

УДК 539.9, 550

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ**

**В. Н. Уваров, И. А. Ларионов, Е. И. Малкин**

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн  
ДВО РАН, 684034, с. Паратунка, Камчатский край

E-mail: uvarovvnnng@yandex.ru

Геологическая среда земной коры рассматривается как неравновесная активная открытая система. Показано, что горная порода является благоприятной средой для возникновения сейсмо-акустических колебаний и неблагоприятной для возникновения электромагнитных колебаний в низкочастотной области. Показано, что в основе анализа известных механо-электромагнитных механизмов, объясняющих существование сопутствующего землетрясениям электромагнитного излучения, лежит деформационно-индуцированное дипольное излучение, интенсивность которого определяется как характером движений, так и электрофизическими свойствами породы. Анализ двумерных гистограммы деформаций коры и естественного электромагнитного излучения позволил выделить несколько кластеров, соответствующих устойчивым условиям механо-электромагнитных преобразований, которые можно объяснить характером механо-электромагнитных свойств породы в очагах деформации. Совместный анализ каталога землетрясений и сигналов электромагнитного излучения позволил выделить электромагнитные сигналы литосферного происхождения.

*Ключевые слова: сейсмoeлектромагнетизм, электродинамика литосферы, электромагнитное излучение коры, сейсмическая активность, электромагнитные и механические свойства горных пород*

© Уваров В. Н., Ларионов И. А., Малкин Е. И., 2018

## Введение

В основе электромагнитных проявлений динамики литосферы лежит электромагнитная природа формообразования твердых тел. Релаксационная деформация твердого тела, в том числе и горной породы, представляет собой изменение как физической, так и электромагнитной структуры. Часть потенциальной энергии напряжения при деформации выполняет работу по изменению физической структуры среды, связанную с преобразованием атомарно-молекулярных связей. Остальная часть потенциальной энергии напряжения преобразуется в волновые возмущения среды и электромагнитного поля, повышающие температуру среды или уносящие эту энергию.

Здесь следует учесть, что среда твердого тела представляет собой электронейтральную плазму, частицы разных знаков которой значительно отличаются по массе и взаимодействию с волнами среды. В результате этого любая деформационная волна среды вызывает электромагнитное сопровождение, представляющее собой сопутствующую электромагнитную волну, источник которой распространяется со скоростью волны деформации.

Эффективность преобразования энергии волны деформации в электромагнитную определяется так называемыми механо-электромагнитными механизмами. Некоторые из этих механизмов достаточно хорошо известны и имеют практическое приложение, например, пьезоэлектрический и пьезомагнитный эффекты. Все механизмы имеют физические модели разной степени детализации и теоретического обоснования [1]-[4] и привлекаются для интерпретации наблюдаемых явлений, полевых и лабораторных экспериментов.

Вышесказанное относится не только к земной коре, но и ко всем открытым открытым неравновесным системам, в которых осуществляется перенос энергии-импульса и потому электромагнитное излучение не находится в равновесии с веществом. В случае земной коры поток энергии-импульса имеет тектоническое происхождение и связан с мантийной конвекцией.

## Кора как среда генерация волн

Электромагнитное излучение можно разделить на два основных вида - равновесное (тепловое) излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с веществом, и неравновесное (нетепловое), возникающее в неравновесных системах при распространении и преобразовании в них потоков энергии.

Спектр равновесного излучения подчиняется закону Планка:

$$u(\nu, T) = \frac{\nu^2}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{\hbar \nu}{\exp\left(-\frac{\hbar \nu}{kT}\right) - 1} \quad (1)$$

и определяется частотой  $\nu$  и температурой  $T$  с учетом  $\hbar, k$  – постоянных Планка и Больцмана, а также  $c$  – скорости света.

Спектр неравновесного излучения присущ неравновесным системам и определяется характером протекающих в системе процессов преобразования энергии. Примерами спектров неравновесного излучения являются спектры фликкер шума, синхротронного излучения, сверхлюминесценции. При наличии в системе

положительных обратных связей возможно возникновение характерных полос генерации, как это имеет место в лазерах, *LC* и *RC*-генераторах и генераторе Ван дер Поля.

Одним из возможных состояний неравновесной системы является критическое – пограничное между двумя фазами, при котором возникают переходные режимы, одним которых являются колебательные процессы, связанные с преобразованием потенциальной энергии системы в кинетическую энергию колебаний. При исследовании динамики коры для выяснения характера откликов не доступные контактными измерениями движения коры следует выяснить возможности земной коры как преобразователя потенциальной энергии напряжений в регистрируемые на удалении колебания, то-есть возникновения режима генерации колебаний [5]-[7].

Для генерации колебаний необходимо наличие структуры, содержащей следующие компоненