

- Naumko, I.M. (2006). Fluid regime of mineral genesis of the rock-ore complexes of Ukraine (based on inclusions in minerals of typical parageneses). *Candidate's thesis*. Lviv, 52 p. (in Ukrainian).
- Naumko, I., Pavlyuk, M., & Poberezhskyi, A. (2020). Geochemistry and thermobarometry of mineral-forming fluids and thermobarogeochemistry of evaporites — world-renowned scientific schools. *Geology and Geochemistry* of Combustible Minerals, (1), 62—75 (in Ukrainian).
- Pavlyshyn, V.I., Matkovskyi, O.I., & Dovhyi, S.O. (2021). Genesis of minerals. Kyiv, 676 p. (in Ukrainian).
- Roedder, E. (1984). *Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy*. Virginia: Mineralogical Society of America, Vol. 12, 644 p.
УДК 550.3

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322560

# Магнітометричний метод виявлення вибухонебезпечних предметів: можливості та перспективи

М.І. Орлюк<sup>1</sup>, С.М. Кузнєцов<sup>2</sup>, А.О. Роменець<sup>1</sup>, А.В. Марченко<sup>1</sup>, І.М. Орлюк<sup>1</sup>, 2025

<sup>1</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна <sup>2</sup>Державне підприємство «Науково-дослідний центр проблем надрокористування "ГЕОРЕСУРС" »

Одним із сучасних методів картографування територій, у тому числі забруднених вибухонебезпечними предметами (ВНП), є метод дистанційного магнітного знімання з використанням безпілотного літального апарата (БПЛА). Метод заснований на використанні сучасних магнітометрів і градієнтометрів, зокрема LEMI-026, які в поєднанні з БПЛА реєструють складові магнітного поля, що за результатами експериментальних досліджень на полігонах дає можливість ідентифікувати скупчення різноманітних металевих залишків, у тому числі вибухонебезпечних предметів.

**Ключові слова:** магнітометр, LEMI-026, магнітне знімання, магнітні аномалії, ВНП, БПЛА.

Вступ. Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України має багатий досвід магнітного картування та інтерпретації геомагнітних аномалій для вирішення фундаментальних і прикладних завдань геофізики. Зокрема, для території України розроблено карту модуля індукції геомагнітного поля та технологію розрахунку його силових і кутових компонент, включно з цифровою картою магнітного схилення D, яка передана і використовується нині топографічною службою ЗСУ [Орлюк и др., 2015; Orlyuk et al., 2024]. Іншим вагомим здобутком є побудова великомасштабних магнітних моделей структур родовищ корисних копалин і картування трипільських й скіфських археологічних об'єктів за результатами інтерпретації аеро- та наземних детальних і мікромагнітних знімань [Орлюк и др., 2016]. Методика комплексних магнітометричних досліджень археологічних об'єктів може бути взята за основу при розробці технології виявлення вибухонебезпечних предметів (ВНП) з використанням безпілотного літального апарату (БПЛА).

Магнітні аномалії є суперпозицією природних і техногенних джерел. Природні магнітні аномалії відображаються на розроблених картах модуля індукції геомагнітного поля та його аномалій. Техногенні магнітні аномалії наявні в сумарному магнітному полі і можуть бути виявлені методами фільтрації модульних значень індукції геомагнітного поля, або його вертикального та горизонтального градієнтів, отриманих за результатами сучасних високоточних магнітних знімань.

Попередній аналіз і розрахунки показали, що в районах бойових дій техногенна компонента магнітного поля (з інтенсивністю окремих аномалій 10—500 нТл і більше) співставна, або суттєво переважає за інтенсивністю природні аномалії, за рахунок насичення верхньої частини розрізу земної кори різного роду металобрухтом

Citation: Orlyuk, M., Kuznetsov, S., Romenets, A., Marchenko, A., & Orliuk, I. (2025). Magnetometric detection of explosive objects: opportunities and prospects. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 285—289. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322560.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

(зокрема ВНП). Одним з найефективніших і економних методів виявлення площ, забруднених боєприпасами, які не вибухнули, є метод дистанційного магнітного знімання з використанням БПЛА. Метод ґрунтується на підставі застосування сучасних магнітометрів і градієнтометрів, які кріпляться на БПЛА та вимірюють аномалії магнітного поля, що дає можливість ідентифікувати бомби, міни, боєприпаси та скупчення різноманітних металевих залишків [Пристай, Ладанівський, 2017]. Вимірювальний комплекс оснащується навігаційною системою з точною геоприв'язкою. На цей час існує декілька іноземних ваpiaнтiв такого комплексу (MagDrone R3 (компанія SENSYS GmbH, Німеччина), DRONEmag (компанія GEM Systems, Kaнада), MagNIMBUS (SPH) та ін. [Nikulin et al., 2020; Kolster et al., 2022]. Інститутом геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України спільно з Львівським центром Інституту космічних досліджень НАНУ-ДКАУ, ДП «ГЕОРЕСУРС» та компанією «Агросем» випробувано аналогічний комплекс з використанням магнітометра українського виробництва LEMI-026 та мультикоптера DJI Matrice 300 RTK з бортовим комп'ютером SkyHub і системою GNSS.

За результатами пілотних досліджень на військових та експериментальних полігонах показано, що практично застосування всіх комплексів дає можливість виявляти ВНП та їхні залишки (у складі яких є залізо) на висотах до 1,5—2,0 м. Це узгоджується з теоретичними розрахунками стосовно затухання поля від магнітних ВНП.

Для виявлення можливого впливу БПЛА на покази магнітометра було виконано експериментальні роботи під час зависання апарата над приладом на різних висотах.

На відстані БПЛА 1 м магнітометр реєструє «аномалію—заваду» інтенсивністю 6 нТл, на відстані 2 м — 2 нТл і на відстані



Рис. 1. Проліт і зависання БПЛА над магнітометром на висоті 3 м (500—1000 за шкалою *x*), 2 м (1200—1500) та 1 м (1800—2100).

Fig. 1. Flight and hovering of the drone over the magnetometer at a height of 3 m (500—1000 on the *x* scale), 2 m (1200—1500) and 1 m (1800—2100).



Рис. 2. Магнітне поле вздовж профілю з мінами та боєприпасами (червона крива) та без них (синя крива). Fig. 2. Magnetic field along a profile with mines and ammunition (red curve) and without them (blue curve).



Рис. 3. Аномалії модуля індукції  $B_a$  на експериментальній ділянці площею 10×25 м. Fig. 3. Anomalies of the  $B_a$  induction module on the experimental site 10×25 m.



Рис. 4. Аномалії модуля індукції  $B_a$  на військовому полігоні.

Fig. 4. Anomalies of the  $B_{\rm a}$  induction module at the military training ground.

3 м — близько 0,5—1 нТл (рис. 1). Згідно з наведеним, датчик магнітометра має розташовуватися на віддалі мінімум 3 м від дрона.

На рис. 2 наведено результати експериментальних досліджень стосовно замірів індукції геомагнітного поля *В* на висоті 1 м над ВНП, виявленими вздовж профілю завдовжки 50 м з кроком замірів 1 м. На цьому самому рисунку наведено індукцію *В* без мін і боєприпасів.

Як можна бачити з рис. 2, всі міни та боєприпаси, що містять залізні елементи, добре виявляються в магнітному полі аномаліями з інтенсивністю 20—50 нТл.

Для оцінювання прояву та можливості ідентифікації ВНП проведено експериментальні дослідження на військовому полігоні. Насамперед виконано магнітне знімання на «чистій» ділянці, на якій в подальшому було розміщено низку мін різних типів. Висота знімання — 1 м. Відстань між профілями — 1 м, крок уздовж профілю — 1 м. Згідно з результатами знімання на ділянці розміром  $10 \times 50$  м модуль індукції геомагнітного поля змінюється в межах *B*=50096÷50134 нТл, а виділені шляхом фільтрації методом осереднення аномалії модуля індукції *B*<sub>a</sub> змінюються в межах від –14 до 22 нТл.

На цій ділянці було розміщено різноманітні міни (рис. 3) в межах 10×25 м її площі та виконано магнітне знімання за тією самою мережею спостережень. Як можна бачити з рисунку, аномалії модуля індукції  $B_a$  змінюються в межах від –20 до 110 нТл, а їх максимумами чітко ідентифікуються міни, крім пластикових.

Результати знімання на військовому полігоні магнітометром LEMI-026 ілюструє рис. 4.

За результатами магнітометричного знімання з БПЛА за керування в ручному режимі було ідентифіковано 6 із 9 ВНП, які розташовані в межах ділянки. Один із них (14) може бути пластиковою ТМ.

Зауважимо, що виконані дослідження засвідчують можливість виявлення незначних за розмірами ВНП на глибині до 1,0 м. Якщо датчик розміщений на висоті 0,5 м, а заміряна аномалія відповідає аномалії на висоті 1,5 м, то можна прогнозувати пошуковий об'єкт на глибині 1 м. Згідно з розрахунками, починаючи з висоти 2 м, спостерігаються суперпозиційні аномалії від металевих залишків, зокрема мін і боєприпасів, що дає можливість говорити тільки про загальну забрудненість території ВНП.

Для підтвердження цього висновку ми розрахували аномальне магнітне поле на висотах 1—5 м (з кроком 1 м) від ВНП на ділянці розміром 80×200 м. Згідно з розрахунками, починаючи з висоти 2 м, складно ідентифікувати окремий ВНП.

Висновки. За результатами пілотних досліджень показано, що застосування магнітометричних комплексів з використанням БПЛА дає можливість виявляти ВНП та їхні залишки (у складі яких є залізо) на висотах польоту над поверхнею максимум до 1,5—2,0 м.

Важливим етапом при проведенні такого роду робіт є оцінювання природного магнітного поля (фону), яке у деяких

### Список літератури

Орлюк М.И., Ролле Р., Роменец А., Ульрих Б., Цольнер Х. Микромагнитная съемка Большого Бельского городища скифского времени, Полтавская область. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 5. С. 25—39. https://doi.org/10.24028/ gzh.0203-3100.v38i5.2016.107818.

Орлюк М.И., Роменец А.А., Марченко А.В.,

випадках може ускладнювати виділення корисного сигналу. Воно може бути виконано шляхом розробки та аналізу карт природної компоненти аномального магнітного поля для території бойових дій на сучасну епоху. Зіставлення останніх з картами післявоєнних магнітних знімань дасть можливість виділити техногенну складову магнітного поля та оцінити ступінь забрудненості території. Завадою при пошуку мін і ВНП є також наявність залишків залізних виробів, які не пов'язані з бойовими діями.

ВНП з пластиковими та дерев'яними корпусами не можуть бути виявлені магнітометричним методом, що потребує його комплексування з георадарними, мультиі гіперспектральними методами. З наведеного вище можна зробити загальний висновок, що магнітометричні методи та створені на їх основі системи пошуку доцільно використовувати на початкових стадіях для отримання загальної оцінки забрудненості території, а в подальшому, як одного із основних методів комплексу для розмінування із застосуванням БПЛА. Головною перевагою використання магнітометричних систем є виявлення джерел аномалій у розрізі верхньої частини земної кори незалежно від типу вміщуючого середовища (ґрунт, вода і т. ін.) і погодних умов.

Пропоновані магнітометричні системи і інтерпретація отриманих даних дадуть важливі рекомендації та розрахунки щодо рекультивації земель. На базі оцінювання техногенної складової магнітного поля в межах бойових дій розроблятимуть методики відновлення довкілля в широкому спектрі питань.

Орлюк И.М., Иващенко И.Н. Магнитное склонение на территории Украины: результаты наблюдений и вычислений. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 2. С. 73—85. https:// doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015. 111307.

Пристай А., Ладанівський Б. Застосування

безпілотних апаратів для геофізичних досліджень. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 2. С. 109—125. https://doi.org/10.24028/gzh. 0203-3100.v39i2.2017.97378.

- Nikulin, A., DeSmet, T., Puliaiev, A., Zhurakhov, V., Fasullo, S., Chen, G., Spiegel, I., & Cappuccio, K. (2020). Automated UAS Aeromagnetic Surveys to Detect MBRL Unexploded Ordnance. *The Journal of Conventional Weapons Destruction*, 24(1), Article 13. Retrieved from https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/ vol24/iss1/13.
- Kolster M.E., Wigh, M.D., Lima Simões da Silva, E., Vilhelmsen, T.B., & Dössing, A. (2022). High-Speed Magnetic Surveying for Unexploded Ordnance Using UAV Systems. *Remote Sensing*, 14, 1134. https://doi.org/10.3390/ rs14051134.
- Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., Bakarzhieva, M., & Orliuk, I. (2024). Development of geomagnetic field induction module maps for the territory of Ukraine. *Geodynamics*, (1), 74– 84. https://doi.org/10.23939/jgd2024.01.074.

# Magnetometric detection of explosive objects: opportunities and prospects

M. Orlyuk<sup>1</sup>, S. Kuznetsov<sup>2</sup>, A. Romenets<sup>1</sup>, A. Marchenko<sup>1</sup>, I. Orliuk<sup>1</sup>, 2025

<sup>1</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine <sup>2</sup>State Enterprise Research Center for Subsoil Use Problems «GEORESURS»

One of the modern methods of mapping territories, including those contaminated with explosive ordnance (EOD), is remote magnetic surveying using UAVs. The method is based on the use of modern magnetometers and gradiometers, in particular LEMI-026, which, in combination with UAVs, record the components of the magnetic field. According to the results of experimental studies at landfills, it allows identifying accumulations of various metal residues, including explosive objects.

Key words: magnetometer, LEMI-026, magnetic survey, magnetic anomalies, EO, UAV.

### Reference

- Orlyuk, M.I., Rolle, R., Romenets, A., Ulrich, B., & Zollner, H. (2016). Micromagnetic survey of the Great Belsk settlement of the Scythian period, Poltava region. *Geophysical Journal*, 38(5), 25—39. https://doi.org/10.24028/ gzh.0203-3100.v38i5.2016.107818 (in Russian).
- Orlyuk, M.I., Romenets, A.A., Marchenko, A.V., Orlyuk, I.M., & Ivaschenko, I.N. (2015). Magnetic declination on the territory of Ukraine: results of observations and calculations. *Geophysical Journal*, *37*(2), 73—85. https://doi. org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015.111307 (in Russian).
- Prystay, A., & Ladanivsky, B. (2017). Establishment of unmanned vehicles for geophysical surveys. *Geophysical Journal*, 39(2), C. 109— 125. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100. v39i2.2017.97378 (in Ukrainian).

- Nikulin, A., DeSmet, T., Puliaiev, A., Zhurakhov, V., Fasullo, S., Chen, G., Spiegel, I., & Cappuccio, K. (2020). Automated UAS Aeromagnetic Surveys to Detect MBRL Unexploded Ordnance. *The Journal of Conventional Weapons Destruction, 24*(1), Article 13. Retrieved from https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/ vol24/iss1/13.
- Kolster M.E., Wigh, M.D., Lima Simões da Silva, E., Vilhelmsen, T.B., & Dössing, A. (2022). High-Speed Magnetic Surveying for Unexploded Ordnance Using UAV Systems. *Remote Sensing*, 14, 1134. https://doi.org/10.3390/ rs14051134.
- Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., Bakarzhieva, M., & Orliuk, I. (2024). Development of geomagnetic field induction module maps for the territory of Ukraine. *Geodynamics*, (1), 74– 84. https://doi.org/10.23939/jgd2024.01.074.

УДК 550.838:551.14

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322562

## Про можливу природу глибинних магнітних джерел зони Тейссейре—Торнквіста у зв'язку з неоднорідністю літосфери

#### I.К. Пашкевич, М.І. Бакаржієва, 2025

#### Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Необхідною умовою для формування джерел магнітних аномалій є наявність зон розтягу кристалічної кори та підвищена проникність мантії. Найбільша концентрація джерел спостерігається в регіоні, обмеженому меридіональними глибинними зонами активізації. Він характеризується підвищеною проникністю літосфери, «розмитістю» головної геодинамічної межі та порушенням структури перехідного шару під зоною Тейссейре—Торнквіста (ТТЗ). Утворення магнітних джерел за цих сприятливих умов пов'язується з магматизмом і флюїдизацією літосфери в процесі субдукції. Її ознаками є високошвидкісні похилі на південний захід шари в мантії до глибини 500—600 км, ідентифіковані як слеби, та «шари-дублікати» в перехідному шарі, що інтерпретуються як «потоплені» слеби.

**Ключові слова:** 3D магнітне моделювання, неоднорідність літосфери, лінія Тейссейре—Торнквіста, Східноєвропейський кратон.

Вступ. Попередні дослідження показали, що розподіл глибинних магнітних джерел кристалічної кори, що супроводжують лінію Тейссейре—Торнквіста (ТТЛ) боку Східноєвропейського кратону (СЄК), пов'язаний з будовою та розвитком північно-західної та південно-східної гілок ТТЛ. Фенноскандинавський та Сарматський сегменти СЄК, обмежені з південного заходу цими гілками, мають різний характер магнітних джерел та інтенсивність їх намагніченості. Магнітні аномалії обумовлені основними та ультраосновними магматичними породами або зонами збагачення магнітними мінералами, тому природу їх джерел в обох випадках пов'язують з глибинними процесами та неоднорідностями літосфери. Особливу роль при цьому відіграє процес субдукції, який дискутується для даного регіону протягом кількох десятиліть.

Завданням цього дослідження є встановлення зв'язку корових і мантійних структур з погляду обумовленості ними магнітної неоднорідності літосфери.

Об'єкт і методи дослідження. Кристалічна кора південно-західного околу СЄК і палеозойських доменів, що оточують її, складена потужною тришаровою корою кратону і малопотужною двошаровою корою Західноєвропейської платформи (ЗЄП). Високошвидкісна стабільна мантія СЄК зчленовується з низькошвидкісною активізованою мантією ЗЄП. Літосфера відзначається різкою зміною поведінки ії межі з астеносферою. Потужність літосфери збільшується за різними оцінками від ~80 км під ЗЄП і до ~200 км під СЄК. Характер зчленування різних типів мантії остаточно не зрозумілий через різні методичні підходи до побудови схем рельєфу межі літосфери та астеносфери (МЛА).

Citation: Pashkevich, I.K., & Bakarzhieva, M.I. (2025). On the possible nature of deep magnetic sources of the Teisseyre-Thornquist Zone in connection with the heterogeneity of the lithosphere. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 290—295. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322562.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

З метою з'ясування зв'язку корових і мантійних структур (з використанням матеріалів сейсмотомографії [Цветкова и др., 2021; Гінтов та ін., 2022 та посилання в ній] і люб'язно наданих Т.О. Цвєтковою вертикальних меридіональних швидкісних перетинів) була побудована схема неоднорідностей підкорової мантії регіону. Для визначення південно-західної межі високошвидкісної мантії СЄК використано нульові лінії нев'язок V<sub>P</sub> горизонтальних швидкісних зрізів на глибинах 50 і 100 км. За цими перетинами оцінено потужності СЄК і мантії ЗЄП у межах ТТЛ, виділені високошвидкісні похилі шари в мантії, що ототожнюються зі слебами, з урахуванням надглибинних мантійних флюїдів. За вертикальними швидкісними перетинами оцінено зони поширення перехідного шару від верхньої до середньої мантії під СЄК і ЗЄП і схарактеризовано його будову під ΤΤΛ.

Результати та їх обговорення. Мантія СЄК і ЗЄП у непорушених зонах має максимальну потужність, що сягає 300 км. У безпосередній близькості до ТТА структура літосфери порушується, і потужність обох типів мантії скорочуються до 100—150 км. Поведінка межі мантії СЄК і ЗЄП на глибинах 50 і 100 км та їх «усереднений» генералізований варіант засвідчують про наявність насуву мантії СЄК на мантію ЗЄП. Зона насуву у генералізованому варіанті субпаралельна ТТЛ і розміщується під зоною підсуву нижньої кори СЄК під кору ЗЄП. Відхилення зони насуву від субпаралельного розташування ТТЛ відбувається на південному сході за глибинною меридіональною Українсько-Прибалтійською зоною активізації. Вона зафіксована в усьому розрізі верхньої мантії, включаючи перехідний шар. По цій зоні мантійний насув зміщується на південь, де набуває широтного простягання.

Аналіз поведінки перехідного шару показав тісний зв'язок корових і мантійних структур. Перехідний шар СЄК характеризується зниженими значеннями V<sub>P</sub>, тоді як у ЗЄП він високошвидкісний. Різка границя цих типів шарів у межах Фенноскандії знаходиться на північ від ТТЛ у регіоні, обмеженому Свеко-Норвезьким фронтом та Українсько-Прибалтійською зоною активізації. Отже, мантія під СЄК підстилається тут перехідним шаром ЗЄП. Зазначимо, що у цьому регіоні сконцентровані глибинні магнітні джерела, зокрема супутні ТТЛ. У домені, обмеженому зонами Тор—Торнквіст та Зоргенфрей—Торнквіст, розвинений також високошвидкісний перехідний шар, проте істотно стоншений.

На південний схід від Українсько-Прибалтійської зони активізації у Сарматії межа перехідних шарів СЄК і ЗЄП різка та перебуває на вертикальному продовженні ТТЛ. В інших випадках під ТТЛ виявлені ускладнення структури перехідного шару, часто за участю високошвидкісних похилих шарів. У перехідному шарі ЗЄП фіксується двошарова його будова у вигляді «шарів дублікатів». Їх інтерпретовано як «потоплені» слеби. Співвідношення корових і мантійних структур демонструють магнітна модель і розріз літосфери за сейсмічним профілем Р4 (рис. 1). Мантійний насув і підсув нижньої кори СЄК під кору ЗЄП можна пояснити загальним процесом їх формування зі спрямуванням динамічних напружень з північного сходу на південний захід. При цьому магнітні глибинні джерела розміщуються в зоні розтягу. Дані щодо МЛА [Mazur et al., 2015] вказують на кореляцію корових і мантійних структур. Показовими є також найбільші зміни глибини до МЛА під зоною нижньої кори СЄК, підсунутої під кору ЗЄП. Зазначимо тісний зв'язок супутникового поля із потужністю літосфери. З глибинними літосферними процесами та поведінкою МЛА пов'язане також потрійне зчленування шовної зони Фенноскандія—Сарматія (ФСЗ) із гілками ТТЛ. Так, згідно з однією з моделей глибин залягання МЛА [Majorowicz et al., 2019], під зоною ФСЗ маємо локальне лінійне піднімання цієї межі з 200 до 150 км. Підтвердженням мантійного походження головних тектонічних елементів регіону можуть слугувати наявність кількох впевнено простежених у швидкісних вертикальних перетинах похилих високошвид-



Рис. 1. Магнітна модель земної кори за сейсмічним профілем Р4 і рельєф границі літосфери та астеносфери (МЛА) (*a*) і за графіками аномального магнітного поля (*б*): 1 — низькошвидкісна підкорова мантія ЗЄП; 2 — високошвидкісна підкорова мантія СЄК; 3 — межа літосфери та астеносфери (МЛА); 4 — межа високошвидкісної та низькошвидкісної підкорових мантій на глибинах від 50 до 100 км; 5 — надглибинний мантійний флюїд Ф1; 6 — лінія Тейссейре—Торнквіста (ТТА); 7 — головні розломи (*a*) та їх можливе продовження (*б*); 8 — ізотерма Кюрі магнетиту; 9 — магнітні джерела, значення намагніченості, в А/м. Графіки аномального магнітного поля: аномального ( $\Delta T$ )<sub>а</sub>, регіонального ( $\Delta T$ )<sub>а, рег</sub>, локального ( $\Delta T$ )<sub>а, лок</sub>, аномального магнітного поля на висоті 100 км ( $\Delta T$ )<sub>а</sub>, *h*=100 км, поля повного градієнта на висоті 100 км, градієнт ( $\Delta T$ )<sub>а</sub>, *h*=100 км і супутникового поля Magsat ( $\Delta T$ )<sub>а</sub>, Magsat.

Fig. 1. Magnetic model of the Earth's crust based on the P4 seismic profile and the relief of the lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) (a), graphs of the anomalous magnetic field ( $\delta$ ): 1 — low-velocity subcrustal mantle of

the WEP; 2 — high-velocity subcrustal mantle of the EEC; 3 — lithosphere-asthenosphere boundary (LAB); 4 — boundary of high-velocity and low-velocity subcrustal mantles at depths from 50 to 100 km; 5 — superdeep mantle fluid f1; 6 — Teisseyre-Tornquist line (TTL); 7 — Main: faults (*a*) and their possible continuations ( $\delta$ ); 8 — Curie isotherm of magnetic; 9 — magnetic sources, values of magnetization in A/m. Graphs of anomalous magnetic field: anomalous ( $\Delta T$ )<sub>a</sub>, regional ( $\Delta T$ )<sub>a</sub>, regional ( $\Delta T$ )<sub>a</sub>, *h*=100 km, and satellite field Magsat ( $\Delta T$ )<sub>a</sub>, Magsat.

кісних шарів на глибинах від 100—200 до 400—500 км. Їхні простягання та напрямок падіння слідують простяганню і падінню ТТЛ і ФСЗ. Оцінювання заглиблення ТТЛ у мантію утруднено, через переважно похиле на південний захід положення ТТЛ у корі та вертикальну межу швидкісних неоднорідностей до глибин 500—600 км під положенням ТТЛ на поверхні кристалічної кори. Можливо, що цю суперечність можна пояснювати існуванням підкорового насуву мантії СЄК на мантію ЗЄП.

Одним із головних питань формування TT3 є питання про існування та роль субдукційних процесів. Воно стосується і можливості зв'язку з ним магнітних мантійних джерел. На прикладі активних вулканічних дуг показано, що мантійні магнітні джерела пов'язані зі специфічними холодними регіонами (давніми кратонами і субдукуючими слебами) та із зонами гідратизованої та окисненої мантії. Субдукційний процес також забезпечує геохімічну та геодинамічну обстановку для збагачення оксидами заліза кори та мантії. Такі магнітні джерела фіксуються позитивними супутниковими аномаліями. За 3D моделюванням цих аномалій деякими дослідниками отримано широкий спектр намагніченості джерел. Наприклад, якщо потужність слебу 7 км і діапазон глибин 25—250 км, то намагніченість оцінюють у 4 А/м, а магнітну сприйнятливість Тихоокеанської плити — у 13·10<sup>-3</sup> од. СІ.

Роль субдукційних процесів у розвитку ТТЗ є невизначеною. Це пов'язане з неоднозначністю виділення високошвидкісних похилих мантійних шарів за даними сейсмотомографії. Такі шари ідентифікуються як слеби [Старостенко та ін., 2024]. Найбільш імовірною моделлю формування ТТЗ є південно-західна ордовик-силурійська модель субдукції [Гінтов та ін., 2022]. Якщо така існувала, то безпосередньо для магнітного моделювання вона не може бути використана з двох причин. По-перше, за час з ордовіку—силуру слеб, що занурювався, дійшов би температурної рівноваги з навколишнім середовищем. По-друге, при оцінених потужностях слебу (100-250 км) і глибинах (250—400 км) над ним має існувати інтенсивний максимум супутникового поля на південний захід від ТТЛ. Однак тут зафіксований відомий Центральноєвропейський мінімум. Тому мантійне джерело може обумовлювати супутниковий максимум над Фенноскандією. Для виникнення магнітних джерел уздовж ТТЗ важливе існування зон розтягу, пов'язаних з колізійним процесом, і сприятливих умов для привнесення флюїдами оксидів заліза над зоною субдукції.

Глибинні магнітні джерела супроводжують ТТЛ практично на всьому контакті з Фенноскандією. Вони мають дайкоподібну форму і обмежені з південного заходу ТТЛ. Наявність Трансскандинавського вулканічного поясу може засвідчувати наявність глибинного магматичного осередку та зв'язку з ним корових магнітних джерел. Проте укоріненню інтрузій сприяло розущільнення кори на північний схід від ТТЛ, зафіксоване на кількох сейсмічних профілях зниженням швидкості V<sub>P</sub>. Крім того, за даними сейсмотомографії зона ТТЗ характеризується порушеною структурою та стоншенням перехідного шару, підвищеною проникністю літосфери та «розмитістю» її головної геодинамічної межі. Ця обставина сприяє надходженню флюїдів з великих глибин і формуванню новостворених магнітних мінералів. З цього погляду важливу роль можуть відіграти виявлені надглибинні флюїди. Зокрема, магнітне глибинне джерело в межах Львівського

прогину повністю розташоване в межах такого флюїду [Цветкова и др., 2021].

Висновки. 1. Найбільша концентрація глибинних магнітних джерел, спостерігається в регіоні, обмеженому меридіональними глибинними зонами активізації — Свеко-Норвезькою та Українсько-Прибалтійською. Вони простежені в усьому розрізі літосфери до перехідного шару верхньої мантії.

2. Цей регіон характеризується неоднорідністю мантії починаючи з підкорових глибин. До глибини 100 км високошвидкісна мантія СЄК насунута на низькошвидкісну мантію ЗЄП. Зона насуву простежена на південний захід від ТТЛ, її генеральне простягання згідне з ТТЛ. Мантійний насув корелює з підсувом нижньої кори СЄК під кору ЗЄП і, ймовірно, пов'язаний з ним загальним процесом руху літосфери у південно-західному напрямку з утворенням зони розтягу на північному сході від ТТЛ.

3. Магнітні джерела, що супроводжують ТТЛ з північного сходу, є більш молодими у порівнянні з джерелами СЄК, оскільки

## мають з останніми торцеве зчленування. Їх утворення пов'язується із субдукційним процесом в ордовіку—силурі. Його ознаками є високошвидкісні похилі на південний захід шари в мантії до глибини 500—600 км, ідентифіковані як слеби, та поширені на південний захід від ТТЛ «шари-дублікати» в перехідному шарі, що інтерпретуються як «потоплені» слеби.

4. Існування зон розтягу вздовж ТТА створює сприятливі умови для укорінення інтрузій — джерел магнітних аномалій вздовж ТТА. Крім того, визначено підвищену проникність літосфери, «розмитість» головної геодинамічної межі та порушення структури стоншеного перехідного шару під ТТЗ, що сприяє проникненню в зону ТТЗ глибинних флюїдів із утворенням нових «вторинних», мінералів.

Таким чином, природа глибинних магнітних джерел цілком обґрунтовано сприймається як двояка. Їх намагніченість можна пов'язувати з первинними магнітними мінералами основних—ультраосновних порід і з новоутвореними оксидами заліза, привнесеними глибинними флюїдами.

## Список літератури

- Гінтов О.Б., Цвєткова Т.О., Бугаєнко І.В., Заєць Л.М., Муровська Г.В. Глибинна будова Транс'європейської шовної зони (за матеріалами сейсмотомографії та ГСЗ) і деякі уявлення про її розвиток. *Геофиз. журн.* 2022. Т. 44. № 6. С. 63—87. https://doi.org/10.24028/ gj.v44i6.273640.
- Старостенко В.І., Гінтов О.Б., Муровська Г.В., Мичак С.В., Лисинчук Д.В. Тектоніка і глибинна будова південно-західної частини Східноєвропейського кратону в межах України. Ч. II. *Геофіз. журн.* 2024. Т. 46. № 5. С. 3—31. https://doi.org/10.24028/gj.v46i5. 310287.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Скоростное строение мантии пограничья Вос-

точно-Европейской и Западно-Европейской платформ. *Геофиз. журн.* 2021. Т. 43. № 5. С. 181—192. https://doi.org/10.24028/gzh. v43i5.244080.

- Majorowicz, J., Polkowski, M., & Grad, M. (2019). Thermal properties of the crust and the lithosphere-asthenosphere boundary in the area of Poland from the heat flow variability and seismic data. *International Journal of Earth Sciences*, 108, 649—672. https://doi.org/10.1007/ s00531-018-01673-8.
- Mazur, S., Mikolajczak, M., Krzywiec, P., Malinowski, M., Buffenmyer, V., & Lewandowski, M. (2015). Is the Teisseyre-Tornquist Zone an ancient plate boundary of Baltica. *Tectonics*, 34, 2465—2477. https://doi.org/10.1002/ 2015TC003934.

# On the possible nature of deep magnetic sources of the Teisseyre-Thornquist Zone in connection with the heterogeneity of the lithosphere

## I.K. Pashkevich, M.I. Bakarzhieva, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

A prerequisite for the formation of magnetic anomaly sources is the presence of crystal crustal stretching zones and increased mantle permeability. The highest concentration of sources is observed in the region bounded by meridional deep activation zones. It is characterised by increased permeability of the lithosphere, 'blurring' of the main geodynamic boundary and disruption of the structure of the transition layer under the Teisseyre-Thornquist zone (TTZ). The formation of magnetic sources under these favourable conditions is associated with lithospheric magmatism and fluidisation in the process of subduction. Its features are high-velocity southwest-dipping layers in the mantle to a depth of 500—600 km, identified as slabs, and 'duplicate layers' in the transition layer interpreted as 'sunken' slabs.

**Key words:** 3D magnetic modelling, lithosphere heterogeneity, Teisseyre-Tornquist line, East European Craton.

#### References

- Gintov, O.B., Tsvetkova, T.O., Bugaenko, I.V., Zayats, L.M., & Murovska, G.V. (2022). The deep structure of the Trans-European Suture Zone (based on seismic survey and GSR data) and some insights in to its development. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(6), 63—87. https://doi. org/10.24028/gj.v44i6.273640 (in Ukrainian).
- Starostenko, V.I., Gintov, O.B., Murovska, H.V., Mychak, S.V., & Lysynchuk, D.V. (2024). Tectonics and deep structure of the south western part of the East European Platform within Ukraine. P. II *Geofizicheskiy Zhurnal*, 46(5), 3—31. https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.310287 (in Ukrainian).
- Tsvetkova, T.A., Bugaenko, I.V., & Zaets, L.N. (2021). Speed structure of the mantle at the

border of the East European and West European platforms. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(5), 181—192. https://doi.org/10.24028/gzh.v43i5. 244080 (in Russian).

- Majorowicz, J., Polkowski, M., & Grad, M. (2019). Thermal properties of the crust and the lithosphere–asthenosphere boundary in the area of Poland from the heat flow variability and seismic data. *International Journal of Earth Sciences*, *108*, 649–672 https://doi.org/10.1007/ s00531-018-01673-8.
- Mazur, S., Mikolajczak, M., Krzywiec, P., Malinowski, M., Buffenmyer, V., & Lewandowski, M. (2015). Is the Teisseyre-Tornquist Zone an ancient plate boundary of Baltica. *Tectonics*, 34, 2465—2477. https://doi.org/10. 1002/2015TC003934.

УДК 550. 834.08

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322565

# Джерело для генерування сейсмічних хвиль при проведенні геофізичних пошукових досліджень

В.О. Поляковський, Д.М. Гринь, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Описано пристрій генерування сейсмічних хвиль для проведення геофізичних пошукових досліджень. Як джерело сейсмічних хвиль запропоновано використовувати енергію вибуху ацетиленово-кисневої газової суміші, що перебуває під високим тиском у спеціальних газових генераторах. Коротко розглянуто сучасні методи використання вибухових і невибухових джерел для генерування сейсмічних хвиль під час проведення досліджень у пошуковій геофізиці. Вказано на їх недоліки. Серед переваг запропонованого джерела сейсмічних хвиль зазначено низьку його вартість, мобільність і відсутність необхідності отримання спеціальних дозволів на його використання.

Ключові слова: вибухові речовини, газова детонація, вибух, детонаційна хвиля, газодинамічні методи, імпульсне невибухове джерело, сейсморозвідка, сейсмічні хвилі.

Вступ. Вважають, що з усіх методів геофізичної розвідки сейсморозвідка є найважливішою насамперед тому, що здатна відтворити геологічну будову середовища з високою точністю [Mondol, 2010]. Сейсмічні методи включають оцінювання форми та визначення фізичних властивостей приповерхневих шарів Землі на підставі вивчення поширення пружних хвиль, що генеруються джерелом сейсмічних хвиль. Поширюючись в глибину Землі, пружні хвилі відбиваються від границь шарів гірських порід і повертаються на поверхню Землі, де реєструються сейсмоприймачами, встановленими на поверхні ґрунту. Визначення параметрів поширення зареєстрованих хвиль (час, швидкість поширення хвиль, амплітуда, форма сигналу тощо) дає можливість вивчати особливості структури геосередовища.

Під час проведення сейсморозвідувальних робіт найважливішим технічним елементом є сейсмічне джерело. Від його характеристик залежить якість сейсмічних записів, зокрема роздільна здатність хвильових полів, глибина сейсмічних досліджень і коректність розв'язку обернених динамічних задач.

На сьогодні у наземній сейсморозвідці під час вивчення будови геологічного розрізу застосовують вибухові й невибухові джерела сейсмічних хвиль. Вибухове джерело створює потужний короткий імпульс, що має широкий частотний діапазон і чіткий перший вступ, тому й вважається найкращим джерелом сейсмічних хвиль. Проте вибухові джерела мають і низку недоліків. Насамперед це висока собівартість робіт, яка включає буріння свердловин, їх спорядження, високу вартість вибухівки тощо. Для виконання вибухових робіт необхідно отримати спеціальні дозволи та ліцензії. Вибухи не можна проводити поблизу поселень, мостів, ліній електропередачі, залізниць. Наявність охоронних зон (наприклад для газопроводів 500 м від труби) дуже ускладнює площинні сейсмічні роботи для пошуку корисних копалин.

Citation: Polyakovskiy, V.O., & Gryn, D.M. (2025). A source for generating seismic waves in geophysical prospecting. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 296—300. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322565.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Крім того, хімічні вибухи завдають серйозної шкоди навколишньому середовищу.

За таких умов пошук нових джерел сейсмічних хвиль є актуальним і перспективним напрямом досліджень. Останнім часом при виконанні сейсморозвідувальних робіт широко застосовують невибухові джерела сейсмічних хвиль, серед яких найперспективнішими вважають вібраційні [Шнеерсон и др., 1992; Обрубов, 2016] і газодинамічні [Хмелевской и др., 2004] методи збудження сейсмічних хвиль. Конструктивно такі сейсмоджерела різняться лише джерелом сили, що діє на випромінювач сейсмічних хвиль масивну металеву плиту, розташовану на поверхні ґрунту. Так, електрогідравлічні вібратори включають в себе гідроциліндр і поршень. Поршень жорстко зв'язаний з випромінювачем. Гідроциліндр слугує інерційною масою і має дві камери, в які під високим тиском почергово подають мастило. Під дією мастила він рухається вверх або вниз, створюючи зусилля на випромінювач. Електромагнітний вібратор складений з випромінювальної плити зі стойками, на які спирається якір електромагніта [Ивашин и др., 2012; Роман та ін., 2018; Попков та ін., 2019]. Індуктор з обмоткою збудження закріплені на інерційній масі і спираються на випромінювальну плиту. При подачі імпульсу струму на обмотку індуктора останній притягується до якоря, створюючи при цьому імпульс сили, що передається на випромінювальну плиту. Основними недоліками потужних вібраційних сейсмоджерел є складність їх конструкції, значні габаритні розміри, велика маса, а також висока собівартість. Це обмежує їх використання у важкодоступних місцях.

У газодинамічних сейсмічних джерелах вибухова суміш газів заповнює циліндр з рухливою нижньою стінкою — випромінювачем (поршнем). Такий циліндр притискають за допомогою автомобіля до поверхні, на якій змонтовано джерело, після чого газ підпалюють, і відбувається його вибухоподібне згорання (детонація). Газ під великим тиском різко давить на поршень, унаслідок чого цей тиск передається на ґрунт у місце його контакту з робочим органом газовибухового джерела [Хмелевской и др., 2004].

В Інституті геофізики НАН України розроблено новий засіб генерування сейсмічних хвиль для проведення геофізичних досліджень [Поляковський, Гринь, 2022, 2025]. Метод, на підставі якого створено цей пристрій, ґрунтується на ідеї підвищення ефективності джерела сейсмічних хвиль у результаті підривання системи із трьох жорстко зв'язаних між собою механічно врівноважених направлених подовжених зарядів із суміші ацетилену та кисню, що перебуває в оболонці під високим тиском.

Конструкція джерела для генерування сейсмічних хвиль. Як зазначено вище, у процесі розробки нових сейсмічних джерел для проведення геофізичних досліджень ми запропонували новий спосіб генерування сейсмічних хвиль, який ґрунтується на використанні енергії вибуху суміші ацетилену та кисню в спеціальних пристроях — газових генераторах. Цей спосіб полягає в одночасному підриванні в ґрунті поблизу вільної поверхні трьох жорстко зв'язаних між собою подовжених газоімпульсних пристроїв з вікнами, що розташовані на їх нижньому торці. Ці пристрої заповнені під тиском сумішшю ацетилену та кисню. Газові генератори розміщуються вздовж прямої лінії. Для забезпечення врівноваженості системи середній заряд розміщували вертикально до земної поверхні, а два бокових заряди — під кутом у такий спосіб, щоб енергія вибуху концентрувалась у мінімальній за об'ємом зоні Врівноваженість системи газових зарядів забезпечується жорстким з'єднанням їх за допомогою металевих кріплень (2) і розтяжок (б), що встановлені біля нахилених газоімпульсних пристроїв (рис. 1).

Для збірки розробленого пристрою земної поверхні на одній лінії механічними засобами пробурюють три шпури: середній — вертикально до денної поверхні, а два бокових — під однаковим кутом *a* в бік середнього шпура. Глибину шпурів та їх



Рис. 1. Схематичне зображення пристрою для генерування сейсмічних хвиль при проведенні геофізичних досліджень: 1— газові генератори; 2— металеве кріплення для з'єднання зарядів між собою, а також балони з киснем і ацетиленом, забезпечені редукторами та шлангами для заправки газових зарядів; 3— вікно на нижньому торці кожного із зарядів, на яке встановлюють діафрагму із дюралюмінію; *верхній торець*: 4— ініціювальний пристрій, 5— штуцер для заправки газами; 6— розтяжки.

Fig. 1. Schematic representation of the device for generating seismic waves during geophysical research: 1 — gas generators; 2 — metal fastener for connecting the charges and the oxygen and acetylene tanks equipped with reducers and tubings to fill the gas charges; 3 — a window at the lower side of each charge, to which a duralumin diaphragm misfitted; *upper end*: 4 — initiating device, 5 — gas filling fitting; 6 — tension rods.

нахил вибирають такими, щоб забезпечити концентрацію енергії вибуху зарядів в околі точки О. Далі заряди вставляють у шпури та жорстко з'єднують між собою за допомогою металевого кріплення із швелерів і встановлюють розтяжки. Після цього кожен із них через штуцер для заправки газами заповнюють ацетиленовокисневою сумішшю стехіометричного складу (~30 % ацетилену). Для одночасного підривання зарядів ініціатори вибуху з'єднують паралельно та підключають до засобу ініціювання. Після підпалювання ацетилено-кисневої суміші у кожному заряді виникає детонація, яка руйнує дюралюмінієві діафрагми та створює потужні ударні хвилі. Концентруючись в околі точ-



Рис. 2. Сейсмограми, отримані датчиками CB-30 під час випробовування розробленого пристрою.

Fig. 2. Seismograms received by SV-30 sensors during the testing of the developed device.

ки *O*, хвилі створюють у ньому джерело більш потужної ударної хвилі, яка, поширюючись вглиб середовища, перетворюється в сейсмічну хвилю.

Дієздатність пристрою ілюструють сейсмограми (рис. 2), отримані в процесі його випробувань на експериментальній базі Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Для запису сейсмограм використовували датчики СВ-30. На графіку цифрами 1—4 позначено коливання земної поверхні під час ініціювання ацетиленокисневої суміші загальним об'ємом 19,5 л під тиском відповідно 12, 10, 8 та 7 атм на відстані 10 м від центрального заряду. Величина А нормована до максимального значення коливання земної поверхні.

Технічний результат від застосування джерела сейсмічних хвиль досягається за одночасного підривання системи із трьох направлених газових зарядів із високою концентрацією ацетилено-кисневої суміші, розміщених у ґрунті поблизу вільної поверхні, та концентрацією енергії їх вибуху.

Дослідження, проведені з використанням сейсмодатчиків CB-30, засвідчили появу сейсмічних хвиль, що поширювалися в ґрунтовому середовищі. У разі збільшення тиску суміші газів отримуємо потужне газоімпульсне джерело, яке можна використовувати як альтернативне невибухове джерело сейсмічних хвиль під час проведення геофізичних досліджень. Перевагою розробленого джерела є низька собівартість обладнання, простота проведення геофізичних робіт, відсутність спеціальних дозволів на використання, а також можливість його застосу-

#### Список літератури

- Ивашин В.В., Иванников Н.А., Узбеков К.Х. Импульсный невзрывной сейсмоисточник с индукционно-динамическим приводом для сейсморазведки зоны малых скоростей. Вектор науки ТГУ. 2012. № 4(22). С. 156—160.
- Обрубов В.А. Обращенный гравитационный источник сейсмических колебаний. Инновационная наука. 2016. № 4. С. 137—140.
- Поляковський В.О., Гринь Д.М. Пристрій для генерування сейсмічних хвиль при проведенні геофізичних досліджень. Пат. 151511, Україна. Опубл. 4.08.2022. Бюл. № 31.
- Поляковський В.О., Гринь Д.М. Пристрій для генерування сейсмічних хвиль при проведенні геофізичних досліджень. Пат. 158185, Україна. Опубл. 08.01.2025, Бюл. № 2.
- Попков В.С., Богаєнко М.В., Роман В.І., Мукоєд Н.І. Спосіб збудження сейсмічних хвиль.

вання у важко доступних місцях. Крім того, пружні хвилі, що генеруються, утворюють компактне джерело, що також важливо при виконанні сейсмічних досліджень.

Патент на винахід 119203, Україна. Опубл. 10.05.2019, бюл. № 9.

- Роман В.І., Попков В.С., Богаєнко М.В., Євстахевич З.М., Дмитренко О.В., Гринь Д.М., Мукоєд Н.І. *Спосіб збудження сейсмічних хвиль*. Патент на винахід 116423, Україна. Опубл. 12.03.2018.
- Хмелевской В.К., Горбачев Ю.И., Калинин А.В., Попов М.Г., Селиверстов Н.И., Шевнин В.А. *Геофизические методы исследований*. Издво КГПУ, 2004, 232 с.
- Шнеерсон М.Б., Лугинец А.И., Андреев В.К., Асан-Джалалов А.Г. *Невзрывные источники сейсмических колебаний. Справочник*. Москва: Недра, 1992, 240 с.
- Mondol, N.H. (2010). Seismic Exploration. In *Petroleum Geoscience* (pp. 375—402). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02332-3\_17.

# A source for generating seismic waves in geophysical prospecting

## V.O. Polyakovskiy, D.M. Gryn, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The paper presents a device for generating seismic waves for conducting geophysical research. It is proposed to use the energy of explosion of acetylene-oxygen mixture under high pressure in special gas generators as a source of seismic waves. The modern methods of using explosive and non-explosive sources for generating seismic waves in exploration geophysics are briefly considered. Their disadvantages are indicated. Among the advantages of the proposed wave source are its low cost, mobility, and the absence of the need to obtain special permits for its use.

**Key words:** explosives, gas detonation, explosion, detonation wave, gas-dynamic methods, pulsed non-explosive source, seismic survey, seismic waves.

#### References

Ivashin, V.V., Ivannikov, N.A., & Uzbekov, K.H. (2013). To question about the creation a portable pulse of non-explosive seismic source with electrodynamic drive. *Izvestia of Samara* 

Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 15(4), 75–81 (in Russian).

- Obrubov, V.A. (2016). Inverted gravity source of seismic vibrations. *Innovative Science*, (4), 137–140 (in Russian).
- Polyakovskyi, V.O., & Gryn, D.M. (2022). A device for generating seismic waves during geophysical research. Pat. 151511 Ukraine. Publ. 08.04.2022. Bul. No. 31 (in Ukrainian).
- Polyakovskyi, V.O., & Gryn, D.M. (2025). A device for generating seismic waves during geophysical research. Pat. 158185 Ukraine. Publ. 08.01.2025, Bull. No. 2 (in Ukrainian).
- Popkov, V.S., Bogayenko, M.V., Roman, V.I., & Mukoed, N.I. (2019). *Method of excitation of seismic waves*. Patent for the invention 119203. Publ. 10.05.2019, Bull. No. 9 (in Ukrainian).

- Roman, V.I., Popkov, V.S., Bogayenko, M.V., Evstakhevich, Z.M., Dmytrenko, O.V., Gryn, D.M., & Mukoed, N.I. (2018). *Method of excitation of seismic waves*. Patent for the invention 116423, Ukraine. Publ. 12.03.2018 (in Ukrainian).
- Khmelevskoy, V.K., Gorbachev, Yu.I., Kalinin, A.V., Popov, M.G., Seliverstov, N.I., & Shevnin, V.A. (2004). *Geophysical research methods*. Publ. house KSPU, 232 p. (in Russian).
- Shneerson, M.B., Luginets, A.I., Andreev, V.K., & Asan-Dzhalalov, A.G. (1992). Non-explosive sources of seismic vibrations. Moscow: Nedra, 240 p. (in Russian).
- Mondol, N.H. (2010). Seismic Exploration. In *Petroleum Geoscience* (pp. 375—402). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02332-3\_17.

УДК 550.3

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322567

## Динаміка геомагнітного поля в районі УАС «Академік Вернадський» за результатами спостережень на геодинамічному полігоні

А.О. Роменець<sup>1</sup>, Ю.П. Сумарук<sup>1</sup>, Ю.С. Отруба<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна <sup>2</sup>ДУ «Національний антарктичний науковий центр», Київ, Україна

Одним з найбільш важливих напрямів геолого-геофізичних досліджень в Антарктиці є вивчення глибинної будови регіону. Особливий інтерес становлять дослідження сучасної геодинаміки земної кори, оскільки до тектонічно активних розломів часто приурочені великі родовища нафти і газу та інші види корисних копалин. Оцінено динаміку геомагнітного поля для часового інтервалу 2008—2023 рр. і наведено результати розрахунку підмагнічуючого ефекту і значень складової  $\delta B_{a'}$  яка може бути зумовлена сучасними геодинамічними процесами.

Ключові слова: магнітне поле, аномалії, підмагнічуючий ефект, геодинаміка.

Згідно із затвердженою програмою досліджень в Антарктиці на станції «Академік Вернадський» («АВ») проводиться широкий спектр різноманітних досліджень. Станція «АВ» є потужною геофізичною обсерваторією, що безперервно працює з 1947 р. (до 1996 р. — «База F», Великобританія). Перші геомагнітні виміри було проведено в 1955 р.

Одним з найбільш важливих напрямів

Citation: Romenets, A.O., Sumaruk, Y.P., & Otruba, Y.S. (2025). The geomagnetic field dynamics at Akademik Vernadsky Station based on the geodynamic study site observations. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 300—306. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322567.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

геолого-геофізичних досліджень в Антарктиці є вивчення глибинної будови регіону. Розуміння процесів, які сформували сучасний тектонічний вигляд Західної Антарктики, неможливо без усестороннього аналізу уявлень про еволюцію і геодинаміку регіону в цілому і його окремих фрагментів зокрема. Особливий інтерес становлять дослідження сучасної геодинаміки земної кори, оскільки до тектонічно активних розломів часто приурочені великі родовища нафти і газу та інші види корисних копалин [Максимчук и др., 2008].

Аналіз наявної магнітометричної інформації засвідчує доволі слабку вивченість території Антарктиди й Антарктичного півострова магнітними вимірами. У 80-х роках XX ст. співробітниками Британської антарктичної служби на підставі узагальнення магнітних зйомок різних років і висотної аеромагнітної зйомки (*h*=2 500 м) було побудовано карту аномального магнітного поля м-бу 1:1 500 000 для Антарктичного півострова та прилеглих акваторій [Renner et al., 1985]. У відділі геомагнетизму створено цифрову версію цієї карти [Роменець, Орлюк, 2008].

Завдяки проведеним у різні роки наземним і морським дослідженням для території архіпелагу «Аргентинські острови», прилеглих акваторій та островів побудовані цифрові магнітні карти модуля індукції геомагнітного поля *B* і його аномалій *B*<sub>a</sub>, що дозволяє чітко визначати аномальні зони та робити висновки про характер і структуру геомагнітного поля. Карта аномального магнітного поля на епоху 2007,5 року [Роменець, Орлюк, 2008] свідчить про наявність аномалій з інтенсивністю в перші тисячі нанотесла, доволі велику неоднорід-



Рис. 1. Карта магнітної зйомки різних років [Bakhmutov et al., 2023] і карта аномального магнітного поля території навколо архіпелагу «Аргентинські острови» з точками тектономагнітних вимірювань на епоху 2007,5 року [Роменець, Орлюк, 2008; Orlyuk, Romenets, 2008].

Fig. 1. Magnetic survey map of different years [Bakhmutov et al., 2023] and map of the anomalous magnetic field of the Argentine Islands archipelago with points of tectonomagnetic measurements [Romenets, Orlyuk, 2008; Orlyuk, Romenets, 2008].

ність поля в районі архіпелагу і, відповідно, незначну глибину залягання порід з різко відмінними магнітними властивостями (рис. 1).

Поле *B*<sub>a</sub> поблизу УАС «Академік Вернадський» досить складне, сильно диференційоване. Весь геодинамічний полігон розташований у від'ємному полі  $B_a$  в декілька сотень нанотесла. Це від'ємне поле, ймовірно, обумовлене впливом нижніх кромок джерел навколишніх додатних магнітних аномалій з інтенсивністю в декілька тисяч нанотесла, породи яких виходять на денну поверхню [Максимчук и др., 2008].

Таблиця 1. Модуль індукції <br/> B, його аномальної компоненти  $\Delta B_{\rm a}$  <br/>і динаміка поля за 15 років. Значення — в <br/>н Тл

		1	1						1	
Номер тікету	Місце розта- шування	Коорди- нати 2008 р.	Коорди- нати 2023 р.	B_2005	B <sub>a-2005</sub>	B_2008	B <sub>a-2008</sub>	B <sub>-2023</sub>	<i>B</i> <sub>a-2023</sub>	δ <i>B</i> _2023- 2008
1	о. Бархани, захід	S 65°14,362' W 64°19,023'	65,2393434° 64,3171029°	39454,2	16	39119,6	-51,687	37789,5	-45,518	-1330,13
1a	о. Бархани, центр	S 65°14,410' W64°18,447'	65,2401324° 64,3075259°	39468,9	27	39153,9	-16,232	37829,6	-4,438	-1324,31
2	о. Бархани, схід	S 65°14,544' W64°17,862'	65,2424251° 64,2977171°	39207	-238	38953,8	-216,19	37641,5	-191,54	-1312,35
3	о. Троє поросят	S 65°14,617' W64°16,855'	65,2436307° 64,2809883°	39661	199	39391,2	223,331	38052,9	221,874	-1338,36
3a	о. Троє поросят, захід	S 65°14,630' W64°16,761'	65,2438321° 64,2792888°	39618	162	39353,8	185,97	37999,8	168,822	-1353,95
4	мис Пінгвін- Поінт	S 65°14,919' W64°14,332'	65,2486591° 64,2389262°	39194	-297	38910,4	-253,84	37609,7	-217,34	-1300,7
5	о. Скуа	S 65°15,225' W64°15,029'	65,2537605° 64,2505268°	39148	-339	38872,9	-297,2	37553,2	-275,8	-1319,7
6	о. Ялур	S 65°14,035' W64°09,715'	65,2338799° 64,1619166°	39359	-99	39105,3	-33,944	37813,6	21,6305	-1291,63
7	мис Расмус- сен	S 65°14,852' W64°05,097'	65,2471644° 64,0852294°	40120	628	39849,6	713,88	38882,6	1094,64	-966,94
8	о. Барселот	S 65°19,436' W64°08,419'	65,3238671° 64,1403511°	39841	297	39572,1	368,512	38271,6	420,596	-1300,51
9	о. Уругвай, південь	S 65°14,398' W64°13,752'	65,2399452° 64,2292292°	39154	-319	38885,4	-270,47	37592,5	-226,5	-1292,93
10	о. Уругвай, північ	S 65°14,005' W64°13,389'	65,2333759° 64,2230624°	39297	-159	39038,2	-111,6	37734,6	-77,439	-1303,64
11	о. Ірізар	S 65°13,186′ W64°11,710′	65,2197390° 64,1951865°	39369	-79	39103,4	-31,069	37810,7	13,7048	-1292,73
12	о. Пітерман	S 65°10,501' W64°08,258'	65,1750366° 64,1375797°	39433	-1	39166,2	75,9716	37863,1	119,066	-1303,07
13	о. Рока	S 65°11,079' W64°29,146'	65,1846694° 64,4863866°	40321	851			38674,8	869,821	
14	мис Вейт	S 65°31,051' W64°05,061'	65,5175204° 64,0843178°	_		40124,7	784,33	38813,3	823,246	-1311,48
15	о. Форджі	S 65°14,201' W64°17,140'	65,2366827° 64,2856202°			38907,2	-256,37	37579,2	-246,85	-1328,09
16	о. Скуа	S 65°15,323' W64°16,461'	65,2553995° 64,2743456°			39280,7	105,017	37949,5	122,493	-1331,23
17	о. Гротто	S 65°14,352' W64°15,440'	65,2392145° 64,2573017°			38399,4	-761	37143,5	-679,54	-1255,94

У 2023—2024 рр. проведено повторні виміри модуля індукції магнітного поля В на 28 пунктах. Для кожного пункту виділено аномальну компоненту В<sub>а</sub>. Методику магнітних вимірів розроблено з урахуванням особливостей, властивих даній території. Проводились наземні точкові та профільні вимірювання. Методика вимірів полягала у синхронних спостереженнях варіацій модуля В на станції «АВ» і точках виміру. Це дало змогу виключити варіаційну складову магнітного поля  $\Delta B$  та отримати для точок спостережень абсолютні значення модуля *В* на момент вимірювання  $B_{abc} = B_{BMMin} - \Delta B$ . Аномальні значення модуля визначаються виразом  $B_a = B_{abc} - B_{IGRF}$ . Розрахунок  $B_{IGRF}$ 

для 28 пунктів (в табл. 1, як приклад, наведено 17 пунктів) виконано у режимі on-line з використанням програмного забезпечення Британської геологічної служби (BGS) (https://geomag.bgs.ac.uk/data\_service/ models\_compass/wmm\_calc.html). У результаті безперервних спостережень на магнітній обсерваторії визначено середньорічне значення модуля В для 2023 року, необхідне для подальшої обробки і приведення даних до єдиного рівня. З урахуванням цієї величини було визначено величину аномалій *B*<sub>a</sub> у кожній точці спостережень.

Величини *B*<sub>a</sub> у пунктах спостережень мають значення від –1006 до 4003 нТл, що засвідчує сильну магнітну неоднорідність

Таблиця 2. Величини модуля магнітного поля  $B_{IGRF}$ , аномальної компоненти  $B_a$  в пунктах, величина підмагнічуючого ефекту  $\Delta\Delta B_a$  та потенційного внеску  $\delta B_a$  внаслідок геодинамічних(?) явищ. Значення — в нТл

Номер пікету	Місце розташування	B <sub>IGRF-2008</sub>	B <sub>IGRF-2023</sub>	B <sub>a-2008</sub>	B <sub>a-2023</sub>	В <sub>а-р-2023</sub>	$\Delta\Delta B_{a-2023}$	$\delta B_{a-2023}$ -2008
1	о. Бархани, захід	39129	37835	-51,69	-45,52	-49,98	4,46	1,71
1a	о. Бархани, центр	39128	37834	-16,23	-4,44	-15,70	11,26	0,54
2	о. Бархани, схід	39212	37833	-216,19	-191,54	-208,59	17,05	7,60
3	о. Троє по- росят	39210	37831	223,33	221,87	215,48	6,40	-7,85
3a	о. Троє поросят, захід	39210	37831	185,97	168,82	179,43	-10,61	-6,54
4	мис Пінгвін- Поінт	39207	37827	-253,84	-217,34	-244,91	27,57	8,93
5	о. Скуа	39208	37829	-297,20	-275,80	-286,75	10,95	10,45
6	о. Ялур	39169	37792	-33,94	21,63	-32,75	54,38	1,19
8	о. Барселот	39229	37851	368,51	420,60	355,57	65,03	-12,94
9	о. Уругвай, південь	39198	37819	-270,47	-226,50	-260,95	34,45	9,52
10	о. Уругвай, північ	39191	37812	-111,80	-77,44	-107,67	30,23	3,93
11	о. Ірізар	39175	37797	-31,07	13,70	-29,98	43,68	1,09
12	о. Пітерман	39121	37744	75,97	119,07	73,30	45,77	-2,67
14	мис Вейт	39370	37990	784,33	823,25	756,84	66,41	-27,49
15	о. Форджі	39206	37826	-256,37	-246,85	-247,35	0,49	9,02
16	о. Скуа	39206	37827	105,02	122,49	101,32	21,17	-3,69
17	о. Гротто	39203	37823	-761,00	-679,54	-734,21	54,67	26,79



Рис. 2. Величина  $\Delta\Delta B_a$  підмагнічуючого ефекту за 15 років (2008—2023) і величина внеску  $\delta B_a$  внаслідок геодинамічних(?) явищ.

Fig. 2. The magnitude of the  $\Delta\Delta B_a$  magnetizing effect over 15 years (2008—2023) and the magnitude of the  $\delta B_a$  contribution due to geodynamic(?) phenomena.

верхньої кори. Від'ємні аномалії можуть бути як мінімумами від намагнічених за полем магнітних джерел, так і мати самостійне значення у випадку їх обумовленості обернено намагніченими породами.

Згідно з картою (див. рис. 1), більшість островів архіпелагу, включно зі станцією «АВ», розташовані в області від'ємного магнітного поля з інтенсивністю від –50 до –300 нТл. На цьому фоні ряд пунктів геодинамічного полігону мають великі позитивні значення поля  $B_{a'}$  що доводить необхідність більш детального покриття цього району магнітними вимірами. Аномальне магнітне поле  $B_a$  на багатьох ділянках сильно диференційоване, з градієнтами до 20—40 нТл/м, це, очевидно, пов'язане з наявністю високонамагнічених вулканогенних порід.

Для кількісного оцінювання просторовочасових змін модуля індукції *B* і *B*<sub>a</sub> на геодинамічному полігоні було використано наявні в авторів цифрові дані на епоху 2008 р. та отримані в 2023—2024 рр. результати повторних замірів модуля *B*, приведених до епохи 2023 р. Зауважимо, що оскільки зйомка виконувалася GPS приймачами різного типу і в різні роки, то можливі певні розбіжності у визначенні точного розміщення деяких пунктів заміру модуля *В*.

Згідно з розрахунками (див. табл. 1) виявлено інтенсивні часові зміни локального магнітного поля. Як бачимо, в районі УАС «АВ» магнітне поле за 15 років зменшилось у середньому на 1300 нТл. Виявлені зміни аномального поля Ва пов'язані зі зміною магнітних параметрів порід і можуть бути спричиненими як активними геодинамічними явищами, зокрема тектономагнітними (п'єзомагнітний ефект), так і пасивними, викликаними віковою варіацією (SV) підмагнічуванням порід. Можливість помітного внеску підмагнічення в часові зміни є наслідком доволі великих значень вікового ходу геомагнітного поля в цьому регіоні (≈ від –80 до –90 нТл/рік). У статті [Orlyuk et al., 2024] розроблено технологію побудови карт модуля індукції геомагнітного поля з урахуванням точних вихідних даних модуля *B*, зміни поля *B*<sub>IGRF</sub> і розрахунку величини підмагнічуючого ефекту внаслідок вікової варіації. На підставі такої технології за вихідними даними 2008 р. було розраховано аномалію  $B_{a_p_{2023}}$  на 2023 р. (табл. 2), що дало змогу визначити величину  $\Delta \Delta B_a = B_a p_{2023} - B_{a 2023}$ .

Таким чином, для наявних пунктів отримано аномалію модуля індукції за розрахунком ( $B_{\rm a-p}_{2023}$ ) та за результатами зйомки 2023 р., що дало змогу визначити величину  $\delta B_{\rm a'}$  яка може бути зумовлена сучасними геодинамічними (в тому числі тектономагнітними) процесами.

Висновки. Згідно з результатами спостережень і розрахунків виявлено суттєве зменшення модуля індукції геомагнітного поля в районі станції «АВ» за 15 років у середньому на 1300 нТл. Унаслідок вікової варіації за результатами зйомок 2008

#### Список літератури

- Максимчук В.Ю., Бахмутов В.Г., Городыский Ю.М., Чоботок И.А. Состояние, результаты и перспективы тектономагнитных исследований в Западной Антарктике. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 1. С. 71—83.
- Роменець А.О., Орлюк М.І. Нові дані щодо просторово-часової структури геомагнітного поля в районі УАС «Академік Вернадський». Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища. Матеріали наукової конференції 6—10 жовтня 2008 р., Львів, С. 30—31.
- Bakhmutov, V., Yegorova, T., Bakarzhiyeva, M., Mytrokhyn, O., Shpyra, V., Orlyuk, M., Maksymchuk, V., Tarasov, V., Romenets, A., Nakalov, Y., Brillinh, Y., Romanyuk, O., Otruba, Y., & Litvinov, D. (2023). Magnetic field map of the Wilhelm Archipelago shelf zone, West Antarctica. Acta Geophysica, 72, 1693—1712.

і 2023 рр. для наявних пунктів було отримано аномалію модуля індукції  $B_{a-p_2023}$ . Розрахунок величини  $B_{a-p_2023}$  дав змогу визначити величину підмагнічуючого ефекту  $\Delta\Delta B_{a-2023}$  і величину  $\delta B_{a}$ , яка може бути зумовлена сучасними геодинамічними процесами.

Дослідження виконано в рамках НДР «Вивчення сучасної геодинаміки та сейсмічності Антарктичного півострова за результатами моніторингових досліджень в районі антарктичної станції «Академік Вернадський». Окрема подяка УАЦ за надані матеріали.

https://doi.org/10.1007/s11600-023-01190-6.

- Orlyuk, M.I., & Romenets, A.A. (2008). Geomagnetic maps of the region of the station «Academic Vernadsky»: geological and ecological aspects. Ukraine in Antarctica National Priorities and Global Integration. International Antarctic Conference IAC2008. May 23—25, 2008, Kyiv, Ukraine, International Polar Year 2007/8. Abstrscts, P. 89.
- Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., Bakarzhieva, M., & Orliuk, I. (2024). Development of geomagnetic field induction module maps for the territory of Ukraine. *Geodynamics*, (1), 74– 84. https://doi.org/10.23939/jgd2024.01.074.
- Renner, R.G.B., Sturgeon, L.J.S., & Garrett, S.W. (1985). Reconnaissance gravity and aeromagnetic surveys of the Antarctic Peninsula. British Antarctic Survey Scientific Reports, No. 110, 54 p.

## The geomagnetic field dynamics at Akademik Vernadsky Station based on the geodynamic study site observations

## A.O. Romenets<sup>1</sup>, Y.P. Sumaruk<sup>1</sup>, Y.S. Otruba<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine <sup>2</sup>SI «National Antarctic Research Center», Kyiv, Ukraine

One of the most important areas of geological and geophysical research in Antarctica is the study of the deep structure of the region. Of particular interest are studies of modern geodynamics of the Earth's crust, since large deposits of oil and gas and other types of minerals are often located near tectonically active faults. The thesis estimates the dynamics of the geomagnetic field for the time interval 2008—2023 and presents the results of calculating the magnetizing effect and the values of the  $\delta B_{\rm a}$  component, which may be caused by modern geodynamic processes.

Key words: magnetic field, anomalies, submagnetizing effect, geodynamics.

#### Reference

- Maksimchuk, V.Yu., Bakhmutov, V.G., Gorodysky, Yu.M., & Chobotok, I.A. (2008). The state, results and prospects of tectonomagnetic studies in West Antarctica. *Geophysical Journal*, *30*(1), 71—83 (in Russian).
- Orlyuk, M.I. (2005). *Report on the results of scientific research in the field of «geological and geophysical research» during the 10th Ukrainian Antarctic Expedition (2004—2005).* Kyiv: Publ. IGPH-UAC, 26 p. (in Ukrainian).
- Romenets, A.O., & Orlyuk, M.I. (2008). New data on the spatial-temporal structure of the geomagnetic field in the area of the UAS «Akademik Vernadsky». *Geophysical technologies for forecasting and monitoring the geological environment. Proc. of the scientific conference of October 6—10, 2008, Lviv* (pp. 30—31) (in Ukrainian).
- Bakhmutov, V., Yegorova, T., Bakarzhiyeva, M., Mytrokhyn, O., Shpyra, V., Orlyuk, M., Maksymchuk, V., Tarasov, V., Romenets, A., Nakalov, Y., Brillinh, Y., Romanyuk, O., Otruba, Y.,

& Litvinov, D. (2023). Magnetic feld map of the Wilhelm Archipelago shelf zone, West Antarctica. *Acta Geophysica*, 72, 1693—1712. https:// doi.org/10.1007/s11600-023-01190-6.

- Orlyuk, M.I., & Romenets, A.A. (2008). Geomagnetic maps of the region of the station «Academic Vernadsky»: geological and ecological aspects. Ukraine in Antarctica National Priorities and Global Integration. International Antarctic Conference IAC2008. May 23—25, 2008, Kyiv, Ukraine, International Polar Year 2007/8. Abstrscts, P. 89.
- Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., Bakarzhieva, M., & Orliuk, I. (2024). Development of geomagnetic field induction module maps for the territory of Ukraine. *Geodynamics*, (1), 74—84. https://doi.org/10.23939/jgd2024.01.074.
- Renner, R.G.B., Sturgeon, L.J.S., & Garrett, S.W. (1985). *Reconnaissance gravity and aeromagnetic surveys of the Antarctic Peninsula*. British Antarctic Survey Scientific Reports, No. 110, 54 p.

УДК 550.837

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322568

## Дослідження еконебезпечних геологічних процесів методами електророзвідки

## О.Я. Сапужак, О.В. Сироєжко, С.А. Дещиця, О.І. Підвірний, В.В. Коляденко, І.М. Мар'яш, Б.Я. Климкович, 2025

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Львів, Україна

Методи електророзвідки успішно застосовуються для вирішення завдань, пов'язаних з екологічно небезпечними геологічними процесами. Проведено дослі-

Citation: Sapuzhak, O.Ya., Syroiezhko, O.V., Deshchytsya, S.A., Pidvirnyi, O.I., Kolyadenko, V.V., Maryash, I.M., & Klymkovych, B.Ya. (2025). Research of environmentally hazardous geological processes using electroprospecting methods. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 306—312. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322568.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

дження з використанням методу зондувань становленням електромагнітного поля на різних об'єктах локального та регіонального значення. Виявлено аномалії питомого електричного опору, пов'язані із зонами розвитку небезпечних геологічних процесів: фільтраційно-суфозійних процесів та явищ просідання ґрунту — на території Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, сульфатний карст — на території школи у Бартатові Львівської області, на ділянках під забудову у Львові та вздовж колії залізниці у Чернівецькій області, соляний карст — на територіях Стебницького та Калусько-Голинського калійних родовищ. Отримані результати підтвердили на практиці ефективність вирішення геоекологічних завдань методом зондувань становленням електромагнітного поля.

**Ключові слова:** еконебезпека, геологічне середовище, карст, фільтраційносуфозійні процеси, метод зондувань становленням електромагнітного поля.

Вступ. Розвиток екологічно небезпечних процесів у геологічному середовищі найчастіше відбувається на глибинах перших сотень метрів, що має значний вплив на умови життєдіяльності людини. На початковій стадії розвитку негативних процесів (карстових, фільтраційно-суфозійних, зсувних) відбуваються суттєві зміни фізичних характеристик (електропровідність, питомий електричний опір (ПЕО)) геологічних порід, що створює передумови для їх виявлення методами електророзвідки, зокрема, методом електрорезистивної томографії (ЕРТ), що широко застосовується закордонними дослідниками [Kiernan et al., 2021; Jendruś et al., 2023]. Мижу таких задач використовуємо метод зондувань становленням електромагнітного поля (3C) [Deshchytsya et al., 2016], який має суттєву перевагу над ЕРТ у локальності спостережень. Наприклад, для досягнення глибинності 50 м у методі ЗС використовується генераторний контур 20×20 м<sup>2</sup>, а для ЕРТ необхідно рознести систему електродів щонайменше на 100 м. Тому мета роботи — вирішення завдань з виявлення зон розвитку еконебезпечних процесів у верхніх шарах геологічного середовища (перші сотні метрів) за допомогою електророзвідувального методу зондувань становленням електромагнітного поля.

Об'єкти і методи дослідження. Об'єктами досліджень були ділянки (рис. 1) розвитку негативних геологічних процесів: фільтраційно-суфозійні та просадні («ІФН-ТУНГ»), сульфатний карст («Бартатів», «Будова», «Залізниця»), соляний карст («Стебник», «Хотінь»), їх детальніший опис буде надано далі разом з результатами досліджень. Крім поділу за видами процесів, можна класифікувати ділянки досліджень з огляду на можливі наслідки розвитку екологічно небезпечних процесів — локального («ІФНТУНГ», «Бартатів», «Будова») і регіонального («Залізниця», «Стебник», «Хотінь») масштабів.

Спостереження виконувались методом ЗС у модифікації «контур у контурі» (вимірювальний посеред генераторного), розміри яких залежать від діапазону необхідної глибини спостережень. Для глибин до 100 м використовувалися апаратура «Стадія» або «Стадія-М», розробки КВ ІГФ НАН України, а глибше — «Імпульс-З» (Росія).

Результати досліджень. Розглянемо методику проведення спостережень методом ЗС та їх інтерпретацію на прикладі ділянки «Бартатів» — території навчальновиховного комплексу в с. Бартатів Львівської області. Тут, поблизу розпочатого будівництва прибудови до основної споруди школи, утворилась карстова лійка діаметром близько 8—10 м. Пробурена поруч свердловина виявила у гіпсовому горизонті на глибині 42—44 м карстову порожнину. Завданням електророзвідувальних досліджень методом ЗС було встановлення зони поширення карсту, його потужності, визначення загроз для прибудови та будівлі школи.

За наявності свердловини на ділянці проводяться параметричні спостереження — виконується зондування максимально близько до свердловини і результати їхньої геоелектричної інтерпретації порівнюють-



Рис. 1. Розташування ділянок дослідження негативних геологічних процесів (числа у червоних колах): 1— «Будова», 2— «Школа», 3— «Стебник», 4— «Хотінь», 5— «ІФНТУНГ», 6— «Залізниця». Fig. 1. Location of the study areas of negative geological processes (numbers in red circles): 1— «Construction», 2— «School», 3— «Stebnyk», 4— «Khotyn», 5— «IFNTUOG», 6— «Railway».

Гірська порода, св. 9	Питомий електрич- ний опір, Ом·м, ПК20
Піски (водонасичені)	12—17
Суглинки	15—80
Глини	1—10
Гіпси: щільні тріщинуваті, незначно закарстовані закарстовані	$15-200 \\ 6-15 \\ 1-6$
Пісковики	понад 100

Відповідність гірської породи та її питомого електричного опору

ся з геологічною колонкою за даними буріння для встановлення відповідності між літологією порід, їх станом та ПЕО. Результати таких досліджень на ділянці «Бартатів» наведено у таблиці. Далі виконуються профільні спостереження, за результатами яких будуються геоелектричні розрізи ПЕО, а також за необхідності — їх площинні розподіли. Інтерпретацію результатів ЗС виконано програмним пакетом В.І. Мамонтова, що базується на алгоритмах обробки В.А. Сідорова. Електромагнітні зондування відпрацьовано апаратурою «Стадія» з розмірами контурів 20×20 м<sup>2</sup> (генераторний) та 10×10 м<sup>2</sup> (вимірювальний). Геоелектричний розріз VI з геологічною інтерпретацією наведено на рис. 2, а схему електророзвідувальних профілів — на рис. 3.

За значеннями ПЕО та їх відповідності



Рис. 2. Геоелектричний розріз VI з геологічною інтерпретацією: 1 — пісок, 2 — суглинки, 3 — глина, 4 — гіпс, 5 — пісковик, 6 — пікет ЗС та його номер, 7 — літологічна границя. Fig. 2. Geoelectric section VI with geological interpretation: 1 — sand, 2 — loam, 3 — clay, 4 — gypsum, 5 — sandstone, 6 — TEM picket and its number, 7 — lithological boundary.

геологічним породам здійснюється геологічна інтерпретація геоелектричних розрізів, виділяються літологічні границі та шари. Зокрема, для профілю VI на глибинах 25-45 м виділено гіпсовий горизонт (див. рис. 2), у межах якого спостерігаються ПЕО від 1 до 300 Ом·м. Значення 5 Ом·м і менше практично вказують на наявність карсту, заповненого глино-гіпсо-водяною суспензією з низьким ПЕО. Виконавши такі побудови для всіх профілів, знаходимо мінімальні значення ПЕО для гіпсоангідритового шару. Площинна карта (див. рис. 3), побудованими за такими значеннями, дає змогу встановити ступінь закарстованості та окреслити небезпечну зону. Як бачимо, для основної будівлі школи гіпсовий горизонт є щільним і немає загрози провальних явищ. Проте поблизу новобудови, крім вже існуючого провалля, є зони сильної закарстованості, які надалі можуть призвести до утворення нових карстових лійок, що стане небезпечним для продовження будівництва.

На ділянці «ІФНТУНГ» необхідність проведення досліджень виникла у зв'язку із просіданнями 1-го навчального корпусу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та виникненням суттєвих тріщин у стінах. За результатами спостережень ЗС (прилад «Стадія») побудовано геоелектричні розрізи до 40 м і встановлено на глибинах 2—20 м аномалії ПЕО (менше 5 Ом⋅м), пов'язані з підвищеною фільтрацією води. Разом з особливостями геологічної будови, серед яких і наявність тут у минулому русел річок, це свідчить про фільтраційносуфозійні процеси та можливі подальші нерівномірні просідання будівлі. Як запобіжний захід рекомендовано місця для перекриття руху підземних вод.

На ділянці під забудову у Львові («Будова») основним завданням досліджень методом ЗС було виявлення і визначення просторових характеристик карстових утворень з метою оцінювання можливості реалізації існуючого проєкту будівництва.



Рис. 3. Карта ізоліній розподілу мінімальних значень питомого електричного опору гіпсів на ділянці «Бартатів»: *а* — карст, *б* — тріщинуваті, *в* — щільні.

Fig. 3. Isoclines of the resistivity minimums resistivity of gypsum in the «Bartativ» plot: a — karst,  $\delta$  — fractured, B — dense.

Отримані результати ЗС дали змогу за значеннями ПЕО (менше 5 Ом·м) на глибинах 15—30 м локалізувати тріщинуваті та закарстовані зони гіпсоангідритового шару та рекомендувати внести зміни до проєкту будівництва.

Об'єкт «Залізниця» (ділянка вздовж колії Чернівецької залізниці) загальною протяжністю 12 км проходить через карстонебезпечну територію, основним завданням тут було виявлення зон розвитку карстопровальних процесів та оцінювання ступеня небезпеки для залізничної колії. Спостереження ЗС виконано апаратурою «Стадія» і «Стадія-М», за результатами яких побудовано геоелектричні розрізи. За значеннями ПЕО встановлено границі гіпсоангідритового горизонту, на глибинах 25—45 м у ньому виявлено зони аномального ПЕО (понад 400 Ом·м), пов'язані з карстовими утвореннями. На підставі цього побудовано карту ступеня небезпеки ділянки досліджень, причому зона високого ступеня знаходиться приблизно посередині ділянки та має довжину близько 1,8 км. Загалом карстові процеси охоплюють щонайменше 6,2 км, що становить більше половини загальної довжини ділянки.

Необхідність проведення досліджень на ділянці «Стебник» виникла у зв'язку з активізацією фільтраційно-суфозійних і карстових процесів над шахтними полями Стебницького калійного родовища з утворенням провалля діаметром близько 250 м і глибиною понад 30 м. Основними завданнями на цій ділянці були виявлення загроз руйнування автодороги між м. Трускавець та с. Солець, житлових та інших будівель у селах Модричі та Солець, а також об'єктів інфраструктури — газо- та водопроводів, високовольтних ліній електропередач тощо. Спостереження ЗС виконано апаратурою «Стадія» та «Імпульс-3», отримано розрізи глибиною до 400 м. За значеннями ПЕО (менше 5 Ом·м) встановлено аномальні зони, пов'язані з підвищеною фільтрацією підземних вод до шахтних виробок, активізацією карстового процесу та загрозою для цілісності автодороги поблизу села Солець. На території обох сіл не виявлено зон небезпечних процесів, здатних зруйнувати будівлі чи інфраструктуру.

На території проходження магістрального газопроводу у зоні впливу шахтного поля «Хотінь» Калусько-Голинського калійного родовища (ділянка «Хотінь») основним завданням електророзвідувальних досліджень було оцінювання стану видобувних камер і міжкамерних ціликів відпрацьованого гірничого масиву з огляду на можливі просідання поверхні та руйнування чи пошкодження магістрального газопроводу. Для спостережень ЗС використано апаратуру «Стадія» та «Імпульс-З», що дало змогу отримати геоелектричні розрізи глибиною до 300 м і встановити, що видобувні камери в центрі шахтного поля вже частково зруйновані та заповнені гірськими породами верхніх горизонтів (однакові ПЕО, 10—20 Ом·м). Проникнення ґрунтових вод з вищезалягаючих горизонтів (аномалії ПЕО менше 5 Ом·м) у розташування відпрацьованих шахтних камер не виявлено, тому можна вважати, що стан геологічного середовища у зоні шахтного поля «Хотінь» є стабільним і не створює загрози цілісності магістрального газопроводу.

Висновки. Проведені дослідження вирішили завдання виділення зон розвитку еконебезпечних процесів (фільтраційносуфозійних, карстових) локального («Бар-

### Список літератури

- Deshchytsya, S.A., Pidvirnyj, O.I., Romanyuk, O.I., Sadovy, Yu.V., Kolyadenko, V.V., Savkiv, L.G., & Myshchyshyn, Yu.S. (2016). Evaluation of the state of the ecologically problematic mining and industrial objects in Kalush region by electromagnetic methods and their monitoring. *Science and Innovation*, *12*(5), 41—51. https:// doi.org/10.15407/scine12.05.041.
- Jendruś, R., Strozik, G., & Sowiński, D. (2023). Application of Electrical Resistivity Tomography for the Assessment of Sinkhole Hazard to Im-

татів», «Будова», «ІФНТУНГ») і регіонального («Залізниця», «Стебник», «Хотінь») масштабів за допомогою методу зондувань становленням електромагнітного поля. Можливості визначення границь літологічних шарів, оцінювання їх стану за питомим електричним опором, виявлення аномальних зон розвитку еконебезпечних геологічних процесів вказують на геологічну інформативність методу ЗС і перспективи його застосування для різноманітних завдань геоекологічного, інженерно-геологічного та гідрогеологічного спрямування.

prove Public Health and Safety Conditions on Post-Mining Lands. *Polish Journal of Environmental Studies, 32*(4), 3627—3644. https://doi. org/10.15244/pjoes/163440.

Kiernan, M., Jackson, D., Montgomery, J., Anderson, J.B., McDonald, B.W., & Davis, K.C. (2021). Characterization of a Karst Site using Electrical Resistivity Tomography and Seismic Full Waveform Inversion. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 26(1), 1943–2658. https://doi.org/10.32389/jeeg20-045.

# Research of environmentally hazardous geological processes using electroprospecting methods

## O.Ya. Sapuzhak, O.V. Syroiezhko, S.A. Deshchytsya, O.I. Pidvirnyi, V.V. Kolyadenko, I.M. Maryash, B.Ya. Klymkovych, 2025

Carpathian Branch of the S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

Electroprospecting methods are successfully used to solve problems related to environmentally hazardous geological processes. The study was carried out using the time domain electromagnetic method at various objects of local and regional importance. We detected anomalies of apparent resistivity are connected with the zones of development of hazardous geological processes: filtration-suffusion and subsidence on the territory of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, sulfate karst on the territory of a school in the Bartativ, Lviv oblast, on a construction site in Lviv and along the railway track in Chernivtsi oblast; salt karst on the territories of the Stebnyk and Kalush-Holyn potash deposits. The results confirmed the effectiveness of solving geoecological problems using the time domain electromagnetic method.

**Key words:** environmental hazard, geological environment, karst, filtration-suffusion processes, time domain electromagnetic method.

#### References

- Deshchytsya, S.A., Pidvirnyj, O.I., Romanyuk, O.I., Sadovy, Yu.V., Kolyadenko, V.V., Savkiv, L.G., & Myshchyshyn, Yu.S. (2016). Evaluation of the state of the ecologically problematic mining and industrial objects in Kalush region by electromagnetic methods and their monitoring. *Science and Innovation*, *12*(5), 41—51. https:// doi.org/10.15407/scine12.05.041.
- Jendruś, R., Strozik, G, & Sowiński, D. (2023). Application of Electrical Resistivity Tomography for the Assessment of Sinkhole Hazard to Im-

УДК 550.83

prove Public Health and Safety Conditions on Post-Mining Lands. *Polish Journal of Environmental Studies*, *32*(4), 3627—3644. https://doi. org/10.15244/pjoes/163440.

Kiernan, M., Jackson, D., Montgomery, J., Anderson, J.B., McDonald, B.W., & Davis, K.C. (2021). Characterization of a Karst Site using Electrical Resistivity Tomography and Seismic Full Waveform Inversion. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 26(1), 1943–2658. https://doi.org/10.32389/jeeg20-045.

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322569

# Геофізичні дослідження ділянки імовірного поховання гетьмана Виговського

## О.Я. Сапужак, О.В. Сироєжко, І.О. Чоботок, В.В. Коляденко, І.М. Мар'яш, І.І. Ярема, 2025

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Львів, Україна

За історичними джерелами поховання гетьмана Виговського може знаходитись у с. Руда Стрийського району Львівської області. Перед проведенням археологічних розкопок на ймовірній ділянці його розташування, поблизу церкви, необхідно було виявити перспективні для цього місця. З цією метою було застосовано комплекс геофізичних досліджень методами магніторозвідки та георадарного зондування. У результаті польових спостережень виявлено аномальні зони у магнітному полі. Також георадарні зондування зафіксували локальні неоднорідності, які переважно тяжіли до зон магнітних аномалій. За характером виявлені об'єкти можуть бути пошуковими археологічними об'єктами, а саме плитами давніх поховань і підземними залишками споруд.

**Ключові слова:** геофізичні методи, георадарні зондування, магніторозвідка, археологія, поховання гетьмана Виговського.

Вступ. Використання геофізичних методів (магніто- та електророзвідки) для вирішення різноманітних завдань в археології вперше було започатковано у Великобританії у 1940-х і 1950-х роках. Фахівці КВ ІГФ НАН України також неодноразово застосовували методи магніто- та електророзвідки у завданнях археології [Kuderavets et al., 2019, 2022]. Необхідність застосування геофізичних методів виникла і у зв'язку з пошуками поховання гетьмана Виговського, яке може знаходитись у с. Руда Стрийського району Львівської області (рис. 1, *a*).

**Об'єкти і методи досліджень.** Мета досліджень — вивчення верхнього шару геологічного середовища на обраній ділянці у

Citation: Sapuzhak, O.Ya., Syroiezhko, O.V., Chobotok, I.O., Kolyadenko, V.V., Maryash, I.M., & Yarema, I.I. (2025). Geophysical study of the probable burial site of Hetman Vyhovsky. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 312—317. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322569.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



Рис. 1. Розташування ділянок досліджень на карті Google Earth (*a*), схема профілів на ділянках досліджень (б) з номерами профілів магнітних (зліва) і георадарних (справа).

Fig. 1. Study area on the Google Earth map (a), a profiles on the research sites ( $\delta$ ) with the magnetic (left) and GPR profiles (right).



Рис. 2. Результати магнітних спостережень на ділянці І. Аномалії обведено лініями: червоною — магнітну, фіолетовою — георадар «MALA», синьою — георадар «OKO-2».

Fig. 2. Results of magnetic prospecting observations in Plot I. The anomalies are outlined in red (magnetic), purple (GPR «MALA»), and blue (GPR «OKO-2»).

с. Руда для виявлення ймовірних залишків давніх споруд і поховань, що може стати підставою для подальших археологічних робіт. Для польових геофізичних спостережень використано методи магніторозвідки та георадарних зондувань. Наші фахівці неодноразово успішно застосовували на різних історико-археологічних об'єктах і магніторозвідку [Kuderavets et al., 2022], і георадарні зондування, зокрема, на територіях Галицького та Пнівського замків, в історико-культурному заповіднику «Давній Пліснеськ» [Кудеравець та ін., 2019; Kuderavets et al., 2019]. У с. Руда використано магнітометр MagWalk, георадари «MALA» (250 МГц, глибинність до



Рис. 3. Радарограма («MALA») вздовж профілю 17 ділянки І. Лінією обведено аномальну зону. Fig. 3. Radarogram («MALA») along profile 17 of Plot I. The anomalous zone is outlined.



Рис. 4. Радарограми («OKO-2») уздовж профілів 20 (*a*) та 21 (б) ділянки І. Лініями обведено аномальні об'єкти. Fig. 4. Radarograms («OKO-2») along profiles 20 (*a*) and 21 (б) in Plot I. The anomalous objects are outlined.

10—12 м) та «ОКО-2» (400 МГц, до 6—8 м).

Геологічна характеристика району досліджень. У районі с. Руда геологічний розріз такий. Зверху — ґрунтово-рослинний шар потужністю 30—90 см. Далі — еоловоделювіальні (вітрово-схилового походження) та елювіальні відклади (кори вивітрювання), літологічно це товща лесоподібних суглинків і супісків потужністю 3,1—3,7 м. Нижче — алювіальні відклади річкового походження, що складають II надзаплавну терасу. Цей шар літологічно змінюється від пісків глинистих, суглинків піщанистих, інколи з прошарками торфу у верхній частині і галечниками з гравійно-піщаноглинистим заповнювачем — у нижній. Його потужність — 15—20 м.

Результати досліджень. Передусім



Рис. 5. Радарограми («ОКО-2») уздовж профілів 107 (*a*), 110 (*б*) та 111 (*в*) ділянки ІІ. Лініями обведено аномальні об'єкти.

Fig. 5. Radarograms («OKO-2») along profiles 107 (*a*), 110 ( $\delta$ ) and 111 (*b*) in Plot II. The anomalous objects are outlined .

Б. Купльовський (ІГФ НАН України) та А. Віват (Інститут геодезії, НУ ЛП) під час рекогносцирувального виїзду георадаром «EasyRad» (250 МГц) на ділянці II (рис. 1, б) виявили неоднорідності, що можуть бути шуканими об'єктами. Далі вже фахівці КВ ІГФ НАН України системно відпрацювали ділянки І та II (див. рис. 1) паралельними профілями завдовжки 30 м з кроком між ними 0,5 м для георадарних зондувань та 1 м для магніторозвідки. Розділення ділянок викликано проходженням паркану, що огороджує територію існуючої церкви.

За результатами магнітних спостережень на ділянці І у південно-західній частині виділено позитивну аномалію амплітулінією, рис. 2). На жаль, ділянка II примикає до будівлі церкви, і результати спостережень дуже спотворені прибудинковими комунікаціями, що спричинили надпотужну аномалію амплітудою від –800 до 900 нТл, на фоні якої було неможливо виявляти інші неоднорідності.

дою від 50 до 120 нТл (обведено червоною

Результати георадарних зондувань чіткіше відображають аномальні зони. Для прикладу, наведемо радарограму вздовж профілю 17 ділянки І, де ми бачимо суттєві порушення ґрунту, хоча і не достатньо детально для ідентифікації окремих об'єктів (обведено червоною лінією, рис. 3). Проте виявлена аномальна структура доволі чітко виділяється до глибини 2 м, простягається вздовж на 4—5 м і має ширину 3—4 м (обведено фіолетовою лінією, див. рис. 2).

Радарограми «ОКО-2» виявилися значно детальнішими. На них можна не тільки спостерігати загальні контури аномальних зон, а й виділяти геологічні шари. Так, практично на усіх радарограмах на глибині 5—6 м спостерігається чітка границя, найімовірніше, з нижнім гравійно-гальковим горизонтом (рис. 4, 5).

Також на глибині близько 3 м, хоча і менш чітко, простежується межа, ймовірно, між суглинками та супісками. Крім того, ідентифікуються окремі локальні неоднорідності, що можуть бути шуканими об'єктами. Наприклад, на профілі 20 ділянки I (див. рис. 4, а) зафіксовано дві вертикальні структури невеликої ширини, які простягаються десь з глибини 0,5 м практично до гравійно-галькового горизонту приблизно 6 м, який може бути водоносним. На сусідньому профілі 21 (рис. 4, б) ці самі вертикальні об'єкти спостерігаються майже впритул. Таке відображення на радарограмах може належати залишкам кам'яної кладки, наприклад колодязя чи вертикального ходу. Праворуч знаходиться ще один об'єкт, який особливо чітко виявляється на профілі 21. Між двома вертикальними структурами, що розміщуються на відстані близько 2 м і простежуються до глибини 3—4 м, зафіксовано аркоподібну неоднорідність (на глибині 1 м), що може бути, наприклад, залишками підвального приміщення із склепінчастою стелею давньої споруди. Зону цих аномалій обведено синьою лінією на рис. 2.

На ділянці II таких глибоких неоднорідностей не було виявлено. Проте, зафіксовано низку локальних об'єктів, які дають характерні повторювальні аномалії майже від поверхні і до глибини близько 3 м (див. рис. 5). Так на радарограмах можуть відображатись об'єкти з різко відмінними від навколишнього ґрунту параметрами (наприклад, електрокабелі, труби, бетонні чи кам'яні плити), які залягають близько до поверхні, але викликають так звані «хибні відбиття», що прямують у глибину. Зважаючи на те, що колись на території ділянки II був цвинтар, деякі з цих локальних об'єктів можуть виявитись кам'яними надгробками давніх поховань.

Висновки. Георадарні зондування та магніторозвідка дали можливість отримати детальні результати на ділянці досліджень. Виділено границі геологічних шарів, локалізовано зони аномальних порушень середовища та прослідковано їх простягання і у площині, і з глибиною — до 3—4 м і навіть до 6 м (ділянка І). Виявлено локальні неоднорідності, які можуть бути залишками давніх підземних споруд (ділянка І) і кам'яними надгробками поховань (ділянка ІІ). Рекомендовано проводити археологічні розкопки на ділянці І — на профілях 20, 21 на відстані 22—28 м від їх початку.

### Список літератури

- Кудеравець Р., Чоботок І., Коляденко В., Сапужак О., Романюк О. Перспективи вивчення Пліснеського археологічного комплексу за допомогою геофізичних методів. В кн.: *Пліснеські старожитності*. Вип. 4. Львів: Растр-7, 2019. С. 144—148.
- Kuderavets, R., Chobotok, I., Menshov, O., Shelep, V., & Fylypchuk, A. (2019). Plisnesk archeological complex. Some results of magnetometry prospection. EAGE. *Monitoring*,

*2019*, 1—5. https://doi.org/10.3997/2214-4609. 201903251.

Kuderavets, R., Tkachuk, T., Chobotok, I., Nakalov, Y., Pyrizhok, N., & Kryva, Kh. (2022). Practice of using proton precession and fluxgate magnetometers in the prospection of Cucuteni-Trypillian settlement Zalukva on the Upper Dniester (Ukraine). Monitoring, 2022, 1—5. https:// doi.org/10.3997/2214-4609.2022580142.

# Geophysical study of the probable burial site of Hetman Vyhovsky

O.Ya. Sapuzhak, O.V. Syroiezhko, I.O. Chobotok, V.V. Kolyadenko, I.M. Maryash, I.I. Yarema, 2025

Carpathian Branch of the S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

According to historical sources, the burial of Hetman Vyhovsky may be located in the village of Ruda, Stryi district, Lviv region. Before conducting archaeological excavations at the probable site of its location, near a church, it was necessary to identify promising sites for this place. For this purpose, a complex of geophysical studies using magnetic reconnaissance and ground-penetrating radar sounding methods was applied. Anomalous zones in the magnetic field were detected. Also, ground-penetrating radar sounding recorded local inhomogeneities, mainly located in zones of magnetic anomalies. The nature of the discovered objects indicates that they may be the target archaeological objects, namely, ancient burials and underground remains of structures.

**Key words**: geophysical methods, ground-penetrating radar sounding, magnetic reconnaissance, archeology, burial of Hetman Vyhovsky.

#### References

- Kuderavets, R., Chobotok, I., Kolyadenko, V., Sapuzhak, O., & Romanyuk, O. (2019). The prospects for the study of Plisnesk archaeological complex by geophysical methods. In *Plisnesk Antiquities* (Is. 4, p. 144—148). Lviv: Rastr-7 (in Ukrainian).
- Kuderavets, R., Chobotok, I., Menshov, O., Shelep, V., & Fylypchuk, A. (2019). Plisnesk archeological complex. Some results of magnetome-

try prospection. EAGE. *Monitoring*, 2019, 1—5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903251.

Kuderavets, R., Tkachuk, T., Chobotok, I., Nakalov, Y., Pyrizhok, N., & Kryva, Kh. (2022). Practice of using proton precession and fluxgate magnetometers in the prospection of Cucuteni-Trypillian settlement Zalukva on the Upper Dniester (Ukraine). Monitoring, 2022, 1—5. https:// doi.org/10.3997/2214-4609.2022580142.

УДК 556.332(477)

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322570

## До питання експертного оцінювання пошуків підземних вод у Кіровоградській області

## В.К. Свистун<sup>1</sup>, О.П. Лазебник<sup>1</sup>, П.Г. Пігулевський<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Дніпровська геофізична експедиція «Дніпрогеофізика», Дніпро, Україна <sup>2</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Citation: Svistun, V.K., Lazebnyk, O.P., & Pigulevsky, P.G. (2025). On the issue of expert evaluation of ground-water exploration in the Kirovograd oblast. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 317—322. https://doi.org/10.24028/gj. v47i2.322570.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Розглянуто результати експертного оцінювання електророзвідувальних робіт на території Кіровоградської області з урахуванням зведених великомасштабних гравіметричних карт. Було переінтерпретовано результати пошуків підземних вод у тріщинуватій зоні кристалічних порід архею—протерозою. Використання гравірозвідувальних даних значно підвищує ефективність робіт з виділення та локалізації обводнених порід і зменшує економічні витрати під час пошуків підземних вод. Запропонований комплекс геофізичних робіт можна використовувати як удосконалену методику пошуку питних підземних вод на територіях, обумовлених, як особливостями геологічної будови Українського щита, так і впливом техногенних чинників (житлові й промислові комунікаційні мережі та інші антропогенні складові).

Отримані закономірності рекомендовано враховувати у процесі пошуків і розвідки підземних вод для їх господарсько-питного використання.

**Ключові слова**: Кіровоградська область, Український щит, Інгульський мегаблок, зона тріщинуватості, підземні води, геофізичні дослідження.

Вступ. Протягом багатьох років забезпечення населення півдня України питною водою було складною державною проблемою, до якої ще додаються господарськофінансові труднощі, викликані військовою агресією РФ. Унаслідок пошкоджень території вибуховими зарядами поверхневі і приповерхневі води забруднюються різними токсичними хімічними елементами [Люта, 2023; Пігулевський, Свистун, 2024].

Значну частину території України займає Український щит, природні умови якого не сприяють формуванню значних ресурсів підземних вод. Основним джерелом водопостачання на території Кіровоградської області є тріщинні води кристалічного фундаменту. Буріння свердловин різними геологічними організаціями показало доволі низьку їх ефективність, що пов'язано з невитриманістю основного водоносного горизонту за якістю і водозбагаченістю, що викликає проведення додаткового опереджувального буріння свердловин на кожній з пошукових ділянок. При вивченні гідрогеологічних умов територій також необхідно враховувати зони розривних дислокацій, які є колекторами підземних вод, а їх розкритість і напрямлення значно впливають на потенційну наявність підземних вод.

Метою дослідження є визначення запасів підземних вод у тріщинуватій зоні кристалічних порід архею—протерозою з подальшим аналізом їх освоєння. Для площового картування розломної тектоніки нашими дослідженнями було доведено перевагу використання детальних гравіметричних знімань [Пігулевський, Свистун, 2024], які в комплексі з профільними електророзвідувальними роботами значно підвищують ефективність робіт на пошуки підземних вод.

**Об'єкти і методи дослідження.** Роботи щодо пошуку питних вод були виконані Дніпропетровською геофізичною експедицією «Дніпрогеофізика» у 2005—2007 рр. для виявлення перспективних ділянок на пошуки підземних вод у складних геологічних умовах. Найважливішим для водопостачання є горизонт тріщинних вод, який характеризується строкатим хімічним складом, зумовленим природними і антропогенними чинниками їх формування.

Докембрійські кристалічні породи є основою пошукового геологічного розрізу. Природні виходи порід архейського та протерозойського віку спостерігаються по долинах рік та у глибоких ярах. Тріщинуватість у кристалічних породах спостерігається до глибин 90—100 м і поступово згасає з глибиною. Кора вивітрювання кристалічних порід характеризується нерівномірним розвитком.

На площі досліджень можливе використання горизонту нижнього неогену. Обидва з названих горизонтів характеризуються мінливими показниками дебітів свердловин і хімічним складом підземних вод. Приблизно половина свердловин, пробурених раніше, мають невеликі дебіти (<2—3 м<sup>3</sup>/год), значна їх кількість має мінералізацію >1,5 г/дм<sup>3</sup>. Тому для отримання однієї продуктивної свердловини з придатною питною водою попередньо потрібно пробурити приблизно дві пошукові свердловини.

Більшість дослідників, які проводили гідрогеологічні роботи в цьому районі, звертали увагу на підвищену мінералізацію води тріщинуватої зони корінних порід. Крім того, частина гідрогеологічних свердловин, пробурених на дослідженій території, за геоморфологічними ознаками виявилась безводною або малодебітною. За досвідом робіт у суміжних районах [Стан..., 2021; Пігулевський, Свистун, 2024] відомо, що регіональні довгоіснуючі розломи, які добре виділяються в гравіметричних полях, а також за геологічними та геоморфологічними ознаками, здебільшого мають дуже складну зональну будову, їх центральні частини складені сильно роздробленими породами, часто окислені до каоліну, з явно заглинизованими тріщинами. Водопровідні властивості таких зон надзвичайно низькі. У периферійних частинах великих розломів ступінь перетворення порід зменшується, тріщини більш відкриті і, як наслідок, більш водоносні. Переважно питомий дебіт свердловин, пройдених у таких зонах, сягає 0,5— 1,5 л/с. Якість тріщино-жильних вод серед кори вивітрювання зазвичай прийнятна. З метою виявлення та розпізнання таких зон працівниками ДГЕ «Дніпрогеофізика» виконано наземні геофізичні роботи. Було застосовано електророзвідку [Свистун,



Рис. 1. Результати електророзвідувальних робіт методом ДОЗ-ВП: 1— прогнозні зони тріщинуватості; 2— рекомендована свердловина; 3— розташування живлячої лінії; 4— розташування приймальної лінії; 5— лінії фіксації екранних екстремумів від розлому.

Fig. 1. Electrical exploration using the RCI-IP method: 1 - predicted fracture zones; 2 - recommended well; 3 - the feed line; 4 - the receiving line; 5 - lines of fixation of screen extremes from the fault.



Рис. 2. Карта локальних аномалій гравітаційного поля площі досліджень: 1 — положення профілів ДОЗ-ВП; 2 — положення розвідувальних свердловин.

Fig. 2. Local anomalies of the gravity field: *1* — position of RCI-IP profiles; *2* — position of exploration wells.

Пігулевський, 2023] методом дипольного одновісного зондування в модифікації викликаної поляризації (ДОЗ-ВП).

Результати та їх обговорення. При розгляді ефективності матеріалів електророзвідки при виборі точок для закладення свердловин їх було проаналізовано з урахуванням даних польових гравіметричних знімань масштабу 1:25000 різних років [Пігулевський, Свистун, 2024].

На рис. 1 показано результати, отримані електророзвідкою методом ДОЗ-ВП у 2005—2007 рр. За результатами обробки та інтерпретації спостережених даних були виділені прогнозні зони тріщинуватості поблизу сіл Інгульське та Докучаєве з рекомендованими точками для закладення розвідувальних свердловин. Досвід поєднання результатів електророзвідки в різних модифікаціях і гравірозвідки показує, що їх комплексна інтерпретація дає можливість уточняти раніше виявлені положення тектонічних порушень, зон локальних лінійних занурень та ін.

Після нанесення на карту локальних аномалій гравітаційного поля положення профілів ДОЗ і місць розташування розвідувальних свердловин (рис. 2) стало можливим прокорелювати тектонічні порушення та локальні занурення, які виявлені на окремих профілях за результатами досліджень методом ДОЗ (див. рис. 1).

Складені карти дають можливість сформувати загальний геолого-тектонічний каркас площі та якісно оцінити місця вибору проєктних профілів для закладення свердловин. Аналіз результатів досліджень показав, що чим детальнішим є гравіметричне знімання, тим точніше можливо закартувати геолого-тектонічні неоднорідності у верхній частині осадового чохла і в кристалічному фундаменті. Ефективність застосування гравірозвідки підвищується з переходом від великомасштабних до детальних досліджень [Пігулевський, Свистун, 2024]. Отже, комплексна інтерпретація результатів ДОЗ і гравірозвідки дає змогу уточнити положення тектонічних порушень, зон локальних лінійних занурень та виявити серії сполучених з ними зон підвищеної тектонічної тріщинуватості.

Оцінювання гідрогеологічної перспективності площі досліджень. Зіставлення результатів комплексування електро- і гравірозвідувальних робіт з даними випробування свердловин як у процесі виконання геофізичних робіт, так і після їх
завершення дало змогу переглянути достовірність виконаних досліджень. Так, дебіт в розвідувально-експлуатаційній свердловині 59 становить 264 м<sup>3</sup>/добу, а в свердловині 38 — 48 м<sup>3</sup>/добу. Свердловину 59 (див. рис. 2) було закладено у вузлі зон субширотного та північно-західного розломів, а свердловину 38 пробурено західніше від субмеридіонального розлому, що обмежує зону північно-західного простягання. Таке положення цієї свердловини, на наш погляд, і зумовлює її знижений дебіт.

**Висновки**. Виконаний комплексний аналіз раніше отриманих матеріалів електророзвідки та буріння показав, що значну роль при їх переінтерпретації відіграють детальні гравіметричні знімання. Використання гравірозвідувальних даних може значно підвищити ефективність робіт з виділення та локалізації обводнених порід при зменшенні економічних

### Список літератури

- Люта Н. Сучасний стан і перспективи використання підземних вод водоносного горизонту тріщинуватої зони кристалічних порід (гідрогеологічна область Українського щита). Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Геологія. 2023. № 2(101). С. 111—116. http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.16.
- Пігулевський П.Г., Свистун В.К. Пошуки підземних воду зоні зчленування Приазовського мегаблока Українського щита з Донбасом. *Геофіз. журн.* 2024. Т. 46. № 3. С. 111—128.

витрат під час пошуків підземних вод.

Результати комплексної інтерпретації матеріалів електро- і гравірозвідувальних досліджень засвідчують, що найбільшим обводненням виділяються породи в межах зон великих розривних порушень з інтенсивною площинною тріщинуватістю відкритого типу. Застосування матеріалів гравірозвідки дало змогу виявити такі ділянки в зонах перетину північно-західних порушень з субшироотними.

З огляду на викладене слід скоригувати методики пошуків і розвідки підземних вод для більш перспективного використання всіх можливих джерел водопостачання з максимально наближених до споживача водозаборів, а також підземних вод з незначними запасами і з підвищеною мінералізацією, при умові урахування наявних сучасних технологій їх очищення та доведення до необхідної якості.

https://doi.org/10.24028/gj.v46i3.306483.

- Свистун В.К., Пігулевський П.Г. Результати геофізичних досліджень на острові Зміїний. *Геофіз. журн.* 2023. Т. 45. № 2. С. 134—146. https://doi.org/10.24028/gj.v45i2.278341.
- Стан підземних вод України: щорічник. Київ: Вид. Державної служби геології та надр України, Державного науково-виробничого підприємства «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2021, 124 с.

# On the issue of expert evaluation of groundwater exploration in the Kirovograd oblast

V.K. Svistun<sup>1</sup>, O.P. Lazebnyk<sup>1</sup>, P.G. Pigulevsky<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Dnipropetrovsk Geophysical Expedition «Dniprogeofizika», Dnipro, Ukraine <sup>2</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The results of expert assessment of electrical exploration in the Kirovograd oblast are considered, taking into account the compiled large-scale gravimetric maps. The results of groundwater searches in the fractured zone of crystalline rocks of the Archean-Proterozoic were reinterpreted. Using gravity exploration data significantly increases the efficiency

of isolation and localization of water-saturated rocks and reduces economic costs in the search for groundwater. The proposed complex of geophysical works can be used as an improved method for searching for potable groundwater in territories determined both by the peculiarities of the geological structure of the Ukrainian Shield and by technogenic factors (residential and industrial communication networks and other anthropogenic components). The regularities are recommended to be taken into account in the process of searching and exploring groundwater for economic and household use.

**Key words**: Kirovohrad oblast, Ukrainian Shield, Ingul Megablock, fracture zone, groundwater, geophysical research.

#### References

- Lyuta, N. (2023). Current state and prospects of theuse of groundwater of the aquarium of the fractured zone of crystalline rocks (hydrogeological region of the Ukrainian Shield). Bulletin of Taras Shevchenko National University. Geology, (2), 111—116. http://doi.org/ 10.17721/1728-2713.101.16 (in Ukrainian).
- Pigulevskiy, P.G., & Svistun, V.K. (2024). Search for fresh water at the border of the Priazov megablock and the Donbas. *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(3), 111—128. https://doi.org/

10.24028/gj.v46i3.306483 (in Ukrainian).

- Svistun, V.K., & Pigulevskiy, P.G. (2023). Results of geophysical research on Zmiiny Island. *Geofizychnyi Zhurnal*, 45(2), 134—146. https://doi. org/10.24028/gj.v45i2.278341 (in Ukrainian).
- State of groundwater of Ukraine, yearbook. (2021). Kyiv: State Geology and Subsoil Service of Ukraine, State Scientific and Production Enterprise «State Information Geological Fund of Ukraine», 124 p. (in Ukrainian).

УДК 550.383

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322571

# Діагностика джерел геомагнітних варіацій супербурі 10—11 жовтня 2024 р. за даними українських геомагнітних обсерваторій

# Т.П. Сумарук, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Викладено результати аналізу магнітосферно-іоносферних джерел геомагнітних варіацій для супербурі 10—11 жовтня 2024 р. Ця подія сталася у максимумі 25-го циклу сонячної активності Вольфа та на початку 100-річного циклу геомагнітної активності. У цей період відбуватимуться супербурі, подібні до бур жовтня—листопада 2003 р.

Для аналізу джерел варіацій використано 1-хвилинні значення українських геомагнітних обсерваторій. Ідентифікацію джерел геомагнітних варіацій проведено за даними стосовно індексів геомагнітної активності та модельними розрахунками. Діагностовано вплив магнітосферних джерел та авроральних іоносферних електроструменів у варіацію середніх широт. Обчислено величину внеску кожного джерела у варіацію геомагнітного поля.

**Ключові слова**: сонячна та геомагнітна активність, сонячний цикл, магнітосферноіоносферна система струмів.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Citation: Sumaruk, T.P. (2025). Diagnostics of the sources of geomagnetic variations for the superstorm of October 10—11, 2024 according to the Ukrainian geomagnetic observatories' data. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 322—326. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322571.

Вступ. Сонячні спалахи, що виникли в регіоні сонячних плям 3842, зокрема спалах класу Х1.0 (пік якого досяг о 16:59 UTC 7 жовтня) і спалах класу Х1.8 (пік о 21:56 UTC 8 жовтня), спричинили асиметричні викиди корональної маси повного гало. Ці явища зумовили велику геомагнітну бурю 10—11 жовтня 2024 р. з раптовим початком (SSC) ( $D_{\rm st}$ =-354 нТл і  $K_{\rm p}$ =8+). (https://nssdc. gsfc.nasa.gov).

Об'єкти і методи дослідження. Об'єктом дослідження є магнітосферно-іоносферна система струмів та інші джерела геомагнітних варіацій. Діагностика джерел геомагнітних варіацій проводилась багатьма авторами [Laba, 2010; Sumaruk, 2024; Grandin, 2024], оскільки кожна подія в геомагнітному полі характеризується унікальним впливом цих джерел і має свої особливості. Супербуря 10-11 жовтня 2024 р. трапилась у період, наближений до максимуму 25-го 11-річного циклу Вольфа. На нашу думку, вона не була найпотужнішою в цьому циклі, оскільки за прогнозами [Sumaruk, 2023] максимум циклу очікується у 2025—2026 роках. Відомо, що супербурі зазвичай відбуваються під час максимуму циклу або на початку його спаду, як це спостерігалося, наприклад, у випадку супербур 2003—2004 рр. Однією з причин виникнення супербур є можливий збіг напрямків великомасштабного магнітного поля Сонця та магнітного поля Землі в непарних сонячних циклах. Інші фактори включають збільшення частоти рекурентних геомагнітних збурень, або початок 100-річного циклу [Sumaruk, 2023], що також може істотно впливати на геомагнітну активність.

Для діагностики джерел магнітосферноіоносферної системи струмів використано1-хвилинні дані горизонтальної компо-

## Таблиця 1. Обсерваторій сітки INTERMAGNET

IACA		Geomag.	Geomag.	Geogr.	Geogr.	
IAGA	Name	lat.	long.	lat.	long.	
coue		[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	
ODE	Odesa	43,720	112,430	46,783	30,883	
LVV	L'viv	47,84	106,8	49,900	23,750	

ненти H(X) вектора індукції магнітного поля Землі (**B**) українських обсерваторій сітки INTERMAGNET (дані обсерваторій подано в табл. 1).

Як відомо, у горизонтальній компоненті найкраще відображаються варіації, спричинені зовнішніми джерелами. Величину нерегулярних варіацій поля можна визначити як

$$\Delta = H(X) - S_q , \qquad (1)$$

де H(X) — значення горизонтальної (північної) компоненти геомагнітного поля;  $S_q$  — спокійна сонячно-добова варіація.

Нерегулярну варіацію геомагнітного поля Δ, спричинену магнітосферно-іоносферною системою струмів, виражено рівнянням

$$\Delta = DR + DRP + DT + DCF + DP, \qquad (2)$$

де *DR* — варіація від кільцевого магнітосферного струму; *DRP* — варіація від частинного кільцевого струму; *DT* — варіація від струмів у хвості магнітосфери; *DCF* варіація від струмів на магнітопаузі; *DP* — варіація від іоносферних струмів у зоні полярних сяйв та їх зворотних струмів розтікання в середні широти.

Магнітосферні джерела (*DR*, *DRP*, *DT*) добре відображає  $D_{st}$ -індекс магнітної активності. Дані щодо  $D_{st}$  взято із сайту(http:// swdccdb.kugi.kyoto-u.ac.jp). У першому наближенні величину варіації від магніто-сферних джерел ( $\Delta_m$ ) можна обчислити за формулою

$$\Delta_m = D_{st} \cos \Phi \,, \tag{3}$$

де Ф — геомагнітна широта обсерваторії.

Величину варіації від струмів на магнітопаузі *DCF* обчислено за модельними розрахунками. У цій роботі використано модель Міда. Внесок у північну компоненту поля виражено рівнянням

$$DCF_{X} = 25150 \frac{1}{r_{b}^{3}} \cos \varphi +$$
  
+21000  $\frac{1}{r_{b}^{4}} \cos t \left( 2\sin^{2} \varphi - 1 \right),$  (4)

де величина  $r_b$  — геометрична віддаль до підсонячної точки магнітосфери; t — місцевий час, який відраховується від північного меридіана; φ — геомагнітна широта. Обчислено варіації *DCF<sub>X</sub>* для досліджуваних обсерваторій (табл. 2).

# Таблиця 2. Варіація, спричинена струмами на магнітопаузі (*DCF<sub>X</sub>*)

DCF <sub>OI</sub>	<sub>DE</sub> , нТл	$DCF_{LVV'}$ нТл			
max	min	max	min		
62,6	10,5	57,4	9,7		

Варіацію від іоносферних струмів у зоні полярних сяйв та їх зворотних струмів у середні широти (DP) описують за допомогою індексів авроральної активності AE, AU, AL. Як відомо, під час дуже великих магнітних бур ( $D_{st} \leq -150$  нТл) фокуси авроральних іоносферних струмів зміщуються до середніх широт. Під час початку магнітної бурі середньоширотні обсерваторії перебувають під дією зворотних іоносферних струмів. При зростанні  $D_{st'}$  обсерваторії потрапляють під пряму дію східного (AU) чи західного (AL) електроструменю залежно від місцевого часу. Вичислено варіацію DP:

$$DP = \Delta - \Delta_m - DCF_X \,. \tag{4}$$

Результати та їх обговорення. На рис. 1 і 2 показано зміни Х-Sq (чорна крива) та  $D_{\rm sr} \cos \Phi$  (червона крива́ (верхня панель) і зміни DCF<sub>X</sub> та DP-варіацій (нижня панель) для обсерваторій LVV та ОDE. Ідентифікація іоносферних джерел показана індексами: AL — варіація від західного аврорального електроструменя, AU — від східного аврорального електроструменя. Напрямлена вверх стрілка показує пряму дію електроструменя, напрямлена вниз — зворотну. О 15 год 50 хв UT 10 жовтня 2024 р. DP-варіація — додатна, пов'язана з SSC бурі і становить: 92 нТл (ODE), 101 нТл (LVV). О 18 год UT різко посилюється західний авроральний електрострумінь, розвивається кільцевий магнітосферний струм, збільшується *AL*-індекс. *D*<sub>st</sub>-варіація для досліджуваних обсерваторій становить: -240,6 нТл (ODE), -223,5 нТл (LVV). Збільшення AL-індексу засвідчує, що посилились зворотні струми західного іоносферного електроструменя, на обсерваторіях реєстрували додатні значен-



Рис. 1. Зміни  $X-S_q$  (чорна крива) та  $D_{st} \cos \Phi$  (червона крива) (верхня панель) і зміни  $DCF_X$  та DP-варіацій (нижня панель) на геомагнітній обсерваторії «Львів». Fig. 1. Variations of  $X-S_q$  (black curve) and  $D_{st} \cos \Phi$ (red curve) (top panel) and the variations of  $DCF_X$  and DP variations (bottom panel) for the L'viv geomagnetic observatory.



Рис. 2. Зміни X–S<sub>q</sub> (чорна крива) та D<sub>st</sub> cosФ (червона крива) (верхня панель) і зміни DCF<sub>X</sub> та DP-варіацій (нижня панель) на геомагнітній обсерваторії «Одеса».

Fig. 2. Variations of  $X-S_q$  (black curve) and  $D_{st} \cos \Phi$  (red curve) (top panel) and the variations of  $DCF_X$  and DP variations (bottom panel) for the Odesa geomagnetic observatory.

ня *DP* 17—18 год UT 10 жовтня. Подальше підсилення кільцевого струму обумовило переміщення авроральних електроструменів у середні широти, 22—24 год UT спостерігались від'ємні суббурі, генеровані прямою дією західного аврорального електроструменя. Максимальні значення *DP* постерігались ~24 год UT (–77 нTл (ODE), –133 нTл (LVV)), у той час значення індексів АЕ, АU, AL різко зменшувались. Таке зменшення пов'язане із зсувом західного електроструменя в субавроральні широти (D<sub>st</sub>=-150 нТл). Ланцюжок обсерваторій, за даними яких вираховують індекси, не реєструє максимуму струму, оскільки електрострумінь перебуває у нижчих широтах. Протягом 2—13 год UT 11 жовтня спостерігалися додатні суббурі, генеровані прямою дією східного аврорального електроструменя. Надалі величина кільцевого магнітосферного струму зменшується, авроральні електрострумені переміщаються на північ і магнітометр реєструє додатні та від'ємні бухти, спричинені зворотними струмами розтікання східного та західного електроструменів.

Висновки. Показано, що під час супербурі 10—11 жовтня 2024 р. на досліджуваних обсерваторіях магнітосферні джерела варіацій, зокрема кільцевий магнітосферний струм, струм хвоста магнітосфери та

### Список літератури

- Сумарук Т.П., Реда Я. Діагностика джерел геомагнітних варіацій для супербурі 10—13 травня 2024 р. Одеські астрономічні публікації. 2024. Т. 37. С. 121—124. https://doi.org/ 10.18524/1810-4215.2024.37.313647.
- Сумарук Т.П., Сумарук П.В., Неска А. Сонячна та геомагнітна активність у 19—25 циклах. *Одеські астрономічні публікації*. 2023. Т. 36. С. 188—192. https://doi.org/10.18524/1810-4215.2023.36.288658.

струм на магнітопаузі, роблять найбільший внесок у варіацію поля — близько 67 %. Іоносферні авроральні струми, а також їхні зворотні струми спричиняють варіацію поля у середніх широтах, що не перевищує ~33 %.

Геомагнітні варіації в середніх широтах можна розділити на складові частини відносно зовнішніх джерел, які їх генерують. Необхідно при цьому враховувати і внесок внутрішніх джерел. Зокрема, середній внесок авроральних струмів та їх зворотних струмів у варіації поля середніх широт різний для різних обсерваторій залежить від широти обсерваторії, проте не перевищує ~33 %. До цієї варіації також входить величина збурення, спричинена електричною неоднорідністю земної кори та іншими внутрішніми джерелами. Однак для оцінювання потенційного впливу внутрішніх джерел потрібно проводити додаткові дослідження.

Grandin, M., Bruus, E., Ledvina, V.E., Partamies, N., Barthelemy, M., Martinis, C., Dayton-Oxland, R., Gallardo-Lacourt, B., Nishimura, Y., Herlingshaw, K., Thomas, N., Karvinen, E., Lach, D., Spijkers, M., & Bergstrand, C. (2024). The geomagnetic superstorm of 10 May 2024: Citizen science observations. *EGU sphere [preprint]*. https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2174.

# Diagnostics of the sources of geomagnetic variations for the superstorm of October 10–11, 2024 according to the Ukrainian geomagnetic observatories' data

## T.P. Sumaruk, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The paper analyses magnetospheric-ionospheric sources of geomagnetic variations for the superstorm of October 10—11, 2024. This event occurred at the maximum of the 25th Wolf cycle and the beginning of a 100-year cycle of geomagnetic activity. During this period, superstorms similar to the storms of October—November 2003 will occur.

To analyze the sources of variations, 1-minute values of Ukrainian geomagnetic observatories were used. The sources of geomagnetic variations were identified based on the

indices of geomagnetic activity and model calculations. The influence of magnetospheric sources and auroral ionospheric electric currents in the middle latitudes variations was diagnosed. The contribution of eachsources calculated.

**Key words:** Solar and geomagnetic activity, solar cycle, magnetospheric-ionospheric current system.

#### References

- Sumaruk, T.P., & Reda, J. (2024). Diagnostics of the sources of geomagnetic variations for the superstorm of may 10—13, 2024. Odessa Astronomical Publications, 37, 121—124. https://doi. org/10.18524/1810-4215.2024.37.313647 (in Ukrainian).
- Sumaruk, T.P., Sumaruk, P.V., & Neska, A. (2023). Solar and geomagnetic activity in 19—25 cycles. Odessa Astronomical Publications, 36,

188—192. https://doi.org/10.18524/1810-4215. 2023.36.288658 (in Ukrainian).

Grandin, M., Bruus, E., Ledvina, V.E., Partamies, N., Barthelemy, M., Martinis, C., Dayton-Oxland, R., Gallardo-Lacourt, B., Nishimura, Y., Herlingshaw, K., Thomas, N., Karvinen, E., Lach, D., Spijkers, M., & Bergstrand, C. (2024). The geomagnetic superstorm of 10 May 2024: Citizen science observations. *EGU sphere [preprint]*. https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2174.

УДК 550.380.8

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322572

# Становлення, розвиток і сучасний стан геомагнітних обсерваторій України

Ю.П. Сумарук<sup>1</sup>, Я. Реда<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна <sup>2</sup>Інститут геофізики Польської академії наук, Варшава, Польща

Показано шлях розвитку геомагнітних обсерваторій України від заснування до сьогодення. Описано процес модернізації цих обсерваторій та їх сучасний стан. Перші цифрові магнітоваріаційні станції на геомагнітних обсерваторіях «Львів» та «Одеса» були встановлені завдяки тісній співпраці з Інститутом геофізики Польської академії наук. На сьогодні основним програмним забезпеченням для підготовки даних у форматах INTERMAGNET є програмне забезпечення, розроблене польськими колегами.

Ключові слова: геомагнітна обсерваторія, INTERMAGNET, програмне забезпечення.

Вступ. Глобальне вивчення магнітного поля Землі необхідне як для розробки фундаментальних проблем вивчення будови геосфер, так і для вирішення найважливіших прикладних завдань забезпечення життєдіяльності об'єктів підвищеної відповідальності і літальних апаратів. Найбільш точну і оперативну інформацію про магнітне поле Землі надають геомагнітні обсерваторії. Кількість геомагнітних обсерваторій і станцій у світі постійно зростає. Обсерваторії і станції подають середні значення величин магнітного поля без небажаних завад, а також несуть інформацію

Citation: Sumaruk, Yu.P., & Reda, Ja. (2025). Formation, development and the current state of geomagnetic observatories of Ukraine. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 326—332. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322572.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

про елементи редукції вимірів, виконані на інших територіях. Цей матеріал використовується для опрацювання і створення магнітних карт, які мають велике практичне значення. Карти магнітного схилення (D) застосовують для потреб морського та повітряного сполучення, у видобувній промисловості.

Прилади для реєстрації геомагнітного поля постійно удосконалюються. Це дає можливість отримувати високодискретні дані. Ще кілька десятиліть тому, в епоху аналогової реєстрації, точність вимірювань становила 1—2 нТл, а нині вона є меншою за 0,1 нТл. Отже, можна досліджувати швидкоплинні процеси в магнітосфері та іоносфері Землі, а також робити точні прогнози геомагнітної активності. Доволі актуальним на сьогодні є вивчення космічної погоди. Для подібних досліджень також використовують дані стосовно магнітного поля Землі, отримані на геомагнітних обсерваторіях і супутниках.

Обладнання геомагнітних обсерваторій України. На сьогодні Україна має чотири геомагнітні обсерваторії, три з них — «Київ», «Львів», «Одеса» розміщені на території України, четверта — «Академік Вернадський» — в Антарктиді (рис. 1).

Геомагнітна обсерваторія «Київ» розпочала роботу в травні 1958 р. у зв'язку з проведенням Міжнародного геофізичного року. Напочатку 1958 р. спостереження велись варіаційною станцією «Ла-Кура». Абсолютні спостереження проводились магнітометрами QHM і BMZ двічі на тиждень.

Безперервну роботу геомагнітна обсерваторія «Київ» розпочала з 11 травня 1964 р. Для абсолютних спостережень був отриманий протонний магнітометр, а в 1967 г. закуплено більш сучасну магнітоваріаційну станцію системи В.М. Боброва.



Рис. 1. Розміщення українських геомагнітних обсерваторій. Fig. 1. Location of Ukrainian geomagnetic observatories.

У 2004 р. завдяки проєкту INTASS і французьким колегам геомагнітну обсерваторію було обладнано новими цифровими приладами — магнітоваріаційною станцією LEMI-008 і DI fluxgate магнітометром, розпочалась робота за протоколом INTERMAGNET [St-Louis, 2024].

У 2008 р. завдяки тісній співпраці з Інститутом геофізики Польської академії наук обсерваторію було дооснащено цифровою магнітоваріаційною станцією PSM-8411, а в 2009 р. — новим приладом для абсолютних вимірювань Magnetic theodolite THEO-010 with fluxgate GEOMAG-03. Це суттєво покращило якість варіаційних та абсолютних вимірювань. Виконавши всі вимоги, що ставляться до обсерваторій мережі INTERMAGNET, геомагнітна обсерваторія «Київ» стала її повноправним членом в 2011 р.

Регулярні спостереження за складовими магнітного поля геомагнітна обсерваторія «Львів» почала вести з 1952 р. [Sumaruk et al., 2009]. Спочатку записи велись за допомогою станції «Ла-Кура». В 1970 р. на обсерваторії були поставлені магнітоваріаційні станції Боброва.

У 2002 р. за сприяння Інституту геофізики Польської академії наук на обсерваторії встановили цифрову магнітоваріаційну станцію PSM-8911 (рис. 2), що дало змогу отримувати записи геомагнітного поля в цифровому вигляді. Завдяки програмному забезпеченню, розробленому в цьому Інституті, вдалось спростити процес обробки варіаційних записів.

Абсолютні вимірювання на обсерваторії «Львів» спочатку проводились за допомогою магнітного теодоліта СООК, кварцевого Н-магнітометра, індукційного інклінатора та протонного магнітометра ПМ-001, який в 1986 р. було замінено на протонний магнітометр ММП-203.

Учервні 2006 р. за сприяння British Geological Survey і Royal Meteorological Institute of Belgium на обсерваторії встановили DI fluxgate Tavistock з ферозондом FLM1/B (рис. 3).

Для обробки варіаційних та абсолютних спостережень і підготовки даних у форматі INTERMAGNET на геомагнітній обсерваторії використовують програмне забезпечення, розроблене польськими колегами. У 2005 р. магнітна обсерваторія «Львів» Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України стає повноправним членом мережі INTERMAGNET.

Регулярні спостереження складових геомагнітного поля на обсерваторії «Одеса» розпочались у 1948 р. Спочатку вони велись за допомогою станції «Ла-Кура», а в 1970-х роках на обсерваторії були поставлені стандартні станції Боброва. Характерною особливістю геомагнітної обсерваторії «Одеса» є те, що варіаційний павільйон розміщений під землею на глибині 4 м. Це дає змогу підтримувати стабільну температуру



Рис. 2. Цифрова магнітоваріаційна станція PSM-8911.

Fig. 2. Digital magnetovariation station PSM-8911.



Рис. 3. DI fluxgate Tavistock з ферозондом FLM1/B. Fig. 3. DI fluxgate Tavistock with ferroelectric probe FLM1/B.

зимою і влітку без великих затрат енергії. У 2013 р. відповідно до угоди між Німецьким центром Гельмгольца (Німеччина) та Інститутом геофізики ім. С.І. Субботіна на обсерваторії було поставлене сучасне обладнання (магнітоваріаційна станція FGE (рис. 4), магнітометри GSM91 і GSM19G, а також DI магнітометр на базі теодоліта ТНЕО-010 з ферозондом GEOMAG-03). У 2019 р. завдяки підтримці польських колеги на обсерваторії «Одеса» було встановлено магнітоваріаційну станцію LEMI-018. На цей час обсерваторія «Одеса» працює за протоколом INTERMAGNET. Дані з геомагнітної обсерваторії в режимі on-line відправляються в міжнародні центри даних.

У 1996 р. Великобританія передала свою антарктичну станцію «Фарадей» Україні, яку перейменували у станцію «Академік Вернадський».

Основним приладом для реєстрації геомагнітного поля був обсерваторський магнітометр La Cour. З 1998 р. на геомагніт-



Рис. 4. Трикомпонента магнітовараційна станція FGE.

Fig. 4. Three-component magnetovariation station FGE.

ній обсерваторії розпочався процес модернізації, який не припиняється до сьогодні [Melnyk, Bakhmutov, 2007/2008; Marusenkov et al., 2019; Sumaruk et al., 2022]. У 2004 р. геомагнітна обсерваторія «Аргентинські острови» (AIA) стає повноправним членом мережі INTERMAGNET. На сьогодні обсерваторія обладнана двома ферозондовими магнітометрами LEMI-025, немагнітним теодолітом Wild T1 з однокомпонентним магнітометром Mag-01H, магнітометром/ градієнтометром GSM-19G і скалярним магнітометром GSM-90. Це дає змогу отримувати високоточні односекундні дані вимірювання геомагнітного поля.

Війна, що розпочалась у лютому 2022 р., внесла свої корективи у діяльність геомагнітних обсерваторій, що розміщені на території України.

Найбільше постраждала геомагнітна обсерваторія «Київ», яка припинила спостереження за геомагнітним полем, оскільки на територію обсерваторії зайшли російські війська. Обладнання та приміщення обсерваторії були понищені «орками». Тільки в 2024 р. вдалось завершити ремонти павільйонів обсерваторії і відновити спостереження. Однак у повному обсязі це зробити не вдалось унаслідок сильного пошкодження апаратури. Через це дані з цієї обсерваторії не відправляють у мережу INTERMAGNET. Ми сподіваємось, що за допомогою іноземних колег і міжнародних організацій вдасться відновити спостереження на геомагнітній обсерваторії «Київ» у повному обсязі та налагодити їх відправку.

На території геомагнітної обсерваторії «Одеса» не було військових дій, але у зв'язку з частими обстрілами і бомбардуваннями приміщення варіаційного павільйону обсерваторії використовувалось як бомбосховище для працівників обсерваторії та людей, що проживали поруч обсерваторії. Це призвело до сильних завад для магнітоваріаційних приладів, тому дані за той період є некондиційними. На сьогодні обсерваторія відновила роботу і відправку даних у форматах і за протоколом INTERMAGNET. Через часті вимкнення електроенергії під час військових дій на геомагнітній обсерваторії «Львів» зазнало ушкоджень обладнання, що використовується для первинної обробки та передачі даних у міжнародні центри даних INTERMAGNET. На цей час обробку і відправку даних налагоджено, однак обладнання для первинної обробки даних та їх відправки потребує модернізації.

Результати і висновки. З чотирьох геомагнітних обсерваторій України три («Львів», «Київ» і «Аргентинські острови») є повноправними членами мережі сучасних геомагнітних обсерваторій INTERMAGNET. Геомагнітна обсерваторія «Одеса» працює за протоколом INTERMAGNET.

Завдяки тісній співпраці з Інститутом геофізики Польської академії наук геомагнітні обсерваторії «Львів» і «Одеса» оснащені цифровими магнітоваріаційними станціями. Сьогодні на усіх обсерваторіях

## Список літератури

- Орлюк М.И., Роменец А.А., Марченко А.В., Орлюк И.М., Иващенко И.Н. Магнитное склонение на территории Украины: результаты наблюдений и вычислений. *Геофиз. журн*. 2015. Т. 37. № 2. С. 73—85. 10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015.111307.
- Орлюк М.И., Роменец А.О., Сумарук П.В., Сумарук Ю.П., Сумарук Т.П. Пространственновременная структура магнитного поля Земли территории Украины. Оценка вклада внутренних и внешних источников. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 3. С. 137—144. https:// doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i3.2012. 116651.
- Орлюк М.І., Сумарук Т.П., Сумарук Ю.П., Роменець А.О. Оцінка вкладу індукційних струмів у вікову варіацію геомагнітного поля (за даними українських геомагнітних обсерваторій). *Геофиз. журн*. 2014. Т. 36. № 2. С. 111—120. https://doi.org/10.24028/ gzh.0203-3100.v36i2.2014.116124.
- Сумарук Ю.П. Довготривалі зміни геомагнітного поля за даними спостережень на магнітних обсерваторіях України. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 5. С. 120—127. https:// doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i5.2011. 116873.

України для підготовки даних у форматах INTERMAGNET застосовують програмне забезпечення, розроблене польськими колегами.

Дані з обсерваторій використовують для вивчення просторово-часової структури геомагнітного поля [Орлюк и др., 2012; Orlyuk et al., 2020], вивчення глибинної будови Землі, розробки карт нормального і аномального магнітних полів території України [Orlyuk et al., 2024], вікового ходу і короткоперіодних варіацій магнітного поля Землі [Сумарук, 2011; Орлюк та ін., 2014; Sobitnyak et al., 2020; Ryabov et al., 2024], вивчення сонячно-земних зв'язків [Sumaruk, Reda, 2011; Orlyuk, Romenets, 2023], а також для забезпечення організацій соціально-медичного профілю та військово-навігаційних служб України інформацією про стан магнітного поля в цілому та магнітного схилення зокрема [Орлюк и др., 2015].

- Marusenkov, A., Leonov, M., Korepanov, V., Leonov, S., Koloskov, A., Nakalov, Ye., & Otruba, Yu. (2019). Upgrade of the Argentine Islands INTERMAGNET observatory at Akademik Vernadsky station, Antarctica. Ukrainian Antarctic Journal, 1(18), 103—115. https://doi.org/10.33275/1727-7485.1(18).2019.135.
- Melnyk, G.V., & Bakhmutov, V.G. (2007/2008). The «Academic Vernadskiy» station in the network of the Ukrainian magnetic observatories of IN-TERMAGNET. Ukrainian Antarctic Journal, (6-7), 66—73.
- Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., Bakarzhieva, M., & Orliuk, I. (2024). Development of geomagnetic field induction module maps for the territory of Ukraine. *Geodynamics*, 1(36), 74—84. https://doi.org/10.23939/ jgd2024.01.074.
- Orlyuk, M.I., & Romenets, A.A. (2020). Spatialtemporal change of the geomagnetic field: environmental aspect. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(4), 18—38. https://doi/org/10.24028/gzh. 0203-3100.v42i4.2020.210670.
- Orlyuk, M.I., & Romenets, A.A. (2023). The Earth's magnetic field and the large-scale magnetic

field of the Sun: the solar-terrestrial connection. *Odessa Astronomical Publications*, *36*, 172—177. https://doi.org/10.18524/1810-4215. 2023.36.290538.

- Ryabov, M.I., Sukharev, A.L., Orlyuk, M.I., Ryabov, D.M., Sumaruk, Yu.P., Romenets, A.O., Strakhov, E.M., & Zabora, D. (2024). Space weather effects in Odesa magnetic anomaly analysis by neural networks and wavelet methods. *Astronomical and Astrophysical Transactions*, *34*(4), 299—316.
- Sobitnyak, L.I., Ryabov, M.I., Orlyuk, M.I., Sukharev, A.L., Romenets, A.O., Sumaruk, Yu.P., & Pilipenko, A.A. (2020) Analysis of the magnetic storms catalog for monitoring radio source fluxe data with the RT URAN-4 radio telescope in the Odesa magnetic anomaly zone. *Radio Physics and Radio Astronomy*, *25*(4), 324—330. https://doi.org/10.15407/rpra25.04.324.

St-Louis, B. (Ed.) & INTERMAGNET Operations

Committee and Executive Council. (2024). IN-TERMAGNET Technical Reference Manual, Version 5.1.1. Retrieved from https://tech-man. intermagnet.org/\_/downloads/en/stable/pdf/.

- Sumaruk, P.V., Sumaruk, Yu.P., & Sumaruk, T.P. (2009). Geomagnetic observatory «Lviv»: the past and the present. *Geofizicheskiy Zhurnal*, *31*(5), 146—151.
- Sumaruk, Yu., Marusenkov A., Neska A., Korepanov V., & Leonov M. (2022). Increasing the accuracy of absolute measurements at the AIA geomagnetic observatory of Ukrainian Antarctic AkademikVernadsky station. Ukrainian Antarctic Journal, 20(2), 151—163. https://doi. org/10.33275/1727-7485.2.2022.697.
- Sumaruk, Yu., & Reda, J. (2011). Secular variation of the geomagnetic field and solar activity. *Geofizicheskiy Zhurnal*, *33*(4), 134—141. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100. v33i4.2011.116902.

# Formation, development and the current state of geomagnetic observatories of Ukraine

# Yu.P. Sumaruk<sup>1</sup>, Ja. Reda<sup>2</sup>, 2025

<sup>1</sup>S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine <sup>2</sup>Institute of Geophysics of the Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

The development path of geomagnetic observatories of Ukraine from their foundation to the present is shown. The process of modernization of these observatories and their current state is described. The first digital magnetovariation stations at the geomagnetic observatories «Lviv» and «Odesa» were installed thanks to close cooperation with the Institute of Geophysics of the Polish Academy of Sciences. Today, the main software for preparing data in the INTERMAGNET formats is the software developed by Polish colleagues.

Key words: Geomagnetic Observatory, INTERMAGNET, software.

## References

Orlyuk, M.I., Romenets, A.A., Marchenko, A.V., Orlyuk, I.M., & Ivaschenko, I.N. (2015). Magnetic declination on the territory of Ukraine: results of observations and calculations. *Geofizicheskiy Zhurnal*, *37*(2), 73—85. https://doi.org/10.24028/ gzh.0203-3100.v37i2.2015.111307 (in Russian).

Orlyuk, M.I., Romenets, A.O., Sumaruk, P.V.,

Sumaruk, Y.P., & Sumaruk, T.P. (2012). The spatial-temporal structure of the magnetic field of Ukraine's territory: assessment of the contribution of internal and external sources. *Geofizicheskiy Zhurnal*, *34*(3), 137—144. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i3.2012. 116651 (in Russian).

- Orlyuk, M.I., Sumaruk, T.P., Sumaruk, Y.P., & Romenets, A.O. (2014). Valuation of induction current contribution to the secular variation of geomagnetic field (according to the data of Ukrainian geomagnetic observatories). *Geofizicheskiy Zhurnal*, *36*(2), 111—119. https:// doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i2.2014. 116124 (in Ukrainian).
- Sumaruk, Y.P. (2011). Long-term changes in the geomagnetic field from observational data at magnetic observatories of Ukraine. *Geo-fizicheskiy Zhurnal*, 33(5), 120—127. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i5.2011. 116873 (in Ukrainian).
- Marusenkov, A., Leonov, M., Korepanov, V., Leonov, S., Koloskov, A., Nakalov, Ye., & Otruba, Yu. (2019). Upgrade of the Argentine Islands INTERMAGNET observatory at Akademik Vernadsky station, Antarctica. *Ukrainian Antarctic Journal*, 1(18), 103—115. https://doi. org/10.33275/1727-7485.1(18). 2019.135.
- Melnyk, G.V., & Bakhmutov, V.G. (2007/2008). The «Academic Vernadskiy» station in the network of the Ukrainian magnetic observatories of INTERMAGNET. Ukrainian Antarctic Journal, (6-7), 66—73.
- Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., Bakarzhieva, M., & Orliuk, I. (2024). Development of geomagnetic field induction module maps for the territory of Ukraine. *Geodynamics*, 1(36), 74–84. https://doi.org/10.23939/jgd2024.01.074.
- Orlyuk, M.I., & Romenets, A.A. (2020). Spatialtemporal change of the geomagnetic field: environmental aspect. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(4), 18—38. https://doi.org/10.24028/gzh. 0203-3100.v42i4.2020.210670.
- Orlyuk, M.I., & Romenets, A.A. (2023). The Earth's magnetic field and the large-scale magnetic field of the Sun: the solar-terrestrial

connection. *Odessa Astronomical Publications*, 36, 172—177. https://doi.org/10.18524/1810-4215.2023.36.290538.

- Ryabov, M.I., Sukharev, A.L., Orlyuk, M.I., Ryabov, D.M., Sumaruk, Yu.P., Romenets, A.O., Strakhov, E.M., & Zabora, D. (2024). Space weather effects in Odesa magnetic anomaly — analysis by neural networks and wavelet methods. Astronomical and Astrophysical Transactions, 34(4), 299—316.
- Sobitnyak, L.I., Ryabov, M.I., Orlyuk, M.I., Sukharev, A.L., Romenets, A.O., Sumaruk, Yu.P., & Pilipenko, A.A. (2020). Analysis of the magnetic storms catalog for monitoring radio source fluxe data with the RT URAN-4 radio telescope in the Odesa magnetic anomaly zone. *Radio Physics and Radio Astronomy*, *25*(4), 324—330. https://doi.org/10.15407/rpra25.04.324.
- St-Louis, B. (Ed.) & INTERMAGNET Operations Committee and Executive Council.(2024). INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 5.1.1. Retrieved fromhttps://tech-man. intermagnet.org/\_/downloads/en/stable/pdf/.
- Sumaruk, P.V., Sumaruk, Yu.P., & Sumaruk, T.P. (2009). Geomagnetic observatory «Lviv»: the past and the present. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 31(5), 146—151.
- Sumaruk, Yu., Marusenkov A., Neska A., Korepanov V., & Leonov M. (2022). Increasing the accuracy of absolute measurements at the AIA geomagnetic observatory of Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station. *Ukrainian Antarctic Journal*, 20(2), 151—163. https://doi. org/10.33275/1727-7485.2.2022.697.
- Sumaruk, Yu., & Reda, J. (2011). Secular variation of the geomagnetic field and solar activity. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 33(4), 134—141. https:// doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i4.2011. 116902.

УДК 550.36+550.312

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322573

# Комплексний аналіз співвідношення структурних і речовинних неоднорідностей різних поверхів літосфери Дніпровсько-Донецької западини

## О.В. Усенко, І.Б. Макаренко, О.С. Савченко, А.П. Усенко, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

За розрахунками параметрів теплового поля на нафтогазових родовищах Чернігівського і Лохвицького блоків Дніпровсько-Донецької западини встановлено зміни геотермічного градієнта з глибиною. На кожному родовищі є свердловини як з незмінним градієнтом (19—21 °С/км), так і з різкою його зміною. На території Чернігівського блока ці зміни виявились від'ємними (зниження градієнта до 15—17 °С/км), між трансрегіональним тектонічним швом Херсон—Смоленськ і розломом Переяслав-Хмельницький—Прилуки зміни як від'ємні, так і додатні, а на південний схід (у Лохвицькому блоці) — винятково додатні (підвищення до 35—55 °С/км). Тут глибина стрибка градієнта збігається з глибиною гідрогеологічної інверсії, а саме зі зміною високомінералізованих хлоридно-кальцієвих вод верхнього гідродинамічного поверху на термальні слабко мінералізовані гідрокарбонатно-натрові нижнього. Також у межах Лохвицького блока встановлено зв'язок між глибинами стрибка градієнта та заляганням пластів з аномально високим пластовим тиском (АВПТ), виникнення якого є наслідком накопичення газової складової в тектонічно чи літологічно екранованих пастках. Визначено, що ділянка поширення пластів з АВПТ, де зафіксовано виключно підвищення геотермічного градієнта, обмежена зонами розущільнення, виділеними за даними гравітаційного моделювання. В її межах зміна градієнта від'ємна чи відбувається в обох напрямках. Причини такої закономірності потребують подальшого аналізу.

**Ключові слова:** Дніпровсько-Донецька западина, тепловий потік, геотермічний градієнт, пластовий тиск, густинна неоднорідність, зони розущільнення.

Вступ. Уже наприкінці 1980-х років було доведено, що теплове поле Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) формується внаслідок конвективного перенесення тепла висхідними потоками флюїдів (гідротермальних розчинів), яке визначає як розподіл тиску (прояви аномально високого пластового тиску (АВПТ)), так і температурний режим надр. Був встановлений зв'язок між появою термальних слабомінералізованих гідрокарбонатно-натрових вод нижнього гідродинамічного поверху (зони вертикального руху) і розміщенням пластів з АВПТ [Геология..., 1989]. Проте доки існували уявлення, що міграція флюїдів обмежена шарами девону та нижнього карбону, причини підвищення температури та пластового тиску залишалися невиявленими. В останні десятиліття було доведено, що утворення родовищ вуглеводнів є наслідком ланцюга подій, підпорядкованих планетарним процесам глибинної дегазації Землі, з якою пов'язані геодинамічна нестабільність, виникнення тектонічних напружень, а також сучасна гідротермальна діяльність, яка забезпечується існуванням

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Usenko, O.V., Makarenko, I.B., Savchenko, O.S., & Usenko, A.P. (2025). Comprehensive analysis of the correlation between structural and material heterogeneities of different layers of the lithosphere of the Dnieper-Donetsk Basin. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 333—339. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322573.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



Рис. 1. Схема розподілу глибин стрибку геотермічного градієнта та поширення зони аномально високого пластового тиску в Чернігівському та Лохвицькому блоках Дніпровсько-Донецької западини: 1 — межа западини; 2 — границі блоків; 3 — глибина розміщення продуктивних пластів, у дужках — значення теплового потоку, розраховане за температурою в пласті (глибина та температура, за даними роботи [Геологія..., 1989]); 4 — контур поширення зон АВПТ, за роботою [Геологія..., 1989]; 5 — визначені глибини стрибку градієнта; 6, 7 — розломи, за [Старостенко и др., 2015] (6 — ортогональні (Я-Тр — Ядлово-Трахтемирівський, З-Ін — Західноінгулецький, К-Кр — Криворізько-Кременчуцький, В-Лг — Верховцівсько-Льговський, Анд — Андрушевський); 7 — діагональні (П-Пр — Переяслав-Хмельницький — Прилуки)); 8 — трансрегіональний тектонічний шов Херсон — Смоленськ; 9 — соляні штоки; 10 — родовища вуглеводнів (а — нафтові, б — газові, в — нафтогазові).

Fig. 1. The geothermal gradient jump depths distribution and the abnormally-high stratum pressure zone of the Chernihivskyi and Lokhvitskyi blocks of the Dnieper-Donetsk Basin: 1 — borders of the basin; 2 — block borders; 3 — depth of productive layers, in brackets — the value of the heat flow calculated by the temperature in the stratum (depth and temperature after [Shpak, 1989]); 5 — the determined gradient jump depths; 6, 7 — faults by [Starostenko et al., 2015] (6 — orthogonal ( $\Re$ -Tp — Yadlovo-Traktemirovskyi, 3-IH — Zakhidnoinguletskyi, K-Kp — Kryvorizko-Kremenchutskyi, B-Ar — Verkhovtsivsko-Lhovskyi, AHA — Andrushevskyi); 7 — diagonal ( $\Pi$ - $\Pi$ p —Pereiaslav-Khmelnytskyi—Pryluky)); 8 — Kherson—Smolensk transregional tectonic suture; 9 — salt stocks; 10 — hydrocarbon deposits (a — oil, 6 — gas, B — oil and gas).

глибинних джерел тепла та флюїдів [Лукин, 2005; Лукин, Шестопалов, 2021; Усенко, Усенко, 2022]. Тому поєднання відомостей про фізичні властивості земної кори з геологічною інформацією про будову фундаменту та осадової товщі, а також про зміну хімічного складу води (гідрогеологічну інверсію) є важливим для комплексного аналізу співвідношення структурних і речовинних неоднорідностей різних поверхів літосфери. Це дасть можливість локалізувати розміщення структур, в яких проявлені усі ознаки, що сприяють накопиченню вуглеводнів та утворенню родовищ. З цією метою визначено глибини змін градієнта, які зіставлені з глибиною прояву гідрогеологічної інверсії, за роботою [Лукин, 2005], і розміщенням зон АВПТ, за роботою [Геология..., 1989]. Додатково враховано особливості будови фундаменту та густинну неоднорідність на його поверхні [Старостенко и др., 2015].

Зміна (стрибок) геотермічного градієнта. Опрацьовано результати замірів температури в 1086 свердловинах Чернігівського та Лохвицького блоків ДДЗ, більшість з яких розташована в межах нафтогазових родовищ. Побудовано схему розподілу глибин, при перетині яких змінюється градієнт (рис. 1). На багатьох родовищах розміри відрізків, на яких проведено розрахунок геотермічного градієнта в середньому—нижньому карбоні та девоні, не перевищує декілька сотень метрів, що дає можливість визначити глибину, на якій градієнт змінюється та надалі залишається вищим чи нижчим в інтервалі не меншому за 500 м.

Наприклад, на Сахалінському родовищі (рис. 2) визначено тільки додатні зміни градієнта. Очевидним є зв'язок між проникними зонами розломів (рис. 2, *a*), розміщенням покладів (рис. 2, *б*) і зміною температури (рис. 2, *в*). Від поверхні до регіонального пермського флюїдоупору градієнт становить 19 °С/км. Перша значна зміна відбувається під пластовими нафтовими та газоконденсатними покладами в пісковиках середнього, друга — нижнього карбону в склепінні куполоподібної складки. У різних свердловинах цього родовища на глибині 4000—5000 м градієнт варіює від 39 до 46 °С/км (див. рис. 2, *a*).

Було встановлено, що територія ДДЗ поділяється на блоки, в яких зміни геотермічного градієнта мають різну направленість. Так, на захід від трансрегіонального тектонічного шва Херсон—Смоленськ у межах Чернігівського блока при перетині вказаних глибин градієнт зменшується до 15—17 °С/км. Між цим тектонічним швом і розломом Переяслав-Хмельницький— Прилуки, а також на родовищах Лохвицького блока, що залягають у північній прибортовій частині ДДЗ, у більшості свердловин спостерігається додатний стрибок градієнта, але є свердловини з від'ємним стрибком. У центральній частині Лохвицького блока від'ємні зміни відсутні. Майже на всіх родовищах у частині свердловин встановлено істотне підвищення градієнта — 28—45 °С/км і більше. Тому його середнє значення дорівнює 24—25 °С/км. У межах всієї западини на кожному родовищі є свердловини з незмінним градієнтом — 20—21 °С/км. Розрахунки на більшості родовищ наведено в статтях [Усенко, Усенко, 2020, 2022].

Аномально високий пластовий тиск і гідрогеологічна інверсія. Територія, на якій зафіксовано появу надлишкового та аномально підвищеного тиску високона-



Рис. 2. Модель будови Сахалінського родовища: *а* — структурна карта покрівлі нижньовізейського ярусу (ізолінії, м); *б* — геологічний розріз уздовж лінії І—І, за роботою [Атлас..., 1984]; *в* — термограми; *1* — розміщення продуктивних пластів; *2* — номер свердловини, у дужках — розраховане значення теплового потоку, в мВт/м<sup>2</sup>; *3* — розломи; *4* — обмеження сольового штоку (*a*) та покладу (*б*); *5* — глибини вимірювань температури в свердловинах.

Fig. 2. Model of the Sakhalin field structure: *a*—structural map of the roof of the Lower Viseian layer;  $\delta$ — geological cross-section along the line I—I according to work [Arsiriy, 1984]; *b*— thermograms; *1*— productive layers; *2*— well numbers (heat flow values in brackets, mW/m<sup>2</sup>); *3*— faults; *4*— limitation of salt stock (*a*) and deposit ( $\delta$ ); *5*— depths of temperature measurements in wells.

пірних термальних вод з високою газонасиченістю, належить до Лохвицького блока, де виявлено додатний стрибок геотермічного градієнта, зумовлений стрибкоподібним підвищенням температури на 3—10 °С [Лукин, 1997] (див. рис. 1). Тільки на окремих родовищах північної прибортової частини підвищений АВПТ не завжди супроводжується істотним зростанням температури. Прояви АВПТ виражені інжекцією опріснених термальних вод і парогазових струменів, газоводяними викидами, водогазовими фонтанами, появою нафти і газу. Тобто стрибок градієнта спричинений появою термальних вод іншого складу. У зоні змішування глибинних гідрокарбонатно-натрових розсолів (вертикального руху) і розсолів хлор-кальцієвого типу (латерального руху) встановлено відсадження кремнезему, оксидів заліза, кальциту [Лукин, Шестопалов, 2022]. Підвищення градієнта відбувається безпосередньо під покладами, в яких встановлений АВПТ, тоді як накопичення вуглеводнів відбувається в колекторах. Наприклад, у Срібненській депресії, більшість родовищ Лохвицького блока розміщуються у вапняках нижньовізейського атола [Лукин, Шестопалов, 2022], що залягають на 200—400 м вище, ніж визначена глибина стрибку градієнта [Усенко, Усенко, 2022]. Всі ці ознаки сучасної ендогенної активності супроводжуються висхідними рухами центральної та південної частин Лохвицького блока на 2—4 і 6—8 мм/рік відповідно [Лукин, 2005].

Існування припливу глибинних маломінералізованих термальних вод та явищ АВПТ, а також інші ознаки молодої чи сучасної гідродинамічної активності в Чернігівському блоці ДДЗ невідомі. На розбурених локальних структурах нафта і газ у карбоні відсутні. Тільки в зоні Північного бортового розлому зафіксовані непромислові припливи легкої нафти з колекторів нижньофаменського комплексу. Тут зміна градієнта є додатною, а висхідні рухи не перевищують 2 мм/рік [Лукин, 1997]. Перші прояви АПВТ встановлені при перетині трансрегіонального тектонічного шва Херсон—Смоленськ і на межі Лохвицького блока, де градієнт змінюється в обох



Рис. 3. Схема розміщення зон розущільнення на поверхні фундаменту, за [Старостенко и др., 2015]: 1 зони розущільнення; 2— глибина залягання фундаменту, км. Інші умовні див. на рис. 1. Fig. 3. Low-density zones on the basement surface by [Starostenko et al., 2015]: 1— low density zones; 2— depth of the basement, km. For other labels, see Fig. 1.

напрямках, а у вугленосних відкладах девону та верхнього візе виявлено збагачені на асфальт нафти.

Густинна неоднорідність на поверхні фундаменту. Зона розміщення пластів з АВПТ, де відбувається виключно підвищення геотермічного градієнта, оконтурена зонами розущільнення, виділеними за даними гравітаційного моделювання (рис. 3). У межах Чернігівського блока фундамент переважно розущільнений зі значеннями густини на його поверхні 2,60—2,65 г/см<sup>3</sup>. У межах центральної та південної частин Лохвицького блока значення густини на поверхні фундаменту перевищують 2,70 г/см<sup>3</sup>. На півночі Лохвицького блока зона розущільнення з глибини 20 км зміщується на північ і спостерігається вже на борту западини. Саме тут сконцентрована велика кількість родовищ, які можуть розміщуватися в різних блоках земної кори: в розущільнених на фоні ущільнених порід; в ущільнених, положення яких збігається з розломами; на границі розущільнених та ущільнених. Встановлено, що за межами території прояву АПВТ, у зонах розущільнення, зміна градієнта є від'ємною або змінюється в обох напрямках.

У південно-східному напрямку виразно проявлена залежність збільшення глибин стрибку градієнта (див. рис. 1) від глибин залягання фундаменту (рис. 3). Це пов'язане із зануренням поверхні осадових порід нижнього карбону, в яких глибинні термальні води змішуються з водами зони латерального руху. За розміщенням у розрізі регіонально розвинених флюїдоупорів у нижньому карбоні виділяють

## Список літератури

- Атлас геологического строения и нефтегазоносности Днепровско-Донецкой впадины. Под ред. Ю.А. Арсирия. Киев: Мингео УССР, 1984, 190 с.
- Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой впадины. Нефтегазоносность. Под ред П.Ф. Шпака. Киев: Наук. думка, 1989, 204 с.
- Лукин А.Е. Глубинная гидрогеологическая инверсия как глобальное синергетическое яв-

два рівні промислової нафтогазоносності: турнейсько-нижньовізейський і верхньовізейсько-серпуховський, які розділені регіональним флюїдоупором.

Таким чином, сучасна гідротермальна діяльність, що проявлена гідрогеологічною інверсією, появою пластів з АВПТ, наявністю свердловин з додатнім стрибком градієнта, відноситься до території, де густина на поверхні фундаменту перевищує 2,70 г/см<sup>3</sup>. Для території, де густина менша за це значення, крім висхідного руху термальних вод зафіксовано наявність і низхідного, що супроводжується від'ємним стрибком градієнта. Тут також не встановлені гідрогеологічна інверсія та підйом території.

Висновки. Побудовано схему розподілу глибин, при перетині яких змінюється геотермічний градієнт. Його стрибок виявлено на всіх без винятку родовищах Чернігівського та Лохвицького блоків ДДЗ, де є достатня кількість вимірів. На всіх родовищах також присутні свердловини, в яких стрибок градієнта не проявлений. Тільки в Лохвицькому блоці встановлено додатні зміни градієнта, спричинені припливом термальних гідрокарбонатно-натрових вод і зафіксовано появу пластів з АВПТ флюїдів. За межами території прояву АПВТ та виключно додатних стрибків геотермічного градієнта залишаються зони з різнонаправленими стрибками градієнта та зони розущільнення, виділені за даними гравітаційного моделювання. Пошук причин цієї закономірності потребує подальшого аналізу із залучанням додаткової інформації.

ление: теоретические и прикладные аспекты. Статья 2. Тектоно-геодинамические аспекты глубинной гидрогеологической инверсии. *Геол. журн.* 2005. № 1. С. 50—67.

- Лукин А.Е. Литогеодинамические факторы нефтегазонакопления в авлакогенных бассейнах. Киев: Наук. думка, 1997, 224 с.
- Лукин А.Е., Шестопалов В.М. Кольцевые тектономагматогенные структуры в зонах повы-

шенной геодинамической нестабильности — первоочередные объекты поисков месторождений водорода. *Геофиз. журн.* 2021. Т. 43. № 4. С. 1—41. https://doi.org/10.24028/ gzh.v43i5.244038.

- Старостенко В.И., Русаков О.М., Пашкевич И.К., Кутас Р.И., Орлюк М.И., Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Максимчук П.Я., Козленко Ю.В., Козленко М.В., Легостаева О.В., Лебедь Т.В., Савченко А.С. Тектоника и углеводородный потенциал кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины. Киев: Галактика, 2015, 211 с.
- Усенко А.П., Усенко О.В. Аналіз геотермічних параметрів нафтогазових родовищ центральної частини Дніпровсько-Донецької западини. *Геофиз. журн.* 2020. Т. 42. № 3. С. 128— 146. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100. v42i3.2020.204705.
- Усенко О.В., Усенко А.П. Прояви сучасної дегазації в тепловому потоці та глибинній будові (на прикладі Лохвицького блока Дніпровсько-Донецької западини). Геофиз. журн. 2022. Т. 44.№ 5.С. 54—76. https://doi. org/10.24028/gj.v44i5.272327.

# Comprehensive analysis of the correlation between structural and material heterogeneities of different layers of the lithosphere of the Dnieper-Donetsk Basin

## O.V. Usenko, I.B. Makarenko, O.S. Savchenko, A.P. Usenko, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The calculations of thermal field parameters at oil and gas fields for the Chernihivskyi and Lokhvitskyi blocks of DDB allowed us to define geothermal gradient changes with depth. At all fields, there are wells with stable gradients of 19-21 °C/km, and ones with sharp changes. On the Chernihivskyi block territory, these changes are negative (the gradient decreases to 15—17 °C/km); between the Kherson—Smolensk tectonic suture to the Pereiaslav-Khmelnytskyi—Pryluky Fault, changes are both negative and positive, and to the southeast from it (at the Lokhvitskyi block) they are exclusively positive (increases of up to 35—55 °C/km). Here, the depth of the gradient jump corresponds with the depth of the hydrogeological inversion — the change of the highly mineralized chloride-calcium waters of the upper hydrodynamic layer to thermal, weakly mineralized hydrocarbonatesodium waters of the lower layer. Also, within the Lokhvitskyi block, a connection has been established between the gradient jump depths and layering of strata with AHSP (Abnormally high stratum pressure). Its occurrence is a consequence of the gas accumulating in tectonically or lithologically shielded traps. The area of layers with AHSP distribution, where only an increase in the geothermal gradient was recorded, is limited by decompression zones, revealed by the gravity modeling data. Within its boundaries, the gradient change is either negative or changes in both directions. The reasons for this pattern need further analysis.

**Key words:** Dnieper-Donetsk Basin, heat flow, geothermal gradient, stratum pressure, density heterogeneity, low density zones.

#### References

- Arsiriy, Yu.A. (Ed.). (1984). Atlas of geological structure and oil-and-gas bearing of the Dnieper-Donets Depression. Kiev: UkrSSR Ministry of Geology, UkrSGRI (in Russian).
- Shpak, P.F. (Ed) (1989). Geology and oil and gas potential of the Dnieper-Donets depression. Oil and gas potential. Kyiv: Naukova Dumka, 204 p (in Russian).

- Lukin, A.E. (2005). Deep hydrogeological inversion as global synergistic phenomenon: theoretical and applied aspects. Art. 2. Tectonic and geodynamic aspects of deep hydrogeologic inversion. *Geologicheskiy Zhurnal*, (1), 50—67 (in Russian).
- Lukin, A. E. (1997). Lithogeodynamic factors of oil and gas accumulation in aulacogenic basins. Kiev: Naukova Dumka, 223 p. (in Russian).
- Lukin, A.E., & Shestopalov, V.M. (2021). Tectono-magmatogenering structures in zones of increased geodynamic instability as priority objects for exploration of hydrogen fields. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(4), 1—41. https:// doi.org/10.24028/gzh.v43i5.244038(inRussian).
- Starostenko, V.I., Rusakov, O.M., Pashkevich, I.K., Kutas, R.I., Orlyuk, M.I., Kuprienko, P.Ya.,

Makarenko, I.B., Maksimchuk, P.Ya., Kozlenko, Yu.V., Kozlenko, M.V., Legostaeva, O.V., Lebed, T.V., & Savchenko, A.S. (2015). *Tectonics and hydrocarbon potential of the crystalline basement of the Dnieper-Donets depression*. Kiev: Galaktika, 211 p. (in Russian).

- Usenko, A.P., & Usenko, O.V. (2020). Analysis of geothermic parameters of oil-and gas deposits of the central part of the Dnieper-Donets depression. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(3), 128– 146. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100. v42i3.2020.204705.
- Usenko, O.V., & Usenko, A.P. (2022). The manifestations of modern degassing in the heat flow and deep structure (on the example of Lohvytsky block of Dnieper-Donetsk basin). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(5), 54—76. https:// doi.org/10.24028/gj.v44i5.272327.

УДК 521.93:520.256: 528.2

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322574

# Геодинамічні дослідження в Полтавській гравіметричній обсерваторії за даними астрометричних і GPS-спостережень

# Л.Я. Халявіна, 2025

Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім.С.І. Субботіна НАН України, Полтава, Україна

Розглянуто принципи вивчення змін гравітаційного поля за даними сумісних астрометричних і GPS-спостережень. Проведено аналіз таких спостережень на пункті «Полтава» за період 2001,5—2021,8 років, а саме: горизонтальних зміщень земної поверхні в системі ETRF2014 за даними GPS-моніторингу і дрейфу лінії локального виска, отриманого із спостережень зірок на призмовій астролябії. Тренди меридіанних проєкцій — *N*-компоненти зміщень земної кори і *DZ* — дрейфу лінії виска протилежні за напрямком. Визначено зміщення пункту на північ зі швидкістю +0,29 мм/рік, а дрейфу лінії виска — на південь зі швидкістю –0,9 мсд/рік. Погодження цих параметрів можливе в рамках гіпотези щодо глибинного ( $\hbar$ ≈–30 км) нарощування маси в зоні Полтавського рифтогенного вузла, викликаного магматичною активністю. Джерело аномальної маси, за оцінкою моделі гравітаційного поля EGM2008, має координати  $\lambda$ =34,5 °E и  $\varphi$ =49,85 °N і розміщується на відстані 27,5 км на північ від Полтави. Оцінки збурень гравітаційного поля становлять на пункті «Полтава» в напрямку глибинної аномалії dg≈4 мкГл/рік, а на поверхні над фокусом аномалії — dg≈8 мкГл/рік.

**Ключові слова**: гравітаційне поле, лінія виска, деформації земної кори, GPSмоніторинг, астролябія.

Citation: Khalyavina, L.Ya. (2025). Geodynamic studies at the Poltava Gravimetric Observatory based on astrometric and GPS observations. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 339—343. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322574.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Вступ. Комплексний підхід і суміщення різних засобів вимірювання є важливою умовою при вивченні геодинамічних явищ, обумовлених змінами гравітаційного поля. Ця ідея була фактично втілена А.Я. Орловим при створенні в 1926 р. Полтавської гравіметричної обсерваторії (ПГО) на технологічному рівні початку XX ст. У ПГО нагромаджені багатолітні ряди астрономічних спостережень за варіаціями широти, а також серії гравіметричних і нахиломірних вимірювань. Ці масиви даних містять інформацію про зміни гравітаційного поля. Спочатку завданням астрономічних спостережень було визначення змін широти для вивчення руху полюса. Проте астрометричні інструменти мають як опорну вісь локальний напрямок сили тяжіння — лінію виска. Астрономічний зеніт в ідеалі збігається з напрямком лінії виска. Локальний висок є характеристикою гравітаційного поля. Вивчення змін лінії виска з часом з астрометричних спостережень стало можливим на рубежі XXI ст., коли з'явились високоточні зоряні каталоги (HIPPARCOS, ARIHIP, Tycho-2) і вдосконалені моделі: обертання Землі (IAU2000), руху полюса (C04, C01 IERS) і тектоніки плит (NUVEL-1А). Низькочастотні неполярні зміщення зеніту, отримані при обробці астрометричного ряду з урахуванням указаних ефектів, прийнято вважати локальними варіаціями лінії виска. Реконструкцію багатолітніх зміщень лінії виска з аналізу широтних рядів спостережень зірок, що виконувались в ПГО на призмовій астролябії та зеніттелескопах, описано в статті [Халявина, 2014].

У 2001 р. у ПГО розпочала діяти GPSстанція. Вона забезпечує крім багатьох інших вимірів дані щодо локальних деформацій земної кори, які також можуть містити інформацію про зміни гравітаційного поля.

Колокація різних типів засобів вимірювань розширює можливості геодинамічних досліджень. Приклади сумісних астрометричних і гравіметричних спостережень для відстеження локального гравітаційного поля наведено в публікаціях [Tyshchuk, Pavlyk, 2010; Yang et al., 2013]. Дослідження вікових геодинамічних параметрів за результатами астрометричних спостережень широти і GPS-спостережень було виконано в обсерваторії «Казань» [Мубаракшина и др., 2021]. Втім, у Казані регулярні астрометричні спостереження завершилися в 2006 р., а GPS-моніторинг розпочався з 2008 р. У Полтаві ж сумісні спостереження виконувались близько 20 років: з 2001 по 2021 р. Це дає можливість вивчати не тільки повільні (вікові) параметри, а й спорадичні геодинамічні сигнали як глобального, так і локального походження.

Робота є продовженням досліджень зі сумісного вивчення результатів астрометричних і GPS-спостережень на пункті «Полтава» [Khalyavina, Bulatsen, 2021; Халявина, Заливадный, 2021].

Дані аналізу. Вихідні дані для аналізу — ряди меридіональних проєкцій локальних зміщень земної кори і зеніту пункту «Полтава». Це масиви: 1) {VN} — щоденних значень *N*-компоненти за даними GPS-спостережень у системі ETRF2014 в мережі EUREF Permanent GNSS Network (EPN) (https://www.epncb.oma.be) для станції Полтава (ідентифікатор — POLV00); 2) {*DZ*} — миттєвих значень неполярних варіацій широти, отриманих із спостережень 2-годинних груп зірок на рівних висотах за допомогою призмової астролябії. Основні характеристики рядів для інтервалу 2002,0—2019,8 рр. описані в роботах [Khalyavina, Bulatsen, 2021; Халявина, Заливадный, 2021].

У нинішньому дослідженні ряди емпіричних даних зазнали деяких змін. Так, ряд {*VN*} продовжено до 2022 р. При цьому середня швидкість зміщення *N*-компоненти зменшилась лише на 0,01 мм/рік і дорівнює +0,29 мм/рік.

Ряд {*DZ*} було відкориговано з метою виключення атмосферних збурень, які описані в роботі [Khalyavina, Zalivadny, 2023]. Було виявлено виникнення стійких режимів атмосферної циркуляції тривалістю від 1 до 5 міс. При цьому під час спостережень групи зірок виявлено значущі зміщення рефракційного зеніту в



Значення аномалій Δg уздовж профілів WE (λ=34÷35 °E при φ=49,604 °N) і SN (φ=49÷50,5 °N при λ=34,547 °E) відповідно моделі EGM2008.

Gravity anomaly values along the WE ( $\lambda$ =34÷35 °E at  $\varphi$ =49.604 °N) and SN ( $\varphi$ =49÷50.5 °N at  $\lambda$ =34.547 °E) profiles according to EGM2008 model.

меридіані, переважно в одному напрямку: sign  $(d\varphi/dt)$ =const. Це явище спричинює систематичні спотворення окремих фрагментів масиву {DZ}. На інтервалі 2001—2018,5 виявлено декілька таких фрагментів. Найчастіше вони трапляються під час максимумів сонячної активності (2012—2015 рр.), причому для цього періоду характерні зміщення рефракційного зеніту в південному напрямку ( $d\phi/dt < 0$ ). Відповідно, зменшувались значення {DZ}. Як наслідок, швидкість лінійного дрейфу зеніту зростала в південному напрямку і сягала –2,6 мсд/рік (мсд=мілісекунди дуги), що майже в 5 разів перевищує значення, отримане для повного інтервалу спостережень на астролябії 1962—2021 рр. [Khalyavina, Bulatsen, 2021]. Було оцінено вплив рефракційних збурень для виявлених фрагментів широтного ряду за методикою, прийнятою для обчислення поправок, що забезпечують стабільність інструментальної системи призмової астролябії. Після введення відповідних поправок у масив  $\{DZ\}$ , оцінка швидкості дрейфу зеніту для інтервалу 2001—2021 становила -0,9 мсд/р.

Результати досліджень. Зміни повільних компонент серій {*VN*} і {*DZ*} можуть слугувати індикатором процесів переміщення глибинних мас. У роботі [Khalyavina, Bulatsen, 2021] наведено модель, яка пояс-

нює поведінку параметрів. Протилежний напрямок їх зміщень може бути наслідком зростання аномальної глибинної маси, яка перебуває поблизу пункту. Деформації земної кори, як і рух «підземного» кінця лінії виска, відбуватимуться в напрямку аномалії, а зовнішній кінець виска, спрямований в зеніт, — у протилежному напрямку.

Вибір меридіанних проєкцій параметрів вимірювань обумовлений існуванням на північ від Полтави особливої геологічної структури — Полтавського рифтогенного вузла, де наявні ознаки проникнення під земну кору мантійного плюму і можливе активне транспортування мас із значних мантійних глибин до лінії Мохо, що існує на глибині 30 км [Коболев, Оровецкий, 2005]. Зроблено спробу визначити місцеположення аномальної маси. Якщо в околі пункту «Полтава» існує локація, де відбувається нарощування маси, то в указаній точці слід очікувати максимального значення прискорення сили тяжіння  $\Delta g$  відносно сусідніх точок. Для виявлення локального максимуму  $\Delta q$  застосовано дані моделі гравітаційного поля EGM2008 [http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/ gravitymod/egm2008/]. На рисунку показано зміни гравітаційних аномалій щодо геоїда WGS84 уздовж профілів WE (західсхід) і SN (південь—північ), що проходять через пункт «Полтава». Координати точки

максимального  $\Delta g$ :  $\lambda$ =34,5 °E и  $\varphi$ =49,85 °N;  $\Delta g$ =+20 мГл. Вона знаходиться на відстані 27,5 км від пункту «Полтави».

За даними щодо дрейфу зеніту і розташування фокуса аномалії оцінено збурення гравітаційного поля на пункті та над фокусом аномалії за схемою, наведеною в роботі [Khalyavina, Bulatsen, 2021]. За швидкості дрейфу зеніту  $\varepsilon$ =-0,9 мсд/рік гравітаційне збурення на пункті «Полтава» в напрямку на аномалію дорівнює: dg=sin( $\varepsilon$ )× $g_0$ =4,3 мкГл/рік. Відстань від пункту спостережень до глибинної маси

### Список літератури

- Коболев В.П., Оровецкий Ю.П. Проблемы эндогенных углеводородов рифтогенных узлов Земли. *Геология и полезные ископаемые мирового океана.* 2005. № 2. С. 53—68.
- Мубаракшина Р.Р., Лапаева В.В., Кащеев Р.А., Загретдинов Р.В., Нефедьев Ю.А., Андреев А.О. Анализ широтных наблюдений и данных спутниковых навигационных систем с целью определения геодинамических параметров. *Астроном. журн.* 2021. Т. 98. № 3. С. 255—264. https://doi.org/10.31857/ S0004629921030014.
- Халявина Л.Я. Декадные смещения локального отвеса на пункте Полтава по данным астрометрических наблюдений широты. *Апроба*ция. 2014. № 10. С. 98—103.
- Халявина Л., Заливадный Н. Сравнительный анализ геодинамических параметров, полученных из астрономических и GPSнаблюдений в Полтаве. *Eurasian Union Scientists*. 2021. С. 11—16. https://doi.org/10.31618/ ESU.2413-9335.2021.1.86.1383.

Khalyavina, L., & Zalivadny, N. (2023). About dy-

— близько 42 км. Очікуване збільшення Δg на земній поверхні фокуса аномалії становитиме dg≈8 мкГл/рік.

Висновки. Колокація GPS-станції та астрометричних інструментів дає можливість ефективно відстежувати зміни локального гравітаційного поля та підвищує достовірність їх інтерпретації. Аналіз сумісних астрометричних та GPSспостережень на пункті «Полтава» свідчить на користь гіпотези про зростання магматичної активності в окремих зонах Полтавського рифтогенного вузла.

namic and wave processes in the atmosphere according to astrometry observations with a prism astrolabe. XVII Int. sc. conf. EAGE «Monitoring of geological processes and ecological condition of the environment of 7—10 November 2023. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520132.

- Khalyavina, L.Ya, & Bulatsen, V.G. (2021). Application of observation data of the Poltava gravimetric observatory in the problems of depth geodynamics. *Geophysics and Geodynamics: Predictions and Monitoring of Geological Medium, Lviv* (pp. 21–24).
- Tyshchuk, M., & Pavlyk, V. (2010). Searching of plumb-line variations in the astrometric and gravimetric data of Poltava. *The study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy and astronomy. The* 6<sup>th</sup> Orlov conference proceedings, Kiev (pp. 167—170).
- Yang, Y.Z., Ping, J.S., & Li, Z.X. (2013). Plumb Line Variations (PLV) at China and Their Relation with Earthquakes and Underground Materials Changes. *Open Journal of Geology*, (3), 38—40. https://doi.org/10.4236/ojg.2013.32B009.

# Geodynamic studies at the Poltava Gravimetric Observatory based on astrometric and GPS observations

## L.Ya. Khalyavina, 2025

Poltava Gravimetric Observatory of the S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Poltava, Ukraine

The principles of studying changes in the gravitational field based on joint astrometric and GPS observations are considered. Joint observations at Poltava in 2001.5—2021.8 were analysed (namely, horizontal deformations of the Earth's surface in the ETRF2014 system based on GPS monitoring and the local vertical line drift based on observations of stars with a prismatic astrolabe). The trends of the meridional projections — the *N*-components of crustal displacements and the *DZ*-drift of the vertical line have opposite directions. The observation point shifts to the north at +0.29 mm/yr, and the vertical line drifts to the south at -0.9 mas/yr. The agreement of these parameters is possible supposing (*h*~-30 km) a mass build-up in the Poltava rift node zone caused by magmatic activity. According to the EGM2008 gravity field model, the coordinates of anomaly mass are  $\lambda$ =34.5 °E and  $\varphi$ =49.85 °N. It lies 27.5 km north of Poltava. Estimates of gravity field disturbances are: at the «Poltava» observation point in the direction of the anomaly dg≈4 µGl/yr, on the surface above the anomaly source — dg≈8 µGl/yr.

**Key words:** gravitational field, vertical line, deformations of the Earth's crust, GPS monitoring, astrolabe.

#### References

- Kobolev, V.P., & Orovetskiy, Yu.P. (2005). Problems of endogenous hydrocarbons of rift nodes of the Earth. *Geology and Mineral Resources of World Ocean*, (2), 53—68 (in Russian).
- Mubarakshina, R.R., Nefedyev, Y.A., Lapaeva, V.V., Kashcheev, R.A., Zagretdinov R.V., & Andreev, A.O. (2021). Analysis of latitude observations and data of satellite navigational systems to determine geodynamic parameters. *Astronomicheskiy Zhurnal*, *98*(3), 255—264. https://doi.org/10.31857/S0004629921030014 (in Russian).
- Khalyavina, L.Ya. (2014) Decade displacements of the local plumb line at the Poltava point according to astrometric observations of latitude. *Approbation*, (10), 98—103 (in Russian).
- Khalyavina, L., & Zalivadnyj, N. (2021). Comparative analysis of geodynamic parameters obtained from astronomical and GPS observations in Poltava. *Eurasian Union Scientists*, 11—16. https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2021.1.86.1383 (in Russian).
- Khalyavina, L., & Zalivadny, N. (2023). About dy-

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

namic and wave processes in the atmosphere according to astrometry observations with a prism astrolabe. XVII Int. sc. conf. EAGE «Monitoring of geological processes and ecological condition of the environment of 7—10 November 2023. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520132.

- Khalyavina, L.Ya., & Bulatsen, V.G. (2021). Application of observation data of the Poltava gravimetric observatory in the problems of depth geodynamics. *Geophysics and Geodynamics: Predictions and Monitoring of Geological Medium, Lviv* (pp. 21–24).
- Tyshchuk, M., & Pavlyk, V. (2010). Searching of plumb-line variations in the astrometric and gravimetric data of Poltava. *The study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy and astronomy. The* 6<sup>th</sup> Orlov conference proceedings, Kiev (pp. 167–170).
- Yang, Y.Z., Ping, J.S., & Li, Z.X. (2013). Plumb Line Variations (PLV) at China and Their Relation with Earthquakes and Underground Materials Changes. Open Journal of Geology, (3), 38—40. https://doi.org/10.4236/ojg.2013.32B009.

УДК 521.21/22

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322575

# Геодинамічна еволюція фігури і неоднорідний розподіл густини Землі

А.Л. Церклевич, О.С. Заяць, М.М. Фис, 2025

Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

Наведено результати і їх інтерпретація в дослідженні планетарних розподілів густини та енергії в еліпсоїдальній планеті із використанням додаткової умови — мінімуму гравітаційної енергії Землі. Визначено компоненти градієнта розподілу густини, які характеризують горизонтальні переміщення неоднорідних мас.

Ключові слова: модель PREM будови Землі, гармонічні коефіцієнти геопотенціалу, гравітаційна енергія, горизонтальні градієнти розподілу густини.

Вступ. В останній час вивчення внутрішньої будови Землі базується на отриманні і опрацюванні експериментальних даних структурної сейсмології з їх перерахунком у моделі розподілу густини. У статті [Фис, Церклевич, 2021] подано розв'язок задачі зображення кусково-неперервної функції розподілу густини для сферичної стандартної моделі PREM [Dzewonski, Anderson, 1981] многочленами Лежандра для обчислення розподілу густини потенціалу та енергії в еліпсоїдальній планеті із використанням додаткової умови — мінімуму гравітаційної енергії. В отриманій моделі є надлишок гравітаційної енергії, який зосереджений у внутрішньому і найбільше у зовнішньому ядрі Землі, а також у корі планети. Загальне значення енергії Е для моделі PREM, яка розбита на еліпсоїдальні прошарки, становить 2,3364·10<sup>24</sup> ГДж, а в модифікованій моделі PREM після корегування її за гідростатичною складовою — 2,2828·10<sup>24</sup> ГДж. Переконливим аргументом на користь достовірності побудованої моделі було зменшення гравітаційної енергії для модифікованої моделі PREM на 19 %, що опосередковано підтверджує ступінь негідростатичної складової сучасної Землі приблизно у 22 % за результатами порівняння стиснення «гідростатичного» сфероїда –1/α=1/232 і стиснення сфероїда за супутниковими даними — 1/α=1/298.

Ключовою проблемою в інтерпретації планетарних аномалій гравітаційного поля є розділення збурювальних впливів кори і мантії. Вважається, що менші за порядком гармоніки в розкладі гравітаційного поля зумовлені насамперед неоднорідними масами глибинної частини мантії планети, тоді як більші за порядком гармоніки відображають будову верхньої частини мантії [Церклевич та ін., 2022]. Проаналізувавши літературні джерела, можна зазначити, що планетарні аномалії сили тяжіння інтерпретують по-різному [Hedlin et al., 1997; Церклевич та ін., 2022]. Так, до можливих причин, які впливають на аномальне гравітаційне поле Землі, можна віднести неоднорідності розподілу мас, спричинені геодинамічними і термопружними напруженнями, температурними неоднорідностями мантії, існуванням первинних неоднорідностей, утворених на початковій стадії еволюції планети, теплову і гравітаційну конвекцію в мантії, фазові переходи в мантії тощо.

Результати досліджень. Параметри

Citation: Tserklevych, A.L., Zayats, O.S., & Fys, M.M. (2025). Geodynamic shape evolution and inhomogeneous distribution of the Earth's density. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 344—349. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322575. Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

зовнішнього гравітаційного поля планети містять узагальнену інформацію про її внутрішню будову: кожна гармоніка потенціалу відображає інтегральну умову, якій задовольняє розподіл густини планети. Аналіз побудованих на підставі параметрів гравітаційного поля та інших даних тривимірних моделей розподілу густини Землі виявив, що довгохвильові аномалії сили ваги Землі пов'язані з неоднорідностями розподілу густини, які зосереджені переважно у шаровій оболонці тектоносфери до глибин ~1000 км [Тараканов, Черевко, 1978; Церклевич та ін., 2022].

У статті [Dziewonski et al., 1977] вперше у результаті опрацювання даних сейсмічної томографії було отримано сферичні коефіцієнти розкладу аномалій швидкостей до 3-го порядку для п'яти оболонок (0—670 км, 670—1100 км, 1100—1500 км, 1500—2200 км, 2200—2886 км). На рис. 1, запозиченому з цієї роботи, наведено розподіл аномалій швидкостей у прошарку 0—670 км. Отримана модель демонструє високий рівень збурень нижче глибини 670 км — скачка густини та вище межі ядра та мантії, де максимальні збурення досягають 1—1,5 % середньої швидкості навіть для цієї сильно згладженої моделі. Найбільш вражаючою великомасштабною тривимірною особливістю моделі є кільце високих швидкостей, що огинає басейн Тихого океану в діапазоні глибин від 1000 км до межі ядра та мантії.

Вибір для подальшої інтерпретації аномалій швидкостей в цьому шарі зумовлений двома обставинами: по-перше, центри мас джерел великомасштабних аномалій сили тяжіння, за розрахунками [Тараканов, Черевко, 1978], залягають на глибинах близько 700—900 км, по-друге, до цієї глибини ще простежується значуща кореляція аномалій швидкостей (рис. 1) з аномаліями густини (рис. 2).

На цих картах спостерігається також зростання густини від екватора до полюсів, тому можна припустити, що гармонічні коефіцієнти 2-го порядку розкладу гравітаційного поля відображають тривісність фігури й відхилення еліпсоїдального стиснення від гідростатично рівноважного стану Землі, а ці відхилення, ймовірно, підтримуються внаслідок дії статичних напружень у нижній мантії планети. Таким чином, хоча висновки, зроблені тут щодо походження найнижчих порядків



Рис. 1. Аномалії швидкості  $\Delta V_P$  у шарі 0—670 км, за даними [Dziewonski et al., 1977]. Fig. 1. Velocity anomalies in the 0—670 km layer according to [Dziewonski et al., 1977].



Рис. 2. Розподіл аномальної густини Δρ Землі, зумовлений гармонічними коефіцієнтами до 12-го порядку на глибині 700 км. Ізолінії проведені через 2·10<sup>-1</sup> кг/м<sup>3</sup>.

Fig. 2. Distribution of the Earth's anomalous density  $\Delta \rho$  caused by harmonic coefficients up to the 12th order at a depth of 700 km. The isolines are drawn at intervals of  $2 \cdot 10^{-1}$  kg/m<sup>3</sup>.

поля геопотенціалу, не є переконливими, вони вказують на спосіб, у який результати сейсмології можуть бути використані для вирішення деяких основних питань геодинаміки.

Побудована модель тривимірного розподілу густини з урахуванням гармонік до 12-го порядку також виявляє компенсаційний механізм геоізостазії в перерозподілі неоднорідних мас на глибинах від 200 до 3000 км. Наочно таку особливість розподілу аномальної густини вздовж радіуса у довільно вибраних напрямках (серед них екстремальних значень висот геоїда) ілюструють профілі аномалії густини Др. зображені на рис. З. Тут можна побачити, що вздовж радіуса для кожного напрямку додатні і від'ємні значення аномалії густини переважно частково взаємно скомпенсовані. Однак для Індійського мінімуму висоти геоїда (φ=5°; λ=80°; ζ=-105 м) екстремальне від'ємне значення аномальної густини досягається в зовнішньому ядрі і компенсація впродовж радіуса відсутня. Зміни аномальної густини вздовж радіуса для інших характерних напрямків засвідчують, що неоднорідні маси переважно сконцентровані у верхній і нижній мантії. Крім того, зазначимо, що повна геоізостатична компенсація досягається лише для двох профілів уздовж радіуса (№ 7 і 4 сумарні аномальні маси вздовж радіусів близькі до нуля). Також зауважимо, що для інших профілів сумарна аномальна густина вздовж радіусів змінюються від +1 до –6,3 кг/м<sup>3</sup>. Якщо прийняти відсутність компенсації аномальної густини для Індійського мінімуму висоти геоїда за 100 %, то



Рис. 3. Графіки розподілу аномальної густини  $\Delta \rho$  Землі вздовж радіуса в напрямках вибраних значень висот геоїда в точках з координатами:  $1 - \phi = -3^{\circ}$ ,  $\lambda = 145^{\circ}$ ,  $\zeta = 79$  м;  $2 - \phi = 5^{\circ}$ ,  $\lambda = 80^{\circ}$ ,  $\zeta = -105$  м;  $3 - \phi = 50^{\circ}$ ,  $\lambda = -10^{\circ}$ ,  $\zeta = 59$  м;  $4 - \phi = 30^{\circ}$ ,  $\lambda = -70^{\circ}$ ,  $\zeta = -51$  м;  $5 - \phi = -55^{\circ}$ ,  $\lambda = 50^{\circ}$ ,  $\zeta = 41$  м;  $6 - \phi = 20^{\circ}$ ,  $\lambda = -120^{\circ}$ ,  $\zeta = -47$  м;  $7 - \phi = 0^{\circ}$ ,  $\lambda = -60^{\circ}$ ,  $\zeta = -13$  м. Fig. 3. Anomalous density distribution along the radius in the directions of the selected geoid heights at points  $1 - \phi = -3^{\circ}$ ,  $\lambda = 145^{\circ}$ ,  $\zeta = 79$  м;  $2 - \phi = 5^{\circ}$ ,  $\lambda = 80^{\circ}$ ;  $\zeta = -105$  м,  $3 - \phi = 50^{\circ}$ ,  $\lambda = -10^{\circ}$ ,  $\zeta = 59$  м,  $4 - \phi = 30^{\circ}$ ,  $\lambda = -70^{\circ}$ ,  $\zeta = -51$  м;  $5 - \phi = -55^{\circ}$ ,  $\lambda = 50^{\circ}$ ,  $\zeta = -105$  м,  $3 - \phi = 50^{\circ}$ ,  $\lambda = -10^{\circ}$ ;  $\zeta = 59$  м,  $4 - \phi = 30^{\circ}$ ,  $\lambda = -70^{\circ}$ ,  $\zeta = -51$  м;  $5 - \phi = -55^{\circ}$ ,  $\lambda = 50^{\circ}$ ,  $\zeta = 41$  м;  $6 - \phi = 20^{\circ}$ ,  $\zeta = -47$  м;  $7 - \phi = 0^{\circ}$ ,  $\lambda = -60^{\circ}$ ,  $\zeta = -13$  м.



Рис. 4. Зображення векторних похідних  $\partial \delta / \partial x_1$ ,  $\partial \delta / \partial x_2$  розподілу аномалій густини на глибині 700 км. Fig. 4. Vector derivatives  $\partial \delta / \partial x_1$ ,  $\partial \delta / \partial x_2$  of the density anomaly distribution at a depth of 700 km.

геоізостатична недокомпенсація для всіх інших профілів буде змінюватись від 1 (№ 4) до 57 % (№ 6).

Важливою інформацією для планетарної геолинаміки є визначення компонент градієнта  $\partial \delta / \partial x_1$ ,  $\partial \delta / \partial x_2$  розподілу густини, які характеризують горизонтальні переміщення неоднорідних мас [Церклевич та ін., 2022]. Їх найкраще відображати у вигляді вектор-діаграм напрямків горизонтальних переміщень мас (рис. 4). Тут чітко простежується зародження в екваторіальній зоні двох вихрових потоків, які охоплюють екваторіальну частину Південної Америки та Індонезію з прилеглими океанічними островами від Австралії до Південного Китаю. Все це дає підстави для припущення, що переміщення континентів пов'язане з тангенціальними силами, які генеруються в тектоносфері через наявність неоднорідних мас.

Експериментальним підтвердженням неоднорідної структури Землі є дані щодо аномалій швидкостей поширення сейсмічних хвиль, які виявлені за результатами сейсмічної томографії у верхній та нижній мантії і навіть у оболонках, що примикають до ядра, а також у зовнішньому і внутрішньому ядрі Землі [Hedlin et al., 1997]. Всі ці факти обґрунтовують висновок про відхилення структури оболонок Землі від гідростатично рівноважного стану, що є визначальним чинником для досліджень у планетарній геодинаміці.



Рис. 5. Модель дрейфу материків на сучасному етапі. Максимальна довжина стрілки відповідає швидкості мантійних течій — 12 см/рік [Трубицын, 2019]. Fig. 5. Model of the current continental drift. The maximum length of the arrow corresponds to the speed of mantle currents — 12 cm/year [Trubitsyn, 2019].

На сьогодні більшість авторитетних геофізиків і геологів дійшли висновку, що основною рушійною силою тектоніки плит є загальномантійна теплова конвекція. У статті [Трубицын, 2019] отримано моделі, які показують еволюцію мантійної конвекції з урахуванням взаємодії з усіма шістьма континентами та великими островами реальної форми. На рис. 5 показано числову модель дрейфу континентів, запозичену з цієї роботи. У разі порівняння векторів горизонтального переміщення неоднорідних мас на глибині 700 км (див. рис. 4) з векторами швидкості мантійних течій (див. рис. 5) можна помітити загальні подібні закономірності у просторовому їх розміщенні. Зокрема, на цих рисунках чітко відстежується подібне розміщення векторів для континентальних територій, таких як Північна та Південна Америка, Австралія, Європа, Південна Африка. Менш подібну картину у напрямках розміщення векторів спостерігаємо лише для північної частини Африканського та східної частини Азійського континентів.

Висновки. Запропоновані методи передбачають апроксимацію дискретного розподілу неоднорідних мас кусково-неперервними функціями. Останнє припущення випливає із самої методики побудови тривимірних моделей розподілу густини і приводить до істотно згладжених значень аномалій густини у верхніх оболонках планети завдяки адитивному типу гравітаційного поля, коли сума полів (ефектів) окремих об'єктів дорівнює загальному полю. Латеральні аномалії розподілу густини і їх градієнти визначені за результатами математичного моделювання розв'язку

## Список літератури

- Тараканов Ю.А., Черевко Т.И. Интерпретация крупнейших гравитационных аномалий Земли. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1978. № 4. С. 25—42.
- Трубицын В.П. Проблемы глобальной геодинамики. *Физика Земли*. 2019. № 1. С. 180—198. https://doi.org/10.31857/S0002-333720191180-198.
- Фис М.М., Церклевич А.Л. Вплив принципу мінімуму потенціальної енергії на розподіл густини і гравітаційної енергії Землі для моделі PREM. *Геофиз. журн.* 2021. № 1. T. 43. C. 194—210. https://doi.org/ 10.24028/ gzh.0203-3100.v43i1.2021.225549.
- Церклевич А.Л., Фис М.М., Шило Є.О., Заяць О.С. Планетарна геодинаміка: Фігура,

оберненої планетарної задачі гравіметрії, що може слугувати ефективним методом вивчення глобальних переміщень мантійних мас під дією гравітаційних сил, направлених на досягнення мінімуму гравітаційної енергії.

гравітаційне поле, внутрішня будова Землі і планет земної групи. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2022, 336 с.

- Dzewonski, A., & Anderson, D. (1981). Preliminary reference Earthmodel. *Physics of the Earth and Planetary Interiors, 25, 297—356.* https://doi. org/10.1016/0031-9201(81)90046-7.
- Dziewonski, A.M, Hager, B.H, & O'Connell, R.J. (1977). Large scale heterogeneities in the lower manthle. *Journal of Geophysical Research*, *82*(2), 239—255. https://doi.org/10.1029/ JB082i002p00239.
- Hedlin, M.A.H., Shearer, P.M., & Earle, P.S. (1997). Seismic evidence for small-scale heterogeneity throughout the Earth's mantle. *Nature*, *387*, 145—150. https://doi.org/10.1038/387145a0.

# Geodynamic shape evolution and inhomogeneous distribution of the Earth's density

# A.L. Tserklevych, O.S. Zayats, M.M. Fys, 2025

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

The paper presents the results and their interpretation in the study of planetary distributions of density and energy in an ellipsoidal planet under an additional condition — the minimum gravitational energy of the Earth. Also, the components of the density distribution gradient characterizing the horizontal movements of inhomogeneous masses are determined.

**Key words:** PREM model of the Earth structure, harmonic coefficients of the geopotential, gravitational energy, horizontal gradients of the density distribution.

#### References

- Tarakanov, Y.A., & Cherevko, T.I. (1978). Interpretation of the largest gravitational anomalies of the Earth. *Izv. USSR AS. Earth Physics*, (4), 25—42 (in Russian).
- Trubitsyn, V.P. (2019). Problems of global geodynamics. *Physics of the Earth*, (1), 180—198. https://doi.org/10.31857/S0002-333720191180-198.

- Tserklevych, A.L., Fis, M.M., Shylo, E.O., & Zayats, O.S. (2022). *Planetary geodynamics: Shape, gravitational field, internal structure of the Earth and planets of the Earth group.* Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 336 p. (in Ukrainian).
- Fis, M.M., & Tserklevich, A.L. (2021). Influence of the principle of minimum potential energy on the distribution of the Earth's density and gravitational energy for the PREM model. *Geophysical Journal*, *43*(1), 194—210. https://doi. org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225549 (in Ukrainian).
- Dzewonski, A., & Anderson, D. (1981). Preliminary reference Earthmodel. *Physics of the Earth and Planetary Interiors, 25, 297—356.* https://doi. org/10.1016/0031-9201(81)90046-7.
- Dziewonski, A.M, Hager, B.H, & O'Connell, R.J. (1977). Large scale heterogeneities in the lower manthle. *Journal of Geophysical Research*, *82*(2), 239—255. https://doi.org/10.1029/JB082 i002p00239.
- Hedlin, M.A.H., Shearer, P.M., & Earle, P.S. (1997). Seismic evidence for small-scale heterogeneity throughout the Earth's mantle. *Nature*, *387*, 145—150. https://doi.org/10.1038/387145a0.

УДК551.24+553.98(477.8)

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322576

# Денудація в Українських Карпатах на неотектонічному етапі

# В.Є. Шлапінський, М.І. Павлюк, О.З. Савчак, Я.Г. Лазарук, М.М. Тернавський, 2025

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна

У Карпатському регіоні простежено декілька етапів процесів денудації. Перший пов'язаний з так званим передполяницьким розмивом, який відбувся після інверсії флішового басейну седиментації при переході до формування молас. У Бориславсько-Покутському покриві денудація тривала близько 800 тис. років. Наступний етап денудації відбувався під час насувних процесів та по їх завершенні, триває й нині. Загалом за мільйони років осадові відклади регіону зазнали денудації на глибину в декілька кілометрів.

Ключові слова: Українські Карпати, процеси денудації, флішовий басейн.

Вступ. Важливу роль при збереженні потенційно перспективних стосовно промислової нафтогазоносності структур і літологічних комплексів відігравали денудаційні процеси. Від їх тривалості та інтенсивності залежала повнота розрізу карпатського флішу і структур у флішовому чохлі. Навіть з побіжного погляду на геологічну карту Карпат помітне поширення на поверхні крейдових відкладів, якими починався розріз флішу. Палеогенові відклади завтовшки 1—4 км на таких ділянках відсутні, очевидно через розмив. Він відбувався впродовж декількох етапів.

**Результати досліджень.** Перший етап розмиву мав місце при переході флішового етапу до моласового. У Бориславсько-Покутському покриві помітний передпо-

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Shlapinsky, V., Pavlyk, M., Savchak, O., Lazaruk, Ya., & Ternavsky, M. (2025). Denudation of the Ukrainian Carpathians of the neotectonic stage. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 349—353. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322576.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ляницький розмив. Суть його така. Після завершення формування розрізу олігоцену відбулась інверсія басейну седиментації. З її настанням почалося руйнування осадів флішу. Пізніше в результаті закладання Передкарпатського прогину водні маси трансгресували на зовнішню частину флішових відкладів, уже значною мірою розмитих, і почалося формування поляницько-воротищенських відкладів міоцену. Частина карпатських геологів не визнає такої послідовності подій [Досин, 1972; Ващенко, Гнилко, 2003]. Найбільш послідовним опонентом передполяницької перерви є Г.Д. Досин. Цей дослідник указував, що не має даних, які би свідчили про широке площинне поширення так званого передполяницького розмиву. Відсутня також кутова незгідність між поляницькими та більш давніми утвореннями [Досин, 1972]. Показовими є погляди В.О. Ващенка і О.М. Гнилка [Ващенко, Гнилко, 2003], які пояснювали залягання поляницько-воротищенських відкладів на різних рівнях менілітового комплексу фаціальним заміщенням. На їхню думку, таке заміщення стосується не тільки верхньої і середньої підсвіт менілітової світи, а й нижньої та навіть верхів еоцену. Це свідчило б про синхронність нагромадження неогенових моласових і палеогенових флішових відкладів, що на думку О.С. Вялова, прийняти ніяк не можна [Объяснительная..., 1984]. До того ж таке фаціальне заміщення на зведених стратиграфічних схемах автори зображають виключно у самих верхах палеогенових відкладів конкретних розрізів і ніколи в середині. Отже, це не заміщення, а розмив. Названі дослідники також заперечують наявність кутової незгідності між менілітовими і поляницькими відкладами, приклади якої наводить у своїй праці О.О. Орлов [Орлов, 1965].

Так звані другі кремені Карпат. У геологічній літературі згадується про так звані другі кремені, які поширені в розрізі менілітової світи Покутсько-Буковинських Карпат. Послідовність пачок, що складають розріз менілітової світи у цій одиниці, згідно з фактичним матеріалом, така: нижньоменілітова підсвіта (підкременева пачка; нижньокременевий горизонт; темноколірна товща з тилявським горизонтом у нижній частині і клівськими пісковиками та пачками і прошарками чорних та сірих аргілітів — вгорі). Середньоменілітова підсвіта (другі кремені; малопотужна темноколірна кремениста пачка (до 30 м); сіроколірна карбонатна пачка (1—200 м). Поляницька світа (сіроколірна карбонатна товща з перевідкладеними фрагментами менілітових утворень).

Деякі дослідники вважали, що другі кремені — це верхньокременевий горизонт, під ним залягає нерозчленована нижня+середньоменілітова підсвіта, а вище нього — невеликий фрагмент верхньоменілітої підсвіти, на якому стратиграфічно згідно лежить сіроколірна поляницька світа міоцену.

Із зіставлення розрізів світ Покутсько-Буковинських складок і розрізів Берегової і Орівської скиб Скибового покриву однозначно випливає (літологічний склад, потужність пачок і їх черговість), що другі кремені (фактично, це треті кремені, з огляду на тилявську пачку) відповідають рівню маркувального головецького горизонту смугастих вапняків і кременів.

У розрізах північних скиб так само, як у Покутсько-Буковинських складках, над «другими кременями» згідно залягає малопотужна (10—50 м) чорна кремениста пачка і тільки вище неї з'являються сірі карбонатні породи середньоменілітової підсвіти, а вже над останніми — темноколірні породи верхньоменілітової підсвіти з верхньоменілітовим кременевим горизонтом у підошві.

Відмінність від північних скиб полягає в тому, що в Покутсько-Буковинських складках (північних) збереглась тільки частина середньої підсвіти (до 1—15 м), на якій з розмивом залягає літологічно подібна поляницька світа міоцену. Інакше кажучи, більша частина середньої підсвіти, а тим більше верхньої разом з верхньокременевим горизонтом там відсутня через передполяницький розмив. Підтверджується зіставлення розрізів північних скибі Покутсько-Буковинських складок наявністю горизонту так званих битих мушель (властивий тільки цим розрізам). Він стратиграфічно згідно залягає у підошві сіроколірної середньоменілітової підсвіти — темноколірні пісковики з мушлями верхів нижнього олігоцену [Максимов, 1959].

Вище з розмивом на залишках середньоменілітої підсвіти залягають поляницькі відклади, також складені сірими карбонатними породами. Однак в поляницьких шарах є конгломерати з уламками перевідкладених темноколірних кременистих порід, які походять від розмиву менілітових відкладів олігоцену і яких не може бути в розрізі середньоменілітової підсвіти. Наявні й великі олістоліти порід олігоцену і еоцену, а також загіпсованість матриксу.

На Державній геологічній карті-200 аркушів «Чернівці» та «Івано-Франківськ» [Шлапінський та ін., 2020] подано іншу, помилкову схему поділу менілітової світи. Нерозчленована менілітова світа (конкретно не повідомляється, який обсяг вона займає), як указано в записці до карти, поступово переходить у сіроколірну поляницьку товщу. При цьому автори карти про поширення в усіх лусках Покутсько-Буковинських складок маркуючий горизонт у смугастих вапняків і кременів навіть не згадують. Власне, неприйняття його до уваги, а також інформації подібного характеру стосовно Берегової та Орівської скиб і призвело до такого хибного висновку.

У Бориславсько-Покутському покриві поляницька світа через тривалий розмив на всій його території залягає на різних рівнях не тільки олігоцену, а й еоцену. За підрахунками одного з авторів мінімальна тривалість перерви і розмиву становила 800 тис. років [Шлапінський, 2012]. Тільки після етапу інверсії і розмиву верхів олігоцену відбулися прогинання його зовнішнього ареалу і трансгресія з нагромадженням моласових відкладів поляницької світи. Отже, ні про який поступовий перехід між моласами і флішем у Бориславсько-Покутському покриві не йдеться. На решті території Карпат моласові відклади поляницької світи або її вікові аналоги відсутні [Павлюк та ін., 2019; Шлапінський та ін., 2020], за винятком Закарпатського прогину. Поляницька трансгресія можливо охоплювала тільки північно-східну частину Карпат. Південно-західніше розмив флішових відкладів продовжувався. Наступний етап денудації відбувався в ході насувних процесів і по їх завершенні в Зовнішніх Карпатах. Сформовані таким чином верхні покривні одиниці зберігали нижні від денудації. Коли це відбувалось? Біля селища Перегинське Долинського району Івано-Франківської області розташований хутір Рошнято. Там зберігся ерозійний останець, складений породами верхньобаден-нижньосарматського віку, він перекриває, за М.Ю. Вулем, насуви всередині Бориславсько-Покутського покриву [Клиточенко и др., 1964].

Висновки. Отже, на час сформування згаданого вище останця насувні процеси вже завершились. Останець з'явився внаслідок верхньобаденської трансгресії, яка також зберігала Карпати певною мірою від денудації. На території Польщі сліди нижньобаденської трансгресії у вигляді ерозійних останців наявні у Скольській одиниці (Скибовому покриві), причому баденські відклади і перекривають фліш й поширені у його піднасуві [Ксеншкевич и др., 1968]. Вочевидь, у нижньому бадені насувні процеси ще продовжувались, а у верхньому бадені—нижньому сарматі вже завершились. На всій території Карпат денудація тривала і під час дії насувних процесів, і після їх завершення. У пліоцені-плейстоцені мали місце головне вертикальні рухи, то ж на деяких ділянках денудація то прискорювалась, то уповільнювалась. Загалом за мільйони років, коли вона продовжувалась, було денудовано декілька кілометрів відкладів карпатських порід. Зазначені етапи денудації мали зв'язок з фазами складчастості — савською (на межі олігоцену та міоцену) і післяранньосарматською [Вялов и др.,1981].

#### Список літератури

- Ващенко В.О., Гнилко О.М. Про стратиграфію соленосних молас Українського Прикарпаття. *Зб. наук. праць УкрНДГРІ*. 2003. № 2. С. 71—78.
- Вялов О.С., Гавура С.П., Даныш В.В., Лещух Р.И., Пономарева Л.Д., Романив А.М., Циж И.Т. История геологического развития Украинских Карпат. Киев: Наук. думка, 1981, 180 с.
- Досин Г.Д. Олигоценовые отложения северного склона Украинских Карпат: *автореф. guc....канg.reon.-мин.наук*. Львов, 1972, 24 с.
- Клиточенко И., Анцупов П., Вуль М. О времени складкообразования во Внутренней зоне Предкарпатского краевого прогиба. В кн.: *Нефтяная и газовая геология.* Москва, 1964, С. 8—11.
- Ксеншкевич М., Самсонович Я., Рюле Э. *Очерк геологии Польши.* Москва: Недра, 1968, 310 с.
- Максимов А.В. Стратиграфия и фауна моллюсков палеогена Восточных Карпат: *автореф. guc. ... канд. геол.-мин. наук.* Львов, 1959, 22 с.
- Объяснительная записка к региональной стратиграфической схеме палеогеновых отложений Украинских Карпат. Андреева-

Григорович А.С., Вялов О.С., Гавура С. П. и др., Киев: ИГН УССР, 1984. 51 с. (Препринт/Институт геологических наук АН УССР; 84—19).

- Орлов А.А. Тектоническое строение и оценка перспектив нефтегазоносности Покутско-Буковинской части Предкарпатья: *автореф. guc. ... канд. геол.-мин. наук.* Ивано-Франковск, 1965, 24 с.
- ПавлюкМ.І., МедведсвА.П., ШлапінськийВ.Є., Різун Б.П., Тернавський М.М. Проблемні аспекти формування Карпат (на прикладі українського сегменту). Геологія і геохімія горючих копалин. 2019. № 3(180) С. 5—20. https://doi.org/10.15407/qqcm2019.03.005.
- Шлапінський В.Є. Про границю між олігоценом і міоценом в Бориславсько–Покутському покрові Передкарпатського прогину і Складчастих Карпатах. *Праці НТШ. Геол. збірник.* 2012. Т. XXX. С. 100—118.
- Шлапінський В., Павлюк М., Тернавський М. Критичний розгляд проблемних питань стратиграфії і тектоніки Складчастих Карпаті прилеглих територій на прикладі Держгеолкарти-200. *Геологія і геохімія горючих копалин.* 2020. № 1(182). С. 5—39. https:// doi.org/10.15407/ggcm2020.01.005.

# Denudation of the Ukrainian Carpathians of the neotectonic stage

#### V. Shlapinsky, M. Pavlyk, O. Savchak, Ya. Lazaruk, M. Ternavsky, 2025

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

Several stages of denudation processes have been traced in the Carpathian region. The first is associated with the so-called pre-Polyanytsya erosion, which took place after the inversion of the flysch sedimentation basin during the transition to the formation of molasses. In the Boryslav-Pokutskyi nappe, denudation had lasted for approximately 800 thousand years. The next stage of denudation occurred during thrust processes and after their completion and continues to this day. Over the millions of years, several kilometers of Carpathian rock deposits have been denuded.

Key words: Ukrainian Carpathians, denudation processes, flysch sedimentation basin.

### References

- Vashchenko, V. O., & Hnylko, O.M. (2003). On the stratigraphy of salt-bearing molasses of the Ukrainian Carpathian region. *Collection* of scientific works of the UkrNDGRI, (2), 71— 78 (in Ukrainian).
- Vyalov, O.S., Gavura, S.P., Danish, V.V., Leschukh, R.I., Ponomareva, L.D., Romaniv, A.M., & Tsizh I.T. (1981). *History of geological development of the Ukrainian Carpathians*. Kiev: Naukova Dumka, 180 p. (in Russian).
- Dosyn H.D. (1972). Oligocene deposits of the northern slope of the Ukrainian Carpathians. *Candidate's thesis*. Lvov, 24 p. (in Russian).
- Klitochenko, I., Antsupov, P., Vul, M. (1964). On the time of folding in the Inner zone of the Pre-Carpathian marginal depression. In *Oil* and Gas Geology (pp. 8–11). Moscow (in Russian).
- Ksenshkevich, M., Samsonovich, Ya., & Ryule, E. (1968). *Essay on the Geology of Poland.* Moscow: Nedra, 310 p. (in Russian).
- Maksimov, A.V. (1959). Stratigraphy and fauna of mollusks of the Paleogene of the Eastern Carpathians. *Candidate's thesis*. Lvov, 22 p. (in Russian).
- Explanatory note to the regional stratigraphic scheme of the Paleogene deposits of the Ukrainian Carpathians. (1984). Andreeva-Grig-

orovich A.S., Vyalov O.S., Gavura S.P., et al. Kyiv: IGN UkrSSR, 51 p. (Preprint/Institute of Geological Sciences of the Academy of Sciences of the UkrSSR; 84—19) (in Russian).

- Orlov, A.A. (1965). Tectonic structure and assessment of oil and gas potential of the Pokutsko-Bukovina part of the Carpathian foothills. *Candidate's thesis.* Ivano-Frankovsk, 24 p. (in Russian).
- Pavliuk, M., Medvediev, A., Shlapinskyi, V., Rizun, B., & Ternavskyi, M. (2019). Problematic aspects of the formation of the Ukrainian segment of the Carpathians. *Geology & Geochemistry of Combustible Minerals*, (3), 5—20. https://doi.org/10.15407/ggcm2019.03.005 (in Ukrainian).
- Shlapinskyi, V. (2012). On the boundary between the Oligocene and Miocene in the Boryslav– Pokutsky nappe of the Precarpathian trough and the Folded Carpathians. *Proc. of the National Geological Survey. Geological Collection*, XXX, 100—118 (in Ukrainian).
- Shlapinskyi, V., Pavliuk, M., Ternavskyi, M. (2020). Critical consideration of problematic questions of stratigraphy and tectonics of the folded Carpathians and adjacent territories on the pattern of State geological map-200. Geology & Geochemistry of Combustible Minerals, (1), 5—39. https://doi.org/10.15407/ ggcm2020.01.005 (in Ukrainian).

УДК 550.837:550.8.05

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322577

# Сейсмічна активність Дніпровсько-Донецької западини, геодеформаційні поля та геотектоніка її сеймогенних зон

# В.П. Шляховий<sup>1</sup>, Р.В. Шиян<sup>1</sup>, А.С. Єльченко-Лобовська<sup>2</sup>, Р.В. Шляховий<sup>3</sup>, 2025

<sup>1</sup>Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Полтава, Україна <sup>2</sup>Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Shliahovyi, V.P., Shyian, R.V., Yelchenko-Lobovska, A.S., & Shliahovyi, R.V. (2025). Seismic activity of the Dnieper-Donetsk Basin, geodeformation fields and geotectonics of its seimogenic zones. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 353—358. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322577.

## <sup>3</sup>ГУ Пенсійного фонду України в Полтавській обл., відділ ретроконверсії, Полтава, Україна

Досліджено особливості землетрусів у центрі Дніпровсько-Донецької западини. Протягом століть цих явищ не виникало, але в цьому десятилітті поблизу м. Полтава вони регулярно стаються. Їх причини невідомі. Події можуть генеруватись природнотехногенними чинниками: активізацією геодеформаційних полів, інтенсивним видобутком флюїдів, а також інтенсивною техногенною діяльністю. Виконано порівняльний аналіз сейсміки, геофізики западини та подібних нафтогазових провінцій. Ключові слова: землетруси, геотектоніка, Дніпровсько-Донецька западина.

Вступ, стан проблеми. Землетруси в Дніпровсько-Донецькій западині (ДДЗ), які ще два-три десятиліття тому вважали неможливими, сьогодні є реальністю. Тут, за поточне десятиліття сталося майже два десятки землетрусів з магнітудами М від 2,0 до 4,6 (±0,2), частину яких відчували люди. Причому майже всі землетруси виникли в Полтавському регіоні, тобто в центрі ДДЗ, де протягом двох століть відчутних землетрусів не спостерігали (за винятком Вранчської генерації з *М*>6,0). Їх причини і граничні магнітуди не встановлено, але такі події можуть генеруватись природними, техногенними чи природньотехногенними чинниками. Це спонукає до ретельного їх вивчення, насамперед, геофізичних, геологічних та геотектонічних особливостей гіпоцентральної зони і прилеглих територій.

Центральну частину ДДЗ до 2010 р. вважали асейсмічною, тому місцеву сейсмічність не вивчали, а при сейсморайонуванні Полтавщину відносили до п'ятибальної сейсмічності [Кендзера та ін., 2019]. Нагадаємо, що до 2010 р. інформацію про сейсмічний режим ДДЗ отримували від сейсмічних станцій на відстані понад 500 км (у Криму та на заході України). Після сейсмоподій в 2010 і в 2015 рр. з'явилось кілька публікацій про землетруси в центрі ДДЗ, їх особливості та можливість існування тут сейсмогенеруючих зон.

Нині після відчутних сейсмоподій 2010 і 2015 pp. сейсміку в кількох пунктах ДДЗ досліджують Інститут геофізики НАН України ім. С.І. Субботіна (ІГФ), Головний центр спеціального контролю Національного космічного агентства України (ГЦСК) і Полтавська гравіметрична обсерваторія ІГФ НАН України (ПГО).

Так, у публікації [Кутас и др., 2015] досліджено записи землетрусів з *M*=3,4÷3,6 (2010.05.14 23:12:17) і з *M*=4,6÷4,8 (2015.02.03 05:56:30) та розглянуто деякі питання геотектоніки їх гіпоцентрів і прилеглих зон. У статті [Чалий та ін., 2015] детально досліджено Полтавсько-Сумський землетрус, де, крім аналізу цифрових сейсмічних записів вивчено макросейсміку епіцентральної зони шляхом анкетувань та аналізу пошкоджень споруд.

Проблему існування сейсмогенних зон у ДДЗ вивчали [Трипольский и др., 2012]. У цій статті на підставі аналізу розломноблокової тектоніки та геофізичних даних локалізовано кілька можливих сейсмогенеруючих зон. Однак реальні координати погано збігаються з прогнозованими і рішень означених проблем немає. Потрібні додаткові геофізичні дані та записи на предмет визначення напружено-деформаційного режиму регіону ДДЗ й оцінювання його сейсмогенеруючого потенціалу.

**Методика і результати досліджень.** У ПГО ІГФ спостереження і вивчення сейсміки виконуються як складова частина геодинамічних досліджень ДДЗ: земних припливів, сучасних рухів земної кори, вільних коливань Землі та різних квазістатичних геологічних процесів. Для цього використовують припливний гравіметр та автокомпенсаційні сейсмонахиломіри. Амплітудно-частотні характеристики останніх лежать у діапазоні від нульових до верхніх частот сейсміки (до 20—40 Гц), тобто відповідають періодам від 0,02 с до десятків тисяч секунд і більше. Крім широкополосності перевагами сейсмоприпливних приладів є те, що вони точніші та чутливіші до статичних і квазістатичних деформаційно-гравітаційних сигналів, які не записують стандартні сейсмометри. У 2008—2010 р. було налагоджено широкосмугову реєстрацію сейсміки (від 0 до 20 Гц) і в ПГО з'явилась можливість вивчати місцеву сейсміку та квазістатичні деформаційні явища і процеси, які можуть супроводжують землетруси.

Перший високоякісний цифровий запис місцевого землетрусу (*M*=3,5), що стався 14 травня 2010 р. у 23:16:00 (UTC) під Карлівкою в 45 км від Полтави, отримано в Судіївці (геодинамічна станція ПГО, 14 км). Це була парна сейсмоподія: перший, слабший, землетрус (*M*=1,8÷2,2) стався на 9 хв раніше [Шляховий та ін., 2011]. У цій публікації також розглянуто особливості та переваги реєстрації сейсмосигналів земноприпливними приладами. З 2010 р. місцеві сейсмоподії в ПГО записуються в моніторинговому режимі. На сьогодні записано майже два десятки цих землетрусів, більшість яких відчували люди (рисунок, таблиця). Всі сейсмоподії, за винятком № 17, якісно записані компенсаційними сейсмонахиломірами по EW та NS і лише деякі — гравіметром. Сейсмоприпливні сигнали при цих землетрусах досліджуються спектральним, кореляційним, фільтраційним та іншими аналітичними методами.

Становлять інтерес дослідження ши-



Картосхема Полтавської області з місцезнаходженням епіцентрів землетрусів, які стались у центральній частині Дніпровсько-Донецької западини в 2010—2024 рр.: 1 — розломи; 2 — межі південної та північної прибортових зон западини.

Map of Poltava oblast with the location of the epicenters of earthquakes in the central part of the Dnieper-Donetsk Basin in 2010—2024: *1* — faults; *2* — boundaries of the southern and northern coastal zones of the DDB.

N⁰	Дата і час		φ	λ	Н	М	L	Область
1	2010/05/14 23:03:00	1	49,4	35,0	_	>2,2	_	Полтавська
2	2010/05/14 23:12:00	1,2	49,47	35,09	10	4,1	42	»
3	2014/01/10 15:30:00	1	_	_	_	3—4	—	»
4	2015/02/03 05:56:30	1,2	50,65	34,21	10	4,6	118	Полтавська і Сумська
5	2021/12/07 14:45:28	2	51,94	32,61	10	3,4	293	Чернігівська
6	2022/06/21 14:37:11	1,2	49,45	34,33	11	3,5	23	Полтавська
7	2022/09/12 02:21:09	1,2	49,08	37,09	8	3,3	193	Харківська
8	2022/10/03 11:49:39	1,2	49,43	33,87	_	3,4	52	Полтавська
9	2022/12/04 05:00:57	3	49,56	34,24	_	2,2	22	»
10	2023/01/14 21:19:44	1,3	49,47	34,32	_	2,7	22	»
11	2023/04/03 17:06:03	1,3	49,21	35,18	—	2,9	64	Харківська
12	2023/05/26 18:38:49	1,2	49,49	34,09	7	4,0	35	Полтавська
13	2023/06/08 07:23:41	1,2	49,44	34,88	11	4,0	30	»
14	2023/07/23 18:42:05	1,3	49,49	33,99	—	2,6	42	»
15	2024/03/01 00:22:46	1,3	49,47	34,09	10	3,6	36	»
16	2024/10/19 22:31:41	1,3	49,54	34,46	10	2,9	9,2	»
17	2024/11/09 18:29:57	2,3	49,57	34,30	8	3,0	18,0	»

#### Землетруси які стались в регіоні ДДЗ з 2010 по 2024 р.

*Примітки*. Події ідентифіковано в: <sup>1</sup>ΠГО, <sup>2</sup>EMSC, <sup>3</sup>ГЦСК. Параметри землетрусу: φ і λ — широта і довгота, в градусах; *H*, *L* — глибина, відстань, км; *M* — магнітуда.

