

Національна академія наук України
Інститут геофізики імені С.І.Субботіна



**“Методика комплексування геолого-геофізичних даних при
вивченні чорносланцевих пластів з залученням
нейронних мереж”**

Виконав:

Аспірант: Куртий Володимир Олегович

Науковий керівник:

Доктор фіз. - мат. наук, чл. - кор. НАНУ:

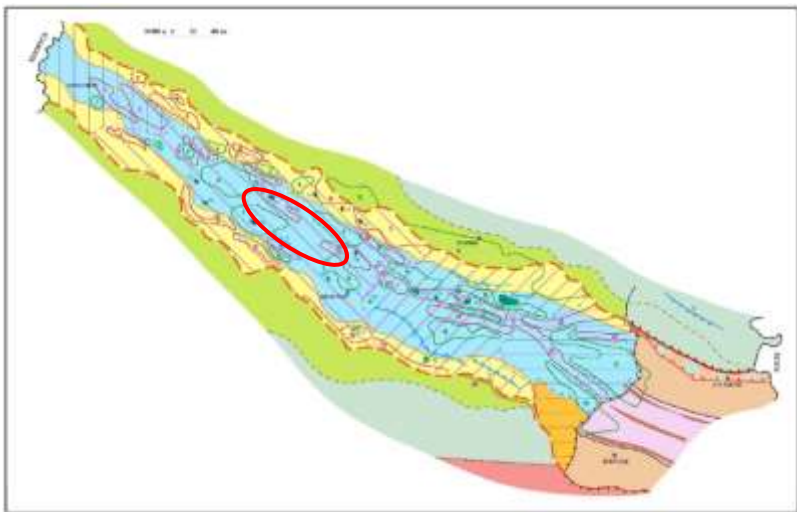
Верпаховська Олександра Олегівна

Метою дисертаційної роботи є розроблення методики вивчення петрофізичних та акустичних властивостей чорносланцевих відкладів на основі комплексування даних ВСП, каротажних методів та даних сейсморозвідки з залученням нейронних мереж на прикладі чорносланцевих відкладів Глино-Солохівської площі ДДЗ.

У дисертаційній роботі поставлено такі завдання:

- ✿ Виконати аналіз літературних джерел за темою вивчення петрофізичних та акустичних властивостей чорних сланців, зокрема візейських відкладів Глино-Солохівської площі ДДЗ та використання нейронних мереж для задач геофізики.
- ✿ Виконати дослідження геологічної будови, наявних каротажних даних та сейсмічних розрізів, отриманих за допомогою ВСП та сейсморозвідки в районі Глино-Солохівської площі ДДЗ з метою вивчення петрофізичних та акустичних властивостей візейських відкладів.
- ✿ Побудувати синтетичні сейсмограми (вайвлети Рікера та Клаудера) із залученням даних геофізичних досліджень свердловин, а саме акустичного та гамма – гамма густинного каротажу для визначення імпедансу.
- ✿ Дослідити можливість залучення алгоритму нейронних мереж для вивчення петрофізичних та акустичних властивостей чорносланцевих відкладів.
- ✿ Розробити комплексну методику вивчення петрофізичних та акустичних властивостей чорносланцевих відкладів на основі геолого-геофізичних даних з залученням алгоритму нейронних мереж при обмеженій кількості даних ГДС.
- ✿ Дослідити петрофізичні та акустичні властивості Марцеллуських сланців та порівняти їх з властивостями чорносланцевих відкладів Глино-Солохівської площі ДДЗ.

Дослідження комплексування петрофізичних властивостей горючих сланців



Об'єктом дослідження є горючі сланці

Досліджувані інтервали горючих сланців залягають в нижньовізейському ярусі приосьової зони Дніпровсько - Донецької западини в одному з блоків Глинсько-Солохівського нафтогазового регіону.

Дані відклади залягають на глибині більше 5800м та мають потужність 25-35 м.

Карта розташування перспективних площ з горючими сланцями, що досліджувалися в роботі.



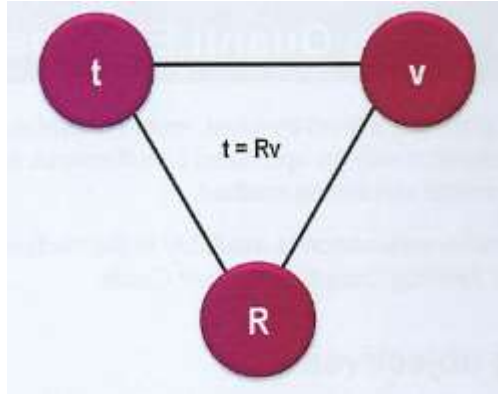
Предметом дослідження є відклади горючих сланців

Проведено аналіз кернових досліджень, що складався з 4 взірців керну.

За результатами кернового аналізу встановлено, що Кп,в даних відкладів становить - 1,5-3,5%, а вміст органічної речовини (ТОС) – 2,5 до 5,01%. За макроописом досліджуваний керновий матеріал представлений чорним доломітистим аргілітом з наявними конкреціями сидериту. 75% породи складені глинистими мінералами, решта – кварц, карбонати та пірит.

Макрофотографія керну з досліджуваного інтервалу глинистих товщ.

Методика дослідження

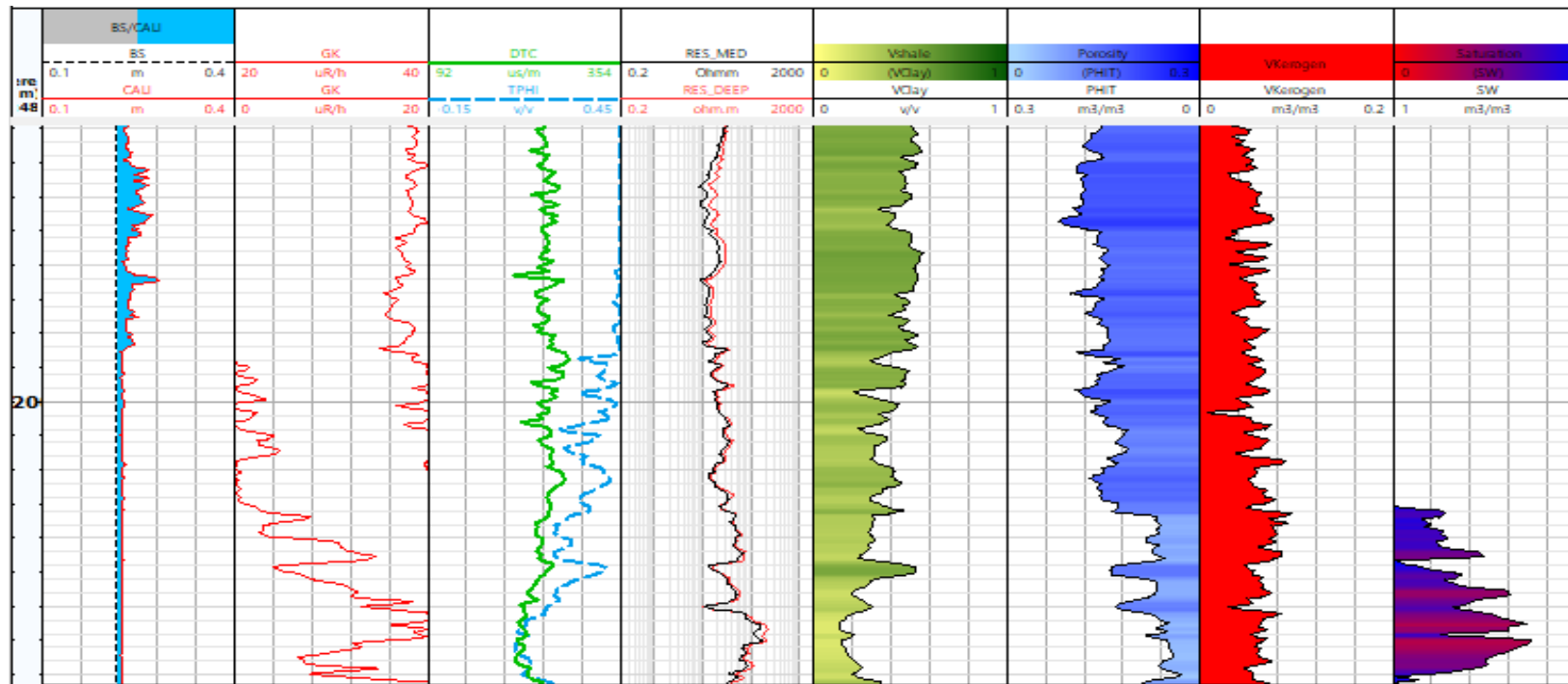


Стохастична петрофізична модель, що складається з:

t – вимірив каротажних приборів;

v – об'єму мінералів та флюїдів в породі, що задані в моделі;

R – фізичні параметри кожного з мінералів (V_r , вміст водню кварцу і т.д.);



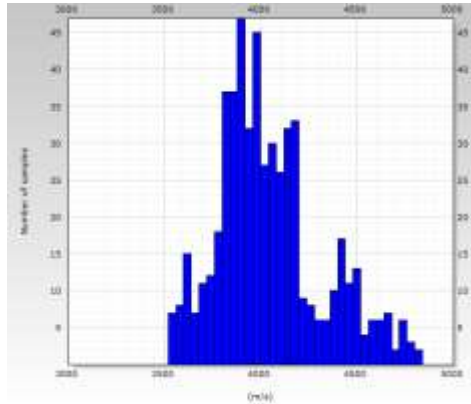
При дослідженні чорносланцевих товщ використовувалось стохастичне петрофізичне моделювання, на вхід, якої у модель задавались дані:

- акустичного каротажу;
- радіоактивних методів (гама та нейтронного);
- питомого електричного опору;

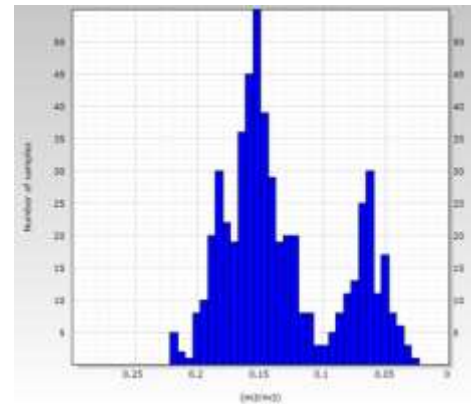
Виконано стохастичну інтерпретацію каротажних даних та визначено загальну пористість, водонасичення та вміст кєрогену та компонентний склад інтервалів залягання нижньовізейських сланцевих товщ.

Планиет з каротажними діаграмами та результатами петрофізичної інтерпретації в інтервалі товщ горючих сланців.

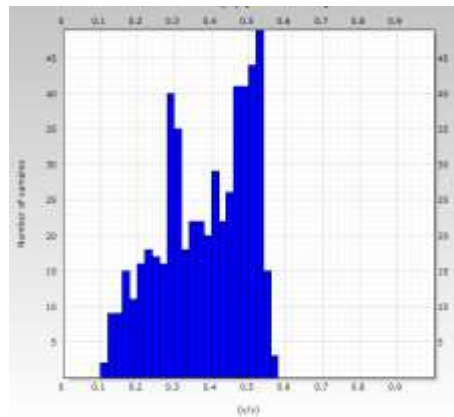
Результати петрофізичної інтерпретації



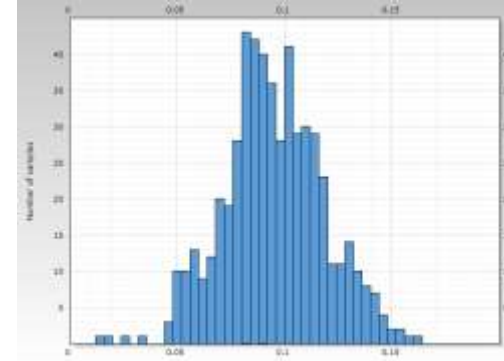
На **гістограмі №1** розподілу швидкості проходження повздовжньої хвилі показано, що в інтервалі глинистих сланців значення V_p знаходиться в межах 3600-4800 м/с. Також, виділяється дві групи інтервалів, з $V_p > 4300$ м/с, що ймовірно пов'язано зі зменшенням об'єму глинистих мінералів і перспективністю для розвідки покладу газу.



