

Электромагнитно-деформационные волны земной коры

© В. Н. Уваров, 2016

Институт космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения РАН, Камчатский край, с. Паратунка, Россия

Поступила 14 августа 2016 г.

Представлено членом редколлегии **В. Н. Шуманом**

Стисло проаналізовано механізми механоелектромагнітних перетворень земної кори. Показано, що наявність цих ефектів приводить до появи електромагнітних супутників — вторинних електромагнітних хвиль, супутніх сейсмоакустичним хвилям, що поширюються зі швидкістю акустичних. У результаті формується електромагнітно-деформаційна хвиля, параметри якої залежать від джерела збудження і середовища поширення. Наведено підтвердження цього явища, отримані в польовому експерименті з використанням бурової свердловини в сейсмоактивному районі Камчатки. Зроблено висновки, що існування електромагнітно-деформаційних хвиль є одним з фундаментальних властивостей земної кори і що параметри хвиль істотно залежать від характеру джерела збудження і властивостей середовища поширення.

Ключові слова: механоелектромагнітні перетворення у земній корі, електромагнітні про-яви сейсмічних і акустичних хвиль та хвиль деформації і напруження кори, електромагнітні супутники сейсмічних і акустичних хвиль кори та хвиль напруження і деформації кори.

Введение. Сопутствующие землетрясению электромагнитные (ЭМ) сигналы литосферного происхождения ассоциируют с процессами релаксации тектонических напряжений. Возникновение этих сигналов осуществляется механизмами механоелектромагнитных преобразований (МЭМП), обусловленными составом и структурой породы земной коры. Учет таких механизмов приводит к последствиям, которые неизбежно влияют как на существующие подходы к регистрации сигналов литосферного происхождения, так и на понимание физики геофизических полей. В дальнейшем целесообразно проанализировать известные механизмы МЭМП.

Около 60 % вещества земной коры состоит из кварца. Отсюда следует наличие пьезоэлектрических свойств (электроупругость, пьезоэлектрический эффект) коры. Часть энергии акустических колебаний, распространяющихся в коре, преобразуется в электрические колебания, сопутствующие акустической волне. Этот эффект нашел применение в геофизической разведке [Пархоменко, 1968; Соболев, Демин 1980; Скипочка, 2002].

Около 5 % вещества земной коры составляет железо — хороший ферромагнетик. Домены ферромагнетика ориентируются в постоянном геомагнитном поле. Под воздействием механических напряжений, вызванных акусти-

ческими возмущениями или напряжениями, происходит нарушение ориентированности доменной структуры, вызывая изменение магнитной индукции [Villary, 1865; Jiles, 1995]. Эффект нашел широкое применение в технике (тензодатчики).

Порода земной коры представляет собой конгломерат различных минералов — твердых и флюидов. Твердые минералы в большинстве своем представлены в виде кристаллитов, формирующих твердую матрицу. В порах и трещинах этой матрицы находятся флюиды — жидкие и газообразные минералы. При этом из-за различия работ выхода на границе раздела минеральной матрицы и флюида возникает двойной электрический слой зарядов в минеральной матрице и флюиде — заряженный конденсатор. Перемещение флюида с находящимися в нем зарядами приводит к появлению тока, пропорционального скорости перемещения флюида относительно минеральной матрицы — электрокинетический эффект, который приводит к преобразованию акустических колебаний в электрические (волны Френкеля—Био) [Френкель, 1944; Biot, 1956a,б; Pride, 1994]. Эффект нашел применение в геофизической разведке [Светов, Губатенко, 1999; Светов, 2000].

Известен еще ряд эффектов преобразования механических возмущений в электромагнитные волны:

- инерционный — ионный аналог эффекта Стюарда—Толмена в пористой двухфазной среде, связанный с инерционностью ионов относительно перемещающейся жидкости в порах породы [Гульельми, 2006; Сурков, 2000];
- индукционный — при движении проводящей среды в магнитном поле [Гульельми, 2006; Сурков, 2000];
- деформационный — изменение проводимости, вызванное дилатансией горных пород и диффузией жидкости по поровым каналам. Как следствие это приводит к модуляции теллурических токов [Гульельми, 2006; Сурков, 2000];
- обусловленные динамикой дислокаций [Teisseyre, Ernst, 2002; Сурков, 2000];
- из-за различной подвижности носителей заряда [Шевцова, 1984];
- в результате роста дипольного момента отдельных микротрещин с противоположно заряженными бортами при растрескивании горных пород [Tzanis, Vallianatos, 2003; Сурков, 2000];
- возникновение на бортах трещин плазменного разряда [Молоцкий, 1983];
- перенос заряда ядром дислокации при дислокационном течении [Hadjicontis et al., 2007];
- тектономагнетизм — возникновение магнитного поля, вызванного замкнутыми дислокационными токами в области скольжения сдвиговой релаксации [Sasai, 2001];
- возникновение электродвижущей силы, вызванной взаимодействием дырок (точечных свободных вакансий кристалла) с полем градиента механического напряжения [St-Laurent et al., 2006].

Наконец следует упомянуть об отсутствии инверсии вертикальной инверсной симметрии земной коры из-за поля силы тяжести, приводящей к росту горного давления с глубиной. Это обстоятельство в соответствии с принципом Кюри должно приводить к возникновению пьезоэлектрического эффекта коры.

По-видимому, этот список не исчерпывает всех возможных МЭМП.

Следует отметить, что основные эффекты (пьезоэлектрический, пьезомагнитный, электрокинетический и индукционный) в области малых параметров обратимы.

1. Проявление электромагнитно-деформационных (ЭМД) волн. Приведенный перечень механизмов МЭМП земной коры показы-

вает, что любые механические возмущения в коре всегда имеют сопутствующее электромагнитное проявление. В случае, если такое возмущение представляет собой волновой процесс, например сейсмоакустические волны или волны напряжения, такое проявление представляет собой сопряженную электромагнитную волну. Следует отметить, что электромагнитноупругость является достаточно разработанной частью физики твердого тела (например, [Короткина, 1988; Можен, 1991]) и имеет широкое практическое применение (зажигалки, телефоны). Особенность МЭМП земной коры заключается в том, что их значительное количество осуществляется в области неупругих деформаций, происходящих при релаксации тектонических напряжений и потому являющихся необратимыми. Разнообразие физических условий в коре предоставляет широкие конкурентные возможности для реализации этих механизмов.

Общий ЭМД эффект коры является суммой обратимых электромагнитноупругих, при которых энергия возникшего электромагнитного поля возвращается в энергию упругого напряжения, и необратимых ЭМД эффектов, при которых электромагнитная энергия теряется. Чтобы не повторяться, уместно привести цитату [Светов, 2005], в которой, однако, под ЭМ полем электрокинетического происхождения следует подразумевать ЭМ поле электродеформационного происхождения.

«В целом, с геофизической точки зрения, ЭМ поле электрокинетического происхождения гораздо информативнее, чем породившее их сейсмическое. Оно включает четыре типа волн, различающихся по своим кинематическим (скоростям) и динамическим характеристикам: три волны, вмороженные в соответствующие сейсмические волны, и одну быструю ЭМ волну. Все эти волны по-разному и более сильно, чем сейсмические, зависят от петрофизических свойств среды. Если, как это обычно делается в сейсмоэлектрике, одновременно измерять упругие и электрические поля, то появляется возможность непосредственно из результатов измерений находить так называемые сейсмоэлектрические передаточные функции $W(\omega)$, представляющие собой в частотной области комплексные отношения напряженности электрического поля к смещению вещества (или скорости смещения) или давлению в скважине. В силу их относительно характера они не зависят от интенсивности возбуждаемого упругого поля и его спектраль-

ного состава, а потому для определения параметров упругой среды проще использовать их, чем непосредственно измеряемые напряженности полей. Функции $W(\omega)$ различаются для разных типов волн... Они зависят как от петрофизических параметров среды, так и от ее упругих и электрических свойств».

Необходимым условием наблюдения таких волн является значительная протяженность области аккумуляции энергии для обеспечения достаточной амплитуды и длительности релаксационного процесса. Вероятность регистрации события пропорциональна объему среды, в которой происходят события. В свою очередь этот объем тем больше, чем меньше поглощение. Поэтому предпочтительна область среды с малым поглощением. Поскольку поглощение определяется степенью дисперсности (пористости) среды, которая уменьшается с ростом глубины быстрее, чем по экспоненциальному закону [Athy, 1930], необходимо проведение исследований на глубине, обеспечивающей достаточно высокое горное давление. Для обеспечения процессов релаксации среда должна находиться в критически неустойчивом состоянии, т. е. внутренние напряжения должны быть вблизи порога разрушения. Естественно, такие условия крайне проблематично воссоздать в лабораторных условиях. Зато они выполняются в естественной геологической среде на глубинах, измеряемых сотнями метров вблизи горных выработок или в сейсмически активных областях. Доступ в эти области может быть осуществлен с помощью рудников, шахт или буровых скважин.

Спонтанную релаксацию напряжений, возникающую на границе породы и выработки в угольных шахтах, называют горным ударом. Обычно эти явления сопровождаются обрушением кровли шахт, обвалами и порою человеческими потерями. К сожалению, какие-либо фи-

зические исследования процессов горного удара автору не известны. Аналогичные явления происходят при бурении глубоких скважин в областях разломных структур, часто приводящим к заклиниванию и потере инструмента.

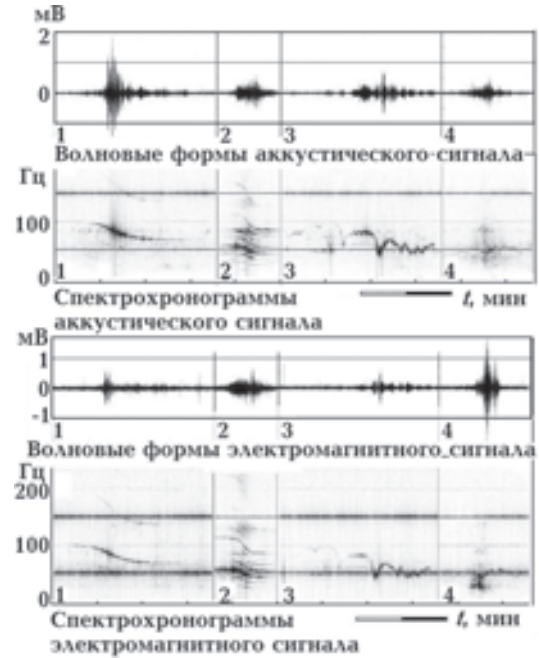


Рис. 1. Волновые формы и динамические спектры акусто-электромагнитных аномалий разных типов: 1 — аномалия типа «сигмоида», 2 — «полисигмоида», 3 — «трель», 4 — «гул» [Uvarov et al., 2015].

В настоящей статье проводится анализ результатов [Uvarov et al., 2015]. В этой работе представлены результаты акустоэлектромагнитных наблюдений в непромысловой скважине, пробуренной на термальную воду в сейсмоактивном районе Камчатки. В процессе наблюдений обнаружены аномалии акустической и электромагнитной активности, превосходящие по амплитуде фоновый уровень в 5—20 раз. Эти аномалии были разделены на 4 разных

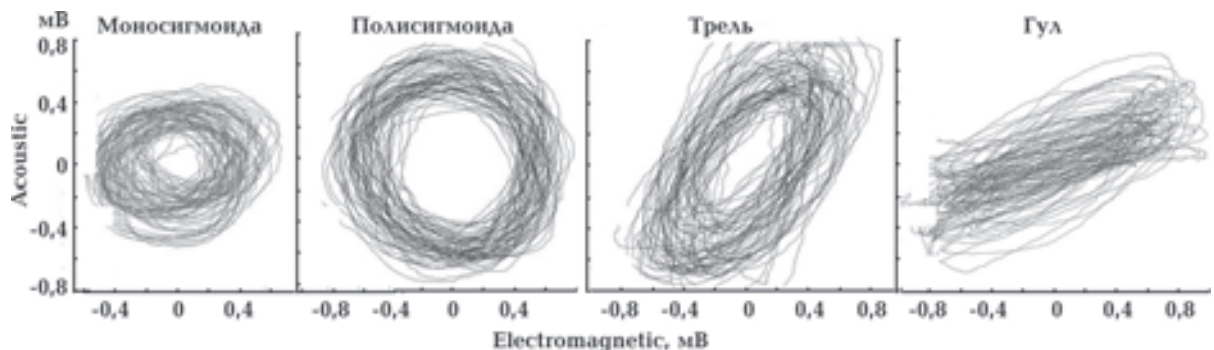


Рис. 2. Фазовые соотношения аномалий разных типов акустического и электромагнитного каналов (фигуры Лисажу). По горизонтали амплитуда электромагнитного канала. По вертикали — акустического [Uvarov et al., 2015].