рокосмугових сейсмоприпливних записів парних землетрусів. Виявлено такі особливості: а) під час сильнішого другого землетрусу найбільші амплітуди мали дві хвилі — 2,0 і 3,5 Гц; б) другому землетрусу передував помітний дрейф нахилів, а після нього був відсутній; в) коефіцієнти кореляції сигналів слабого за сильним (і навпаки) *k*=1, що засвідчує 100 %-ву кореляцію. Отже, незважаючи на різницю в два порядки потужності, ці дві події подібні. Виявлено ще деякі аномалії.

Згідно з даними таблиці та рисунку випливає, що в останні роки в місцезнаходженні сейсмоподій є така тенденція: їх переважна більшість групуються за широтою 49,2° майже по лінії в 15—30 км на південь від Полтави (між Карлівкою на сході та Зачепилівкою на заході). Це спонукає до детального аналізу геотектонічних і техногенних процесів цих територій.

Відомо, що ДДЗ є палеорифтом, який є частиною Сарматсько-Туранського лінеамента (СТЛ) — трансконтинентальної тектонічної мегаструктури [Пашкевич и др., 2014]. Лініамент перетинає Східноєвропейську платформу (СЄП) із північного заходу (від р. Прип'ять) на південний схід і простягається до відрогів Тянь-Шаню. Палеорифт ДДЗ розміщується між Воронезькою антеклізою і Українським щитом і відділений північним Барановицько-Астраханським і південним Прип'ять-Маницьким глибинними розломами. Западина-рифт формувалась горизонтальними і вертикальними рухами земної кори. Інтенсивні деформаційні процеси минулого утворили сучасну будову ДДЗ і можуть повторюватися. У нинішню епоху деформаційні процеси помірні та співмірні з рухами СЄП.
Імовірно, деякі елементи СТА мають генетичні подібності. У межах цього лінеамента крім ДДЗ є ще кілька потужних нафтогазових провінцій. Наприклад, це гігантське родовище Газлі в Туранській низовині, де в 1965—1984 р. відбувалось інтенсивне газовидобування. Можливо, це призвело в 1976—1984 р. до трьох руйнівних землетрусів з *М*>7,0. До цього, як і в ДДЗ, протягом століття землетрусів тут не фіксували [Шляховий та ін., 2023, 2024]. З середини 1990-х років темпи видобутку зменшились і потужні землетруси не виникають.

Обговорення та висновки. ДДЗ належить до стійкої СЄП, тут переважають вертикальні тектонічні рухи. Останнім часом ДДЗ стала місцем, де відбулось майже

### Список літератури

- Кендзера О.В., Омельченко В.Д., Лисинчук Д.В., Легостаєва О.В., Гринь Д.М., Коломієць К.В., Толкунов А.П., Чулков С.С. Глибинна будова літосфери та сейсмічна небезпека території України. Київ: Наук. думка, 2019, 198 с.
- Кутас В.В., Андрущенко Ю.А., Омельченко В.Д., Лящук А.І., Калітова І.А. Землетруси в Дніпровсько-Донецькому авлакогені. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 5. С. 143—151. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5. 2015.111156.
- Пашкевич И.К., Орлюк М.И., Лебедь Т.В. Магнитная неоднородность, разломная тектоника консолидированной земной коры и нефтегазоносность Днепровско-Донецкого авлакогена. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 1. С. 64—80. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i1.2014.116150.
- Трипольский А.А, Калюжная Л.Т., Трипольская Е.А.Прогнозирование возможных сейсмогенных зон в Днепровско-Донецком палеорифте. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 1. С. 95—104. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i1.2012.116590.

два десятки землетрусів, ймовірно, теж у результаті рухів тектонічних блоків. Без сумніву, на рух блоків впливає видобуток вуглеводнів. Це триває десятки років з агресивним впливом на геологічне середовище: гідророзрив пласта, періодичне заводнення та зневоднення, соляно-кислотна обробка, збільшення глибин розробки та ін.Через малодоступність земних надр ше немає надійних засобів контролю техногенних впливів на деформаційно-напружений режим регіону (ДНРР). З огляду на деяку подібність ДДЗ і газоносної провінції Газлі ймовірно є подібність їх сейсмотектоніки, що потребує надійного контролю ДНРР. Аналіз показує, що це можливо впровадженням сучасних сейсмоприпливних технологій.

- Чалий О., Ільєнко В.,Щербіна С. Макросейсмічні прояви землетрусу 03.02.2015 на межі Полтавської і Сумської областей. Вісник Київ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Геологія. 2015. Т. 3. № 70. С. 49—54. https://doi. org/10.17721/1728-2713.70.08
- Шляховий В.П., Кендзера А.В., Шляховий В.В. Реєстрація сейсмічних сигналів земноприпливними приладами. *Геодинаміка*. 2011.№ 2(11). С. 344—346.
- Шляховий В.П., Шиян Р.В., Ільченко В.В., Міщенко Р.А. Сучасні субрегіональні сейсмотектонічні процеси та явища в центральній частині Дніпровсько-Донецької зони. Зб. наук. пр. XVI Міжнар. наук.-практ. конф. «Академічна й університетська наука: результати та перспективи», 2023, С. 205— 207.
- Шляховий В.П., Шиян Р.В., Міщенко Р.А., Єльченко-Лобовська А.С. Вплив інтенсифікації розробки родовищ на регіональні сейсмотектонічні процеси і геодинаміку. Зб. наук. пр. XVII Міжнар. наук.-практ. конф. «Акаgeмічна й університетська наука: результати та перспективи», 2024, С. 525—527.

# Seismic activity of the Dnieper-Donetsk Basin, geodeformation fields and geotectonics of its seimogenic zones

## V.P. Shliahovyi<sup>1</sup>, R.V. Shyian<sup>1</sup>, A.S. Yelchenko-Lobovska<sup>2</sup>, R.V. Shliahovyi<sup>3</sup>, 2025

<sup>1</sup>Poltava Gravimetric Observatory of the S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Science of Ukraine, Ukraine <sup>2</sup>NationalUniversity«Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Ukraine <sup>3</sup>Main Department of the Pension Fund of Ukraine in Poltava region, retroconversion department

The features of earthquakes in the center of the Dnieper-Donetsk Basin are being studied. Such events had not occurred for a century, but have been occurring near Poltava often in recent years. The reasons are unknown. Events can be generated by natural and man-made factors: activation of tectonic deformation fields, intensive production of the fluids, other large-scale man-made activities. A comparative analysis of seismicity, geophysics of the Dnieper-Donetsk Basin, and similar oil and gas provinces is performed.

Key words: earthquakes, geotectonics, Dnieper-Donetsk Basin.

#### References

- Kendzera, O.V., Omelchenko, V.D., Lysinchuk, D.V., Legostayeva, O.V., Grin, D.M., Kolomiets, K.V., Tolkunov, A.P., & Chulkov, S.S. (2019). Deep structure of the lithosphere and seismic hazard of the territory of Ukraine. Kyiv: NaukovaDumka, 198 p. (in Ukrainian).
- Kytas, V.V., Andrushchenko, Y.A., Omelchenko, V.D., Lyashchuk, A.I., & Kalitova, I.A. (2015). Earthquakes in the Dnieper-Donets aulakogen. *Geofizicheskiy Zhurnal*, *37*(5), 143—151. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100. v37i5.2015.111156 (in Russian).
- Pashkevich, I.K., Orlyuk, M.I., & Lebed', T.V. (2014). Magnetic data, fault tectonics of consolidated earth crust and oil-and-gas content of the Dnieper-Donets avlakogen. *Ceofizicheskiy Zhurnal*, 36(1), 64—80. https://doi. org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i1.2014.116150 (in Russian).
- Tripolskiy, A.A., Kalyuzhnaya, L.T., & Tripolskaya, E.A. (2012). Forecasting of possible seismogeniczones in the Dnieper-Donetsk paleorift. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 34(1), 95—104. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i1. 2012.116590 (in Russian).

Chalyi, O., Il'enko, V., & Scherbina, S. (2025). Ma-

croseismic effect of the earthquake occurred on 03.02.2015 at the border of Poltava and Sumy regions. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, *3*(70), 49— 54. https://doi.org/10.17721/1728-2713.70.08 (in Ukrainian).

- Shlyakhovy, V.P., Kendzera, A.V., & Shlyakhovy, V.V. (2011). Registration of seismic signals by geodetic devices. *Geodynamics*, (2), 344—346 (in Ukrainian).
- Shliakhovyi, V.P., Shyian, R.V., Ilchenko, V.V., & Mishchenko, R.A. (2023). Modern subregional seismotectonic processes and phenomena in the central part of the DDZ. Collection of scientific papers of the XVI International scientific and practical conference «Academic and university science: results and prospects» (pp. 205—207) (in Ukrainian).
- Shliakhovyi, V.P., Shyian, R.V., Mishchenko, R.A., & Elchenko-Lobovska, A.S. (2024). The impact of intensification of field development on regional seismotectonic processes and geodynamics. Proc. of the XVII International Scientific and Practical Conference «Academic and University Science: Results and Prospects» (pp. 525—527) (in Ukrainian).

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322579

# Огляд передвісників землетрусів

С.В. Щербина, А.І. Фещенко, П.Г. Пігулевський, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

За період наукової і технічної роботи співавторами і їх колегами розроблено і випробувано кілька сучасних методів передвісників землетрусів. Один з методів є унікальним, його новизну зафіксовано у формі патенту на корисну модель. Деякі інші методи ефективно випробувано багато разів, отримано успішні прогнозні результати. Всі наведені нижче методи можна класифікувати за кількома науковими напрямками — просторово-часовими, параметрично-часовими. Така поки що спрощена класифікація методів передвісників землетрусів дає можливість оцінювати результати ефективності їх роботи і достовірності за властивостями їх використання.

**Ключові слова:** передвісники землетрусів, методи класифікації достовірності прогнозу землетрусів.

Вступ. Наведено огляд результатів роботи сучасних методів визначення передвісників землетрусів, які складаються з історичних послідовностей їх типів і випробувань у різних умовах за часом і з різними співавторами:

 метод спектрального аналізу мікросейсмічного шуму — обробка в області автоматизованих аналізів потоків даних [Щербина, 2014];

метод лазерних сейсмометрів — розробка обладнання і обробка в області автоматизованих аналізів потоків даних, співавтор: А.І. Фещенко, ІГФ ім. С.І. Субботіна НАН України;

– метод вакуумних дельта-гравіметрів розробка обладнання і обробка в області автоматизованих аналізів потоків даних, співавтори: В.М. Гойденко, П.Г. Пігулевський, ІГФ ім. С.І. Субботіна НАН України;

– метод лазерних інклінометрів — розробка обладнання і обробка в області автоматизованих аналізів потоків даних, співавтор: А.І. Фещенко, ІГФ ім. С.І. Субботіна НАН України [Щербина та ін., 2022];

– метод аналізу рівня води в свердловині (глибина 800 м), м. Кривий Ріг — обробка в області автоматизованих аналізів потоків даних, правовласники: Свістун В.К. ДП ДНІПРОГЕОФІЗИКА, П.Г. Пігулевський, ІГФ ім. С.І. Субботіна НАН України;

 метод аналізу потоків супутникових GPS даних еталонів часу — обробка в області автоматизованих аналізів потоків даних [Velychko et al., 2016];

 метод фрактального аналізу каталогів землетрусів — автоматизована обробка в області фрактального аналізу просторово-часової множини епіцентрів або гіпоцентрів землетрусів [Щербина, 2003];

 метод ентропійного аналізу потоків даних іонізованої атмосфери — в процесі розробки;

 метод ентропійного аналізу потоків даних тиску і температури повітря — в процесі розробки.

**Результати роботи деяких методів передвісників**. Наведені вище сучасні методи передвісників землетрусів дали можливість досягнути таких результатів.

Метод автоматизованого аналізу мікросейсмічного шуму у формі кумулятивних спектрів мікросейсмічних записів з
сейсмічних станцій системи USGS дав змогу отримати майже 480 успішних прогнозів за часом і магнітудою для землетру-

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Shcherbyna, S.V., Feshchenko, A.I., & Pigulevsky, P.G. (2025). A review of earthquake precursors. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 359—363. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322579.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

сів з магнітудою 5,5 і більше за часом до землетрусу 2—3 доби з 2014 р. по 2021 р. Прогноз робився вручну на персональній



Рис. 1. Передвісник землетрусу 2012-02-26 06:17 51.78N 96.05E M6.8 South Western Siberia Russia методом аналізу кумулятивного спектра мікросейсмічного шуму з сейсмічної станції USGS KYIV за дві доби до нього.

Fig. 1. Precursor of the earthquake 2012-02-26 06:17 51.78N 96.05E M6.8 South Western Siberia Russia obtained by analyzing the cumulative spectrum of microseismic noise from the USGS KYIV seismic station two days before it.

сторінці у Фейсбуці за 1—3 дні до землетрусу (рис. 1).

2. Методом визначення передвісників землетрусів за аномаліями в роботі даних лазерних сейсмометрів було виявлено при проведенні візуального аналізу записи в



Рис. 3. Гравітаційна аномалія вертикальної компоненти вакуумного дельта-гравіметра за дві доби до землетрусу в Румунії, М 3,7.

Fig. 3. Gravity anomaly of the vertical component of the vacuum delta gravimeter two days before the earthquake in Romania, M 3.7.





Fig. 2. Forecast of the precursor of the earthquake in Mariupol by a change in the position of the pendulum of the second vertical laser seismometer 3 minutes before this earthquake. Authors Shcherbyna S.V., Feshchenko A.I. IGF NAS of Ukraine.



Рис. 4. Динаміка тиску і температури води в свердловині м. Кривий Ріг перед і після двох землетрусів у Румунії і в Україні з магнітудами 3,0 і 1,8 відповідно.

Fig. 4. Dynamics of water pressure and temperature in a well in the city of Kryvyi Rih before and after two earthquakes in Romania and Ukraine with magnitudes of 3.0 and 1.8, respectively.



Рис. 5. Прогноз передвісника землетрусу в Румунії з магнітудою 5.3 і більше від 04 вересня і 24 жовтня 2022 р. на сторінці у Фейсбуці.

Fig. 5. Forecast of the precursor of an earthquake in Romania with a magnitude of 5.3 and more from September 4 and October 24, 2022 on a Facebook page.

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

двох технічно різних вертикальних лазерних сейсмометрів за кілька годин і хвилин до часу реалізації землетрусу в Маріуполі у 2016 р. (рис. 2).

3. Метод вакуумного дельта-гравіметра (розробка ІГФ НАН України) було використано в умовах вакуумного циліндра ДП УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ. Було спрогнозовано кілька десятків землетрусів за методом виявлення часових аномалій динаміки зміни відносного значення прискорення вільного падіння (рис. 3) — співавтори (рис. 4): В.М. Гойденко, П.Г. Пігулевський, ІГФ ім. С.І. Субботіна НАН України.

4. Метод визначення передвісників землетрусів за рівнем води у свердловині м. Кривий Ріг (глибина 800 м) при забезпеченні ДП ДНІПРОГЕОФІЗИКА — автори В.К. Свістун, П.Г. Пігулевський. Метод засновано на засадах використання вимірювань тиску і температури води у свердловині високоточним пристроєм, який було розміщено на глибині 10—20 м від верх-



Рис. 6. Прогноз координат двох землетрусів у Румунії та Ірану з магнітудами 2,7 і 4,7 відповідно лазерним інклінометром за три доби до їх реалізації.

Fig. 6. Forecast of the coordinates of two earthquakes in Romania and Iran with magnitudes 2.7 and 4.7, respectively, by a laser inclinometer тоди визначення передвісників three days before their occurrence.

нього рівня води у свердловині. Динаміка цього рівня відображає як гравітаційний вплив Місяця і Сонця на відносне вертикальне положення води в цій свердловині, так і динаміку тектонічної структури, що значно змінюється в процесі підготовки землетрусів (рис. 4) [Velychko et al., 2016].

5. Метод фрактального аналізу дав змогу спрогнозувати передвісники землетрусів у Румунії з магнітудою 5,1 за 6 і 5 місяців до реального часу його реалізації. Прогноз цього землетрусу робився на персональній сторінці у Фейсбуці [Щербина, 2003] (рис. 5).

#### Список літератури

- Щербина С.В. Спосіб прогнозування небезпечних сейсмічних подій. Патент № 92022. Опубл. бюл. № 14/2014.
- Щербина С.В. Фрактальные свойства пространственно-временной совокупности землетрясений Крымского сейсморегиона. Геофиз. журн. 2003. Т. 25. № 3. С. 178—188.
- Щербина С.В., Калініченко О.О., Пігулевський П.Г., Фещенко А.І. Комплексна система сейсмічних спостережень у Кривому Розі або Лазерні підходи для прогнозу землетрусів. Геол.-мін. вісник Криворізьк. нац. ун-ту.

6. Метод прогнозу передвісників землетрусів лазерним інклінометром дав можливість визначати спеціальні області земної поверхні, де землетруси можуть бути реалізовані. Цей метод належить до групи методів прогнозу в часі і просторі, за якими можна розраховувати координатну область, де землетрус може статися. Цей метод є найважливішим, ніж інші, тому що можна визначити активну частину тектонічної області, де вірогідність землетрусу є достатньо високою (рис. 6) [Shcherbyna, 2021; Щербина та ін., 2022].

Висновки. Наведені вище меземлетрусів можуть бути об'єд-

нані у єдину систему прогнозування небезпечних сейсмічних явищ при забезпеченні обробці цих потоків даних єдиним штучним інтелектом з різними значеннями магнітуд. Саме такий комплексний підхід може забезпечити високий рівень вірогідності прогнозів землетрусів з високими значеннями магніту від 5,5 до 9,0. Крім того, за геофізичними властивостями і специфічними параметрами наведених вище методів визначення передвісників землетрусів можна вивчати і більш широкі властивості динаміки тектонічної структури Землі.

2022. T. 24. № 1. C. 36-42. http://doi.org/ 10. 31721/2306-5443-2022-47-1-36-42.

- Shcherbyna, S.V. (2021). The laser technology for earthquake's forecast and for different approaches of seismic hazard assessment. The problems complex geophysical monitoring seismic active regions. Scientific and Technical Conf. Proc. (pp. 327-331).
- Velychko, O., Shcherbina, S., Golovnya, M., & Pigulevskiy, P. (2016). Relation between level of the water in boreholes with influence of the ionosphere dynamics on results of remote comparison etalons of time. Scientific bulletin of NMU, (4), 37-45.

# A review of earthquake precursors

### S.V. Shcherbyna, A.I. Feshchenko, P.G. Pigulevsky, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Over the course of scientific and technical work, the co-authors and their colleagues have developed and tested several modern methods of studying earthquake precursors. One of the methods is unique, its novelty has been recorded in the form of a patent for a utility model. Some other methods have been effectively tested many times, and successful forecast results have been obtained. All the methods listed below can be classified as spatiotemporal or parametric-temporal according to scientific directions. Such a simplified classification of earthquake precursor methods makes it possible to evaluate the results of their work efficiency and reliability according to the properties of their use.

**Key words**: earthquake precursors, methods for classifying the reliability of earthquake forecasts.

#### References

- Shcherbyna, S.V. (2014). Method of forecasting dangerous seismic events. *Ukr. Patent for invention* № 92022 (in Ukrainian).
- Shcherbyna, S.V. (2003). Fractal properties of spatial-time group of the earthquakes of the crimean seismoregion. *Geophysical Journal*, 25(3), 178—188 (in Russian).
- Shcherbyna, S.V., Kalinichenko, O.O., Pigulevsky, P.G., & Feshchenko, A.I. (2022). Integrated system of seismic observations in Kryvyi Rih or Lasers Approaches for Earthquakes Forecast. Geological and mineralogical bulletin of Kryvyi Rih National University, 24(1), 36—42. http://doi.org/10.31

721/2306-5443-2022-47-1-36-42 (in Ukrainian).

- Shcherbyna, S.V. (2021). The laser technology for earthquake's forecast and for different approaches of seismic hazard assessment. The problems complex geophysical monitoring seismic active regions. *Scientific and Technical Conf. Proc.* (pp. 327—331).
- Velychko, O., Shcherbina, S., Golovnya, M., & Pigulevskiy, P. (2016). Relation between level of the water in boreholes with influence of the ionosphere dynamics on results of remote comparison etalons of time. *Scientific bulletin* of NMU, (4), 37—45.

УДК 550.3:001(477)

DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322580

# Міжнародне співробітництво та публікації B.I. Старостенка в Scopus та Web of Science

### А.І. Якимчик, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Статтю присвячено аналізу публікацій і наукометричних показників доктора фізико-математичних наук, професора, завідувача відділу глибинних процесів Землі і гравіметрії, радника при дирекції Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України академіка НАН України Віталія Івановича Старостенка, який у цьому році

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ISSN 0203-3100. Geophysical Journal. 2025. Vol. 47. № 2

Citation: Yakimchik, A.I. (2025). International cooperation and publications of V.I. Starostenko indexed in Scopus and Web of Science. *Geofizychnyi Zhurnal*, *47*(2), 363—367. https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322580. Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the

відсвяткував свій 90-річний ювілей. Узагальнено науковий доробок цього видатного вченого-геофізика і організатора науки, наведено кількісні показники з його профілів у бібліографічних базах даних Scopus i Web of Science Core Collection. Його Індекс Гірша на цей час дорівнює цифрі 23, захмарній для переважної більшості українських учених, які працюють у сфері області наук про Землю. Наведено список основних співавторів В.І. Старостенка та кількість проіндексованих праць у Scopus, написаних разом з ними. Загалом співавторів — 150. Наведено відомості про держави, згадано науковців різних організацій, які співпрацювали з В.І. Старостенком.

Ключові слова: публікаційна активність, геофізика, Web of Science Core Collection, Scopus, *h*-індекс, цитування, співавтори.

Нині стало загальноприйнятим використання баз даних наукових цитувань та інструментарію наукометрії в процесі оцінювання результатів наукової діяльності окремих науковців і наукових колективів. У щорічних звітах про діяльність наукових установ НАН України враховуються статті у журналах, що індексуються провідними наукометричними базами Web of Science, Scopus, Google Scholar тощо. Було розроблено відповідну методику з метою отримання об'єктивної оцінки ефективності діяльності наукових установ НАН України з урахуванням наявних умов їхнього кадрового, інформаційного, фінансового та матеріально-технічного забезпечення; прийняття обґрунтованих управлінських, організаційних і фінансових рішень; стимулювання науково-дослідної та інноваційної діяльності; наближення до європейської практики оцінювання ефективності діяльності наукових установ [Щодо..., 2017].

Очевидно, що набула широкого розповсюдження одна з оцінок наукових публікацій у вигляді визначення їх кількості цитувань в інших наукових публікаціях; при цьому визначається цитування як окремих науковців, так і окремих наукових журналів. Через численність наукових публікацій визначення числа цитувань наукових публікацій видається дуже складною та актуальною проблемою, вирішення якої без застосування сучасних інформаційних технологій не може бути оперативним на значній базі даних [Якимчик, 2020а].

Метою цієї статті є аналіз наукометричних показників доктора фізико-мате-



Розподіл цитувань В.І. Старостенка у виданнях усього світу. Worldwide distribution of works citing V. I. Starlotenko's research.

FILL F F F	Pollin and another for the second	
Країна	Число записів у Scopus	
США	31	
Польща	27	
Німеччина	23	
Велика Британія	16	
Франція	14	
Словаччина	11	
Швеція	11	
Данія	9	
Нідерланди	9	
Норвегія	8	
Білорусь	7	
Чехія	7	
Литва	7	
Фінляндія	6	
Румунія	5	
Туреччина	5	

# Таблиця 1. Найбільш активні міжнародні партнери В.І. Старостенка

матичних наук, професора, завідувача відділу глибинних процесів Землі і гравіметрії, радника при дирекції Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України академіка НАН України Віталія Івановича Старостенка. Слід зазначити, що пропоновану тут статтю можна розглядати і як свого роду доповнення та уточнення до публікацій [Старостенко, 2015; Якимчик, 2020б, в]. Ця робота присвячена 90-річчю від дня його народження.

З розвитком наукометрії результативність учених почали оцінювати за кількістю публікацій у міжнародних рецензованих журналах і рівнем їх цитування. Кількісні показники В.І. Старостенка на сьогодні такі:

– у Web of Science Core Collection (ResearcherID: S-2250-2019) проіндексовано 228 його публікацій, загальна кількість цитувань — 1998 в 1181 документі, індекс Гірша — 23;

– у Scopus (ідентифікатор: 7003611937) проіндексовано 119 робіт, які процитовано 1758 раз у 1140 документах, *h*-індекс — 23.

Найбільшу кількість цитувань в обох базах має наукова праця «EUROBRIDGE: New insight into the geodynamic evolution of the East European Craton», опублікована великим колективом співавторів у 2006 р. Її процитовано 155 разів у документах біб-

### Таблиця 2. Співавтори В.І. Старостенка

Співавтор	Число проіндексованих
	праць у Scopus,
	співавторстві
Legostaeva O.V.	39
Yegorova T.P.	24
Omel'chenko V.D.	20
Janik T.	19
Stephenson R.A.	19
Lvsvnchuk D.V.	18
Makarenko I.B.	17
Gryn' D.M.	15
Tolkunov A.P.	15
Şroda Piotr	15
, Czuba Wojciech	15
Guterch Aleksander	13
Isaev V.I.	13
Kolomiyets K.V.	13
Thybo H.	12
Lobova G.A.	11
Kozlenko V.G.	11
Kutas R.I.	10
Stovba S.M.	10
Rusakov O.M.	10
Tiira Timo	8
Komminaho Kari	8
Kharitonov O.M.	7
Gintov O.B.	7
Bielik Miroslav	7
Murovskaya A.V.	7
Savchenko A.S.	7
Buryanov V.B.	7
Aleksandrowski Pawel	7
Amashukeli T.A.	6
Pashkevich I.K.	6
Fomin A.N.	6
Grad M.	6
Wójcik Dariusz	5
Kobolev V.P.	5
Chulkov S.	5

ліографічної бази даних Web of Science і стільки ж разів у Scopus.

Географічна карта цитування наочно показує розподіл цитувань В.І. Старостенка по усьому світі (рисунок). Для кожної статті у Web of Science Core Collection, яка цитована в роботі вченого, місто з організацією одного з авторів є точкою даних. Публікація може відображатися в кількох місцях, якщо автори афілійовані з різними організаціями.

У статті [Старостенко и др., 2021] описано результати міжнародної співпраці Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України в 2010—2020 рр., що були отримані в рамках 25 міжнародних проєктів і шести міжнародних тимчасових цільових груп, в яких брали участь виконавці 23 країн. Звичайно активну участь у міжнародному співробітництві брав і Віталій Іванович. Спільні дослідження з науковими установами зарубіжних країн виконувались на світовому рівні, і їх результати опубліковано у престижних міжнародних журналах і виданнях (табл. 1).

У табл. 2 наведено список основних співавторів В.І. Старостенка та кількість проіндексованих праць у Scopus, написаних разом з ними. Загалом співавторів — 150. Тому в таблиці згадані науковці, що мають п'ять і більше публікацій із В.І. Старостенком.

Висновки. З огляду на наведений вище доволі формальний аналіз можна зробити висновок, що Віталій Іванович Старостенко має вражаючі наукові досягнення. Його індекс Гірша на цей час становить захмарну для переважної більшості українських вчених, які працюють у сфері наук про Землю, цифру 23.

Доречно зробити кілька зауважень. Крім наукової роботи В.І. Старостенко значну увагу приділяє підготовці і вихованню наукових кадрів. Віталій Іванович — член редколегій багатьох журналів. Однак, безумовно, «Геофізичний журнал», головним редактором якого він є з 1996 р., займає особливе місце, і найбільше уваги він приділяє саме цьому виданню. Хочу побажати ювіляру нових наукових досягнень та звершень, довгих років радісного, щасливого, творчого життя.

### Список літератури

- Щодо затвердження Методики оцінювання наукових установ НАН України. Затверджено Постановою Президії НАН України від 15.03.2017 № 75. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/rada/ show/v0075550-17#Text.
- Старостенко В.И. Опыт юбилейного самообслуживания продолжается: десять лет спустя. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 2. С. 146—170.
- Старостенко В.И, Русаков О.М., Якимчик А.И. Международное сотрудничество Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины в 2010—2020 гг. *Геофиз. журн.* 2021. Т. 43. № 3. С. 205—226. https://doi.org/10.24028/gzh. v42i3.236930.

Якимчик А.И. Базы данных цитирований и

идентификаторы исследователей. *Геофиз.* журн. 2020а. Т. 42. № 3. С. 78—108. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020. 204703.

- Якимчик А.И. Публикационная активность, роль и вклад в научный результат на примере работ В.И. Старостенко. *Геофиз. журн.* 2020б. Т. 42. № 4. С. 174—200. https:// doi. org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i4.2020. 210680.
- Якимчик А.І. Щодо проблеми використання в Україні наукометричних показників: на прикладі аналізу публікаційної активності окремого науковця. *Вісник НАН України*. 2020в. № 9. С. 66—77. https://doi.org/10. 15407/ visn2020.09.066.

# International cooperation and publications of V.I. Starostenko indexed in Scopus and Web of Science

### A.I. Yakimchik, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The article analyses publications and scientometric indicators of Academician Vitality Ivanovich Starostenko, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Deep Earth Processes and Gravimetry, Advisor to the Directorate of the S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, who celebrated his 90th anniversary this year. The scientific achievements of this outstanding geophysicist and organizer of science are summarized, and quantitative indicators from his profiles in the Scopus and Web of Science Core Collection databases are given. His Hirsch Index currently stands at 23, which is sky-high for the vast majority of Ukrainian scientists working in the field of Earth sciences. A list of V.I. Starostenko's main co-authors and the number of works indexed in Scopus written with them is provided. In total, there are 150 co-authors. Information about the countries is provided, and scientists from various organizations who collaborated with V.I. Starostenko are mentioned.

**Key words:** publishing activity, geophysics, Web of Science Core Collection, Scopus, *h*-index, citation, co-authors.

#### References

- Regarding the approval of the Evaluation Methodology of Scientific Institutions of the National Academy of Sciences of Ukraine. Approved by the Resolution of the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine. 15.03.2017. No. 75. (2017). Retrieved from https://zakon. rada.gov.ua/rada/show/v0075550-17#Text (in Ukrainian).
- Starostenko, V.I. (2015). A practice of anniversary self-service is in progress: ten years later. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(2), 146—170 (in Russian).
- Starostenko, V.I., Rusakov, O.M., & Yakimchik, A.I. (2021). International cooperation of S.I. Subbotin Institute Geophysics, NAS of Ukraine for 2010—2020. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(3), 205—226. https://doi.org/10.24028/ gzh.v43i3.236390 (in Russian).

- Yakimchik, A.I. (2020a). Citation databases and researcher identifiers. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(3), 78—108. https://doi.org/10.24028/ gzh.0203-3100.v42i3.2020.204703 (in Russian).
- Yakimchik, A.I. (20206). Publication activity, a role and contribution to the scientific result onto example V.I. Starostenko's works. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(4), 174—200. https://doi. org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i4.2020.210680 (in Russian).
- Yakimchik, A.I. (2020B). On the problem of using scientometric indicators in Ukraine: on the example of the analysis of the publishing activity of an individual scientist. *Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr.*, (9), 66—77. https://doi.org/10.15407/ visn2020.09.066 (in Ukrainian).