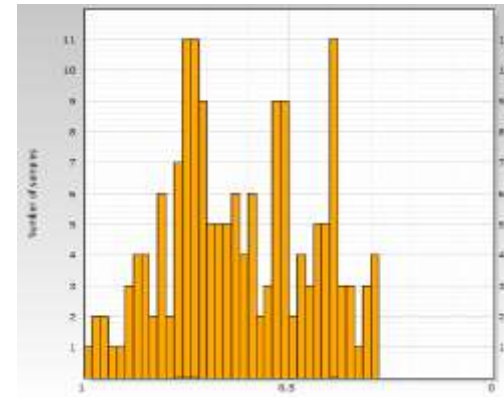
Гістограма №2 показує розподіл значень загальної пористості. Встановлено, що значення коефіцієнту загальної пористості змінюється в межах 3% - 20% та виділяються дві групи порід. Перспективний інтервал характеризується значеннями загальної пористості менше 10%.



Гістограма №3 зображує розподіл значень об'єму глинистих мінералів в інтервалі горючих сланців. Об'єм глинистих мінералів варіюється в межах 10 % - 58%.



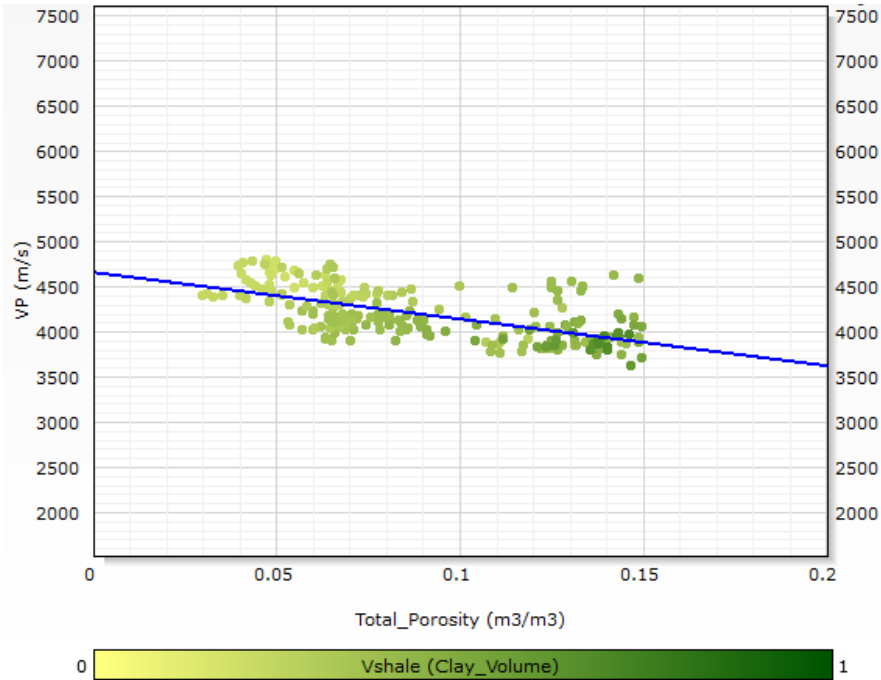
Гістограма №4 представляє розподіл значень вмісту керогену. Встановлено, що вміст керогену складає в основному 5% - 14%.



Гістограма №5 відображає розподіл значень коефіцієнту водонасичення. Встановлено, що значення S_w змінюються в межах 30% - 100%

Отримані результати були відкалібровані на кернових даних та визначено загальну пористість, водонасичення та вміст керогену.

Зв'язок між V_p та загальною пористістю сланцевих товщ



V_p в даних відкладах складає 3500 – 4800 м/с, а коефіцієнт загальної пористості ($K_{п,з}$) досягає 20%.

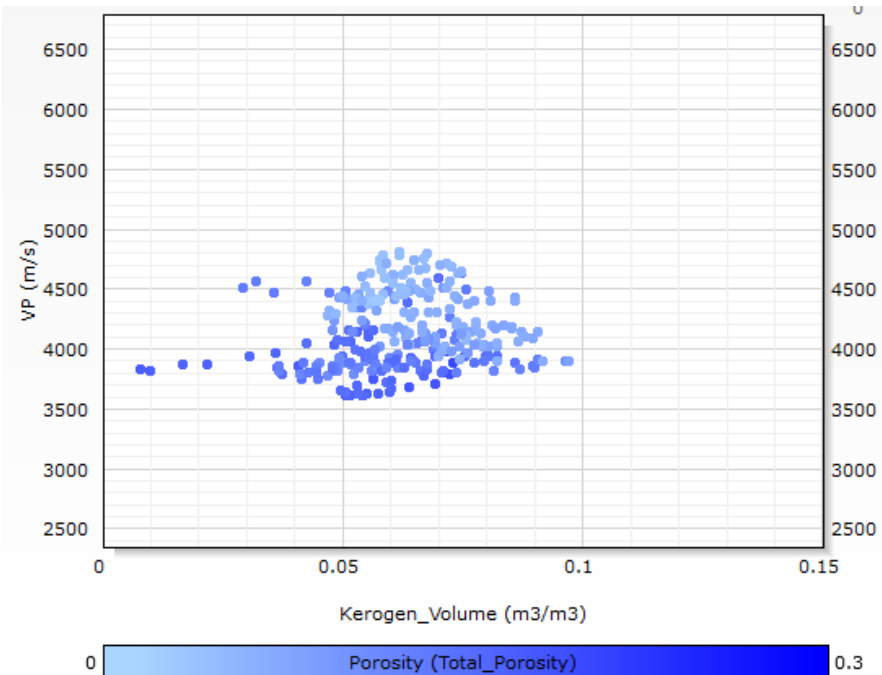
Проте, найбільш перспективний інтервал на глибині 5800 метрів має $K_{п,з}$ 3% -15%. На даному зображенні представлено зв'язок V_p та $K_{п,з}$, **коефіцієнт детермінації** (R^2), який становить **0,5**, та не є доволі стійким, що пояснюється гетерогенністю мінерального складу порід та їхніх петрофізичних властивостей.

$$V_p = -5038,068 * K_{п,з} + 4653,029$$

Зв'язок в даному рівнянні показує класичну залежність, в якій при збільшенні коефіцієнту пористості ($K_{п,з}$) зменшується значення швидкості проходження повздовжньої хвилі (V_p).

Зв'язок між коефіцієнтом загальної пористості (Total porosity) та швидкістю проходження повздовжньої хвилі.

Зв'язок між вмістом керогену та швидкістю проходження повздовжньої хвилі



Зв'язок між вмістом керогену (Kerogen volume)
та швидкістю проходження повздовжньої хвилі

Зв'язок між вмістом керогену та швидкістю проходження повздовжніх хвиль в сланцевих товщах не є стійким, що пояснюється недостатньою кількістю лабораторних досліджень для калібрування геохімічних властивостей, що розраховуються з каротажних даних, а також гетерогенністю будови та пустотного простору порід, який може складатися, як з міжзернових пустот так і пустот в органічному матеріалі.

Проте, виділяється дві групи порід з Кпз, з 3-7% та 7-15%, для яких характерний різний зв'язок між вмістом керогену та швидкістю проходження повздовжніх хвиль.

Лабораторні вимірювання та методи геофізичних досліджень свердловин для оцінювання вмісту загального органічного вуглецю

- **Загальний органічний вуглець (ТОС).**

ТОС кількісно характеризує вміст органічної речовини, передусім керогену, у породі. Підвищені значення ТОС є надійним індикатором якості потенційної материнської товщі. В умовах нетрадиційних колекторів сланцеві товщі високий ТОС критично важливий для генерації вуглеводнів.

Тому вміст ТОС оцінювався за даними керна та каротажу двома підходами: методом ΔLogR , запропонованим Passey, а також із залученням алгоритмів штучних нейронних мереж (ANN) для підвищення точності прогнозу.

- **Рентгенівська дифракція (XRD).**

XRD-аналіз виконано для визначення мінерального складу зразків, зокрема відносних часток глин, кварцу, карбонатів і акцесорних мінералів. Мінеральний склад є ключовим чинником, що визначає петрофізичні властивості порід (пористість, проникність) і безпосередньо впливає на ефективність гідророзриву пласта(ГРП).

- **Геофізичні дослідження свердловини (ГДС)**

Для досліджуваного інтервалу була доступна обмежена низка стандартних каротажів: гамма-каротаж (GR), акустичний каротаж (DT) та питомий електричний опір (RT). Ці криві використано для оцінювання базових петрофізичних параметрів. У сучасних каротажах для нетрадиційних колекторів зазвичай застосовують ширший комплекс методів:

- Спектральний гамма-каротаж, елементний спектроскопічний каротажу.
- Магнітно-резонансний каротаж (NMR). На жаль, зазначені розширені методики у досліджуваній свердловині були відсутні.

Підхід до оцінки вмісту загального органічного вуглецю (ТОС)

Метод ΔLogR :

Метод, запропонований Passey, поєднує пористість і опір. Відхилення між ними вказують на можливу наявність органічної речовини. Також використано показники відбивання вітриніту для оцінки ступеня зрілості органіки.

Прогнозування вмісту загального вуглецю (ТОС) на основі даних каротажу свердловин було виконано за допомогою програмного пакету Techlog (Schlumberger), який дозволяє проводити інтегрований петрофізичний аналіз та моделювання.

На першому етапі наявність інтервалів з органічною речовиною визначається шляхом нормалізації кривих питомого опору (RT) та акустичного каротажу (DTC). Потім застосовується метод Delta Log R, розроблений Пассі (1990). Цей метод накладає каротаж пористості та питомого опору, щоб виділити відхилення від очікуваної реакції формації, які свідчать про наявність органічної речовини.

$$\Delta\log R_{\text{Sonic}} = \log_{10} \frac{RT}{RT_{\text{Baseline}}} + 0.02 \times (DTC - DTC_{\text{Baseline}})$$

Значення відбивної здатності вітриніту використовуються для визначення рівня термічної зрілості в регіоні, після чого проводиться оцінка загального органічного вуглецю (ТОС). Рівень зрілості розраховується на основі даних відбивної здатності вітриніту, отриманих у лабораторії.

$$\text{LOM} = 0.0989 \times \text{VR}^5 - 2.1587 \times \text{VR}^4 + 12.392 \times \text{VR}^3 - 29.032 \times \text{VR}^2 + 32.53 \times \text{VR} - 3.0338$$

Де: LOM – рівень зрілості; VR – значення відбивної здатності вітриніту

Далі, фактичний вміст органічної речовини визначається за рівнянням нижче:

$$\text{TOC} = \Delta\log R \times 10^{(2.297 - 0.1688 \times \text{LOM})}$$

Застосування нейронних мереж

Перцептрон, запропонований Франком Розенблаттом — це модель штучних нейронних мереж. У складі **багатошарового перцептрона (MLP)** він навчається на зразках і здатний апроксимувати залежності між параметрами.

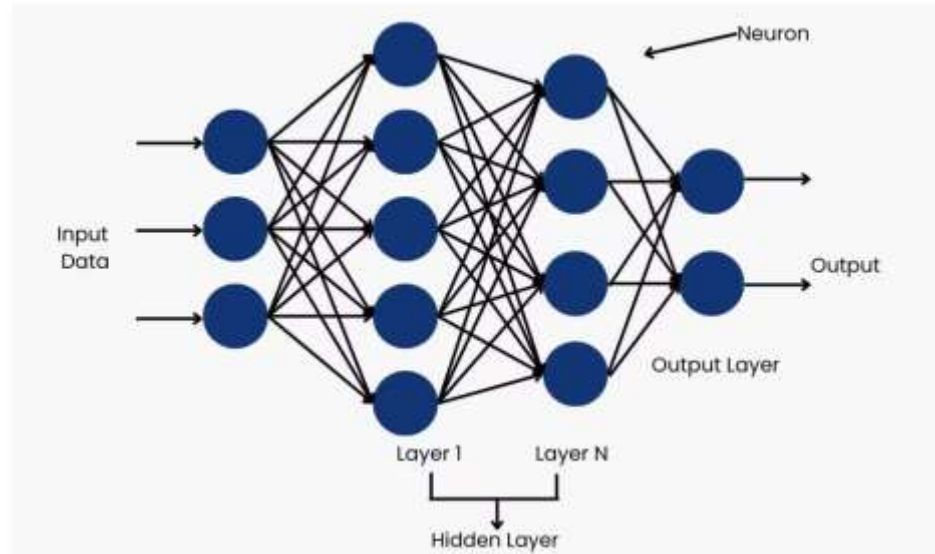


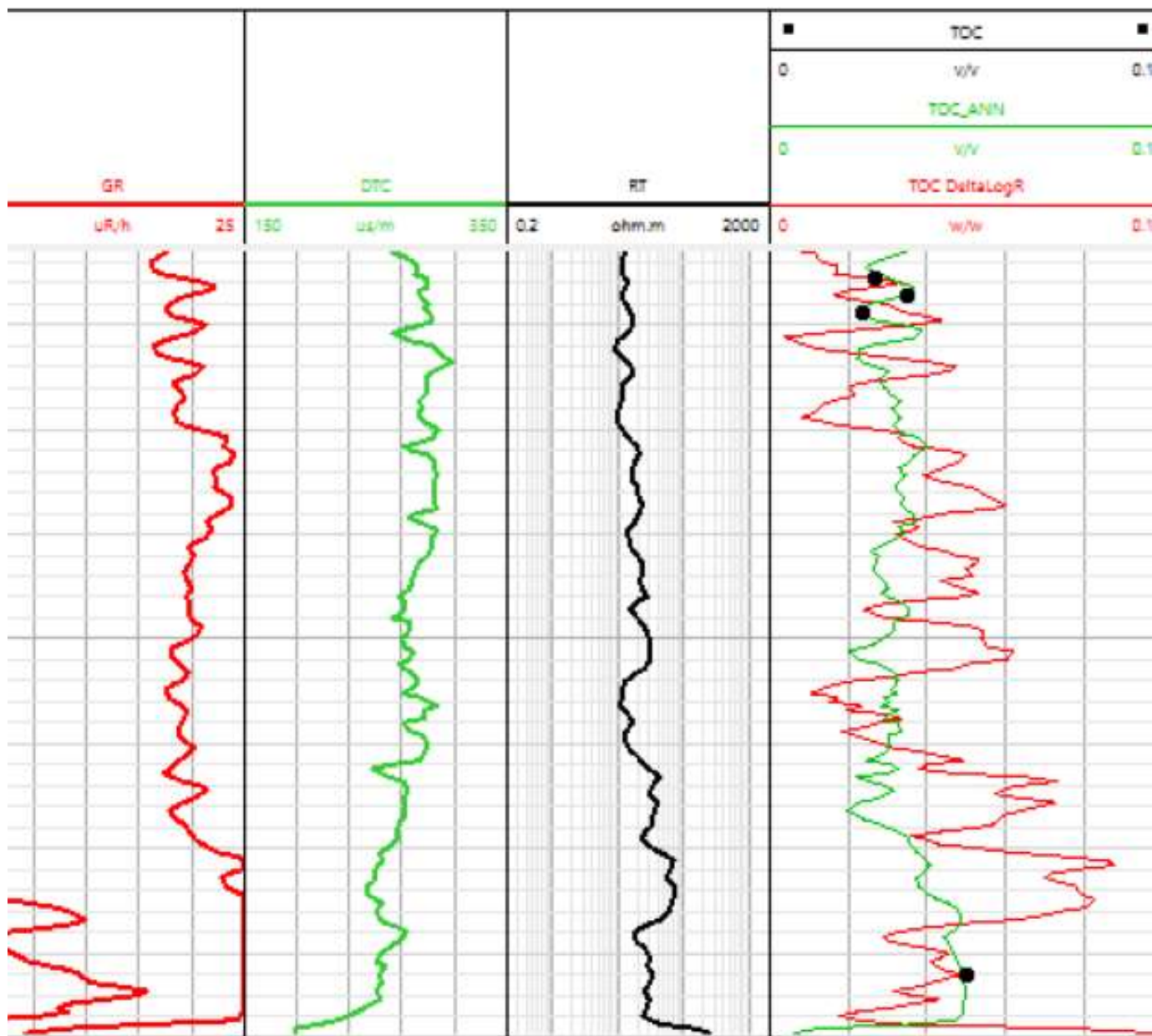
Схема архітектури нейронної мережі “Перцептрон”

□ Структура перцептрона:

- **Вхідний шар.** Приймає початкові параметри.
- **Приховані шари.** Виконують нелінійні перетворення та виявляють закономірності між ознаками.
- **Вихідний шар.** Формує цільовий прогноз.

□ Перцептрон у поточному дослідженні ТОС

- **Вхідні параметри:** акустичний каротаж **DT (Δt)** та **питомий електричний опір (RT)**, які чутливі до змін літології, пористості/насичення та вмісту органічної речовини.
- **Прихований шар:** нелінійне комбінування ознак (взаємодій Δt та $\log R_t$, споріднені з ідеєю ΔLogR).
- **Вихідний параметр:** прогнозована **масова частка загального органічного вуглецю (ТОС, %)**, який звіряється з лабораторними вимірюваннями.



Результати інтерпретації з використання нейронних мереж

Значення органічного вуглецю:

- Кернові зразки ТОС значення: Від 2.5% до 5.01%.
- Рівняння Пассі (ΔLogR метод): Передбачуване значення ТОС від 0% до 8%.
- Алгоритм нейронних мереж: Прогнозоване значення ТОС у межі від 2% до 4.9%.

Висновки

- Прогнозування вмісту органічної речовини у нижньовізейських чорносланцевих відкладах здійснювалося на основі обмеженого набору каротажних даних та результатів лабораторного аналізу керна, тому було запропоновано залучити до досліджень алгоритм нейронних мереж. За даними кернових досліджень, значення загального органічного вуглецю (ТОС) у досліджуваних інтервалах варіювали в межах **2,5-5,01 %**. Використання рівняння, запропонованого Passey та ін. (1990), дало прогнозований діапазон **0-8 %**, тоді як алгоритм нейронних мереж (ANN) забезпечив оцінки в межах **2-4,9 %**.
- Встановлено, що за умов обмеженої вибірки даних нейронна мережа демонструє **вищу збіжність** з лабораторними вимірюваннями, а її результати краще корелюються з лабораторними дослідженнями.
- Вперше для Глинсько-Солохівської площі ДДЗ виконано прогнозування вмісту органічного вуглецю шляхом поєднання алгоритму ANN із традиційними методами та проведено порівняння отриманих результатів з підходами, що широко застосовуються в нафтогазовій промисловості.
- У практичному сенсі доведено, що як метод Passey, так і алгоритм ANN забезпечують **стабільні та надійні оцінки** вмісту органічної речовини у породах за наявності достатнього об'єму даних керна та геофізичних досліджень свердловин, але у випадку недостатньої кількості кернового матеріалу залучення алгоритму нейронної мережі є ефективним і надійним підходом для отримання результату.

Список наукових праць:

Доповідь на міжнародній конференції: “XVIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE MONITORING OF GEOLOGICAL PROCESSES AND ECOLOGICAL CONDITION OF THE ENVIRONMENT 14 - 17 APRIL 2025, KYIV, UKRAINE” Elements of research on the hydrocarbon potential of shale: (based on the visean strata of the Dnieper-Donets Basin)

Публікація статті у редакції “Геофізичний журнал” на тему “Використання нейронних мереж для вивчення нетрадиційних покладів вуглеводнів (на прикладі візейських газоносних сланців Дніпровсько-Донецької западини)”

Доповідь на конференції: «Від Мінералогії і Геогнозії до Геохімії, Петрології, Геології та Геофізики: фундаментальні і прикладні тренди XXI століття» (MinGeoIntegration XXI - 2024) на тему:

“Акустичні властивості горючих сланців нижньовізейського ярусу Глинсько-Солохівського нафто-газового регіону.” Acoustic properties of lower visean shale of Glinsky-Solokhivskogo oil and gas field

Результати за рік навчання:

- ❖ Написаний перший розділ дисертації, де описано сучасний стан вивчення петрофізичних та акустичних властивостей чорних сланців, зокрема візейських відкладів Глино-Солохівської площі ДДЗ та використання нейронних мереж для задач геофізики. Обґрунтовано актуальність і новизну досліджень.
- ❖ Написаний другий розділ дисертаційної роботи з геологічною характеристикою району дослідження, а також особливостей візейських чорносланцевих відкладів Глинсько – Солохівському площі ДДЗ.
- ❖ Виконано інтерпретацію даних вертикального сейсмічного профілювання для свердловини “BUDA”, яка розміщена у місті Лузерн штат Пенсильванія, США зона залягання Марцеллуських сланців чорних сланців
- ❖ Виконано статистичний аналіз петрофізичних властивостей колекції зразків чорних сланців
- ❖ Досліджено акустичні та петрофізичні властивості горючих сланців Глинсько – Солохівському родовищі.
- ❖ Складно екзамен з дисципліни «філософія» на “відмінно”
- ❖ Здано всі екзамени за науково освітньою програмою аспірантури Інституту геофізики ім.С.І.Субботіна НАН України на “відмінно”



План на наступний рік

- Завершення роботи над дисертацією
- Подання статті за темою виділення інтервалів горючих сланців за акустичними властивостями, як за каротажними, так і за сейсмічними даними.
- Підготовка статті за результатами дослідження петрофізичних та акустичних властивостей Марцеллуських чорних сланців (Родовище “Wild Cat”) та їх порівняння з чорними сланцями ДДЗ.

Дякую Вам за увагу!