типа: «сигмоида», «полисигмоида», «трель» и «гул». Характерная длительность этих аномалий была от одной до 3—4 мин. Основная энергия излучения приходилась на диапазон частот 25—150 Гц.

На рис. 1 приведены образцы синхронных акустических и электромагнитных аномалий. Нетрудно заметить, что как волновые формы, так и динамические спектры этих аномалий чрезвычайно похожи даже в деталях.

Однако основным доказательством наличия ЭМД колебаний является высокая степень взаимной когерентности акустической и электромагнитной компонент, которая проявляется на фигурах Лисажу акустической и электромагнитной компонент в виде синхронности этих колебаний (рис. 2).

Обсуждение результатов. Сходство волновых форм и динамических спектров указывает на неизменный фактор, обусловленный одной из следующих причин:

- один из этих сигналов является порождением другого в непосредственной окрестности одного из датчиков;
- акустический и электромагнитный сигналы являются проявлением одного физического процесса.

В первом случае, когда один из сигналов формируется в датчике под влиянием другого, следует ожидать постоянную разность фаз между акустическим и электромагнитным сигналами независимо от характера события, порождающего эти отклики.

Во втором случае можно ожидать зависимость фазового сдвига от свойств процесса, например от поляризации магнитоупругих волн.

Приведенные на рис. 2 фигуры Лисажу акустических и электромагнитных аномалий показывают, что фазовые соотношения между ними зависят от типа аномалии. Отсюда следует, что решающее влияние на сдвиг фазы ока-

зывают характер релаксационного события и вид возникающих при этом волн.

Сходство волновых форм аномалий, их акустических и электромагнитных спектров позволяет сделать вывод об общности источника акустического и электромагнитного излучения каждой из аномалий. На параметрическом графике волновых форм акустического и электромагнитного сигналов (фигуры Лисажу) фазовые соотношения всех типов литосфериков формируют хорошо выраженный эллипсоид, степень эллиптичности которого определяется типом аномалии (см. рис. 2). Это указывает на существование акустоэлектромагнитных колебаний (волны электромагнитоупругости) разных видов.

Выводы. Сходство волновых форм аномалий, их акустических и электромагнитных спектров позволяет делать вывод об общности источников акустического и электромагнитного излучения каждой из аномалий.

Большое сходство волновых форм, динамических спектров и высокая взаимная акустоэлектромагнитная когерентность колебаний являются ярким доказательством наличия электромагнитодеформационных волн разных видов.

Взаимосвязь акустических и электромагнитных колебаний (существование электромагнитно-упругих волн) — одно из фундаментальных свойств земной коры.

Распространяющиеся в коре электромагнитодеформационные колебания обладают различными свойствами, обусловленными характером источников их происхождения.

В свою очередь выяснение природы и характера источников релаксационной эмиссии коры позволит пролить дополнительный свет на динамику сейсмических процессов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов ДВО РАН 12-III-Ф-02-031 и РФФИ 13-02-01159.

Список литературы

- Гульельми А. В. Проблемы физики геоэлектромагнитных волн. *Физика Земли*. 2006. № 3. С. 3—16.
- Короткина М. Р. Электромагнитоупругость. Москва: Изд-во МГУ, 1988, 304 с.
- Можен Ж. Механика электромагнитных сплошных сред. Москва: Мир, 1991, 560 с.
- Молоцкий М. И. Оже-механизм дислокационной экзо-эмиссии. *Физика твердого тела*. 1983. Т. 25. № 1. С. 121—126.
- Пархоменко Э. И. Явления электризации в горных породах. Москва: Наука, 1968, 225 с.
- Светов Б. С. К теоретическому обоснованию сейсмoeлектрического метода геофизической разведки. *Геофизика*. 2000. № 1. С. 28—39.
- Светов Б. С. Сейсмoeлектрические методы исследования Земли. В кн.: *Электромагнитные исследования земных недр*. Москва: Научный мир, 2005. С. 217—230.

- Светов Б. С., Губатенко В. П. Электромагнитное поле механоэлектрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах: 1. Постановка задачи. *Физика Земли*. 1999. № 10. С. 67—73.
- Скипочка С. И. Механоэлектрические эффекты в породах и их использование в горной геофизике. Днепропетровск: Изд. Национальной горной академии Украины, 2002. 177 с.
- Соболев Г. А., Демин В. М. Механоэлектрические явления в Земле. Москва: Наука, 1980. 215 с.
- Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. Москва: Изд. МИФИ, 2000. 447 с.
- Френкель Я. И. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве. *Изв. АН СССР*. 1944. Т. 8. № 4. С. 133—150.
- Шевцова И. Н. Заряженные дислокации при деформировании кристаллов с ионным типом связи. *Физика Земли*. 1984. № 8. С. 106—112.
- Athy L. F., 1930. Density, porosity and computation of sedimentary rocks. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.* 14, 1—24.
- Biot M. A., 1956a. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. 1. Low-frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* 28(2), 168—178.
- Biot M. A., 1956b. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. 2. Higher frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* 28(2), 179—191.
- Hadjicontis V., Mavromatou C., Antsygina T. N., Chishko K. A., 2007. Mechanism of electromagnetic emission in plastically deformed ionic crystals. *Phys. Rev. B* 76(2), 024106. doi:10.1103/PhysRevB.76.024106.
- Jiles D. C., 1995. Theory of the magnetomechanical effect. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 28, 1537—1546.
- Pride S. R., 1994. Governing equation for the coupled electromagnetic and acoustics of porous media. *Phys. Rev. B* 50(21), 15678—15696.
- Sasai Y., 2001. Tectonomagnetic modeling based on the piezomagnetism: a review. *Annal. Geofis.* 44(2), 361—368.
- St-Laurent F., Derr J. S., Freund F. T., 2006. Earthquake light and the stress-activation of positive hole charge carriers in rocks. *Phys. Chem. Earth* 31, 305—312.
- Teisseyre R., Ernst T., 2002. Electromagnetic radiation related to dislocation dynamics in a seismic preparation zone. *Ann. Geophys. Italy* 45(2), 393—399.
- Tzanis A., Vallianatos F., 2003. A physical model of electric earthquake precursors due to crack propagation and the motion of charged edge dislocations. In: *Seismo Electromagnetics Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Tokyo: Terrapub, P. 117—130.
- Uvarov V. N., Malkin E. I., Druzhin G. I., Sannikov D. V., Pukhov V. M., 2015. Acoustic-electromagnetic effects of tectonic movements of the crust — borehole survey. *Solid Earth Discuss.* 7, 1447—1468. www.solid-earth-discuss.net/7/1447/2015.
- Villary E., 1865. Change of magnetization by tension and by electric current. *Ann. Phys. Chem.* 126, 87.

Electromagnetic-deformational waves of the Earth crust

© V. N. Uvarov, 2016

This article briefly analyzes mechanisms of mechano-electromagnetic transformations of the earth's crust. It demonstrates that the presence of these effects leads to the appearance of electromagnetic satellites, which are secondary electromagnetic waves associated seismic and acoustic waves propagating at the speed of the acoustic waves. The result is electromagnetic deforming wave, whose parameters depend on the source of excitation and parameters of propagation environment. Here is a proof of this phenomenon, gained during the field experiment conducted with the use of a borehole in a seismically active region of Kamchatka. It is concluded that the existence of 1) electromagnetic deforming waves is one of the fundamental properties of the Earth's crust, 2) parameters of electromagnetic deforming waves depend strongly on the nature of the excitation source and the properties of the propagation medium.

Key words: mechanic-electromagnetic transformations in the Earth's crust, electromagnetic manifestations of seismic and acoustic waves, electromagnetic manifestations of crust deformation and tension waves, electromagnetic associates of crust seismic and acoustic waves, electromagnetic associates of crust tension and deformation waves.

References

- Gul'elmi A. V., 2006. Problems of physics Geoelectromagnetic waves. *Fizika Zemli* (3), 3—16 (in Russian).
- Korotkina M. R., 1988. Electromagnetelastic. Moscow: Moscow Univ. Press, 304 p. (in Russian).
- Mozhen Zh., 1991. Mechanics electromagnetic continua. Moscow: Mir, 560 p. (in Russian).
- Molotskiy M. I., 1983. Auger mechanism of dislocation exo-emission. *Fizika tverdogo tela* 25(1), 121—126 (in Russian).
- Parkhomenko E. I., 1968. Electrification phenomena in rocks. Moscow: Nauka, 225 p. (in Russian).
- Svetov B. S., 2000. On the theoretical justification seismoelectric method of geophysical prospecting. *Geofizika* (1), 28—39 (in Russian).
- Svetov B. S., 2005. Seismoelectrical methods for studying the Earth. In: *Electromagnetic study Earth's interior*. Moscow: Nauchnyy Mir, P. 217—230 (in Russian).
- Svetov B. S., Gubatenko V. P., 1999. Electromagnetic field of mechanical and electrical origin in porous saturated with water rocks: 1. Formulation of the problem. *Fizika Zemli* (10), 67—73 (in Russian).
- Skipochka S. I., 2002. Mechanical and electrical effects in rocks and their use in mining geophysics. Dnepropetrovsk: National Mining Academy of Ukraine, 177 p. (in Russian).
- Sobolev G. A., Demin V. M., 1980. Mechanical Electrical phenomena in the world. Moscow: Nauka, 215 p. (in Russian).
- Surkov V. V., 2000. Electromagnetic effects from earthquakes and explosions. Moscow: Publ. House. ME-PHI, 447 p. (in Russian).
- Frenkel' Ya. I., 1944. Theory of seismic and seismoelectrical phenomena in wet soil. *Izvestiya AN SSSR* 8(4), 133—150 (in Russian).
- Shevtsova T. N., 1984. Charged dislocations during the deformation of crystals with ionic type of bonding. *Fizika Zemli* (8), 106—112 (in Russian).
- Athy L. F., 1930. Density, porosity and computation of sedimentary rocks. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.* 14, 1—24.
- Biot M. A., 1956a. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. 1. Low-frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* 28(2), 168—178.
- Biot M. A., 1956b. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. 2. Higher frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* 28(2), 179—191.
- Hadjicontis V., Mavromatou C., Antsygina T. N., Chishko K. A., 2007. Mechanism of electromagnetic emission in plastically deformed ionic crystals. *Phys. Rev. B* 76(2), 024106. doi:10.1103/PhysRevB.76.024106.
- Jiles D. C., 1995. Theory of the magnetomechanical effect. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 28, 1537—1546.
- Pride S. R., 1994. Governing equation for the coupled electromagnetic and acoustics of porous media. *Phys. Rev. B* 50(21), 15678—15696.
- Sasai Y., 2001. Tectonomagnetic modeling based on the piezomagnetism: a review. *Annal. Geofis.* 44(2), 361—368.
- St-Laurent F., Derr J. S., Freund F. T., 2006. Earthquake light and the stress-activation of positive hole charge carriers in rocks. *Phys. Chem. Earth* 31, 305—312.
- Teisseyre R., Ernst T., 2002. Electromagnetic radiation related to dislocation dynamics in a seismic preparation zone. *Ann. Geophys. Italy* 45(2), 393—399.
- Tzanis A., Vallianatos F., 2003. A physical model of electric earthquake precursors due to crack propagation and the motion of charged edge dislocations. In: *Seismo Electromagnetics Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Tokyo: Terrapub, P. 117—130.
- Uvarov V. N., Malkin E. I., Druzhin G. I., Sannikov D. V., Pukhov V. M., 2015. Acoustic-electromagnetic effects of tectonic movements of the crust — borehole survey. *Solid Earth Discuss.* 7, 1447—1468. www.solid-earth-discuss.net/7/1447/2015.
- Villary E., 1865. Change of magnetization by tension and by electric current. *Ann. Phys. Chem.* 126, 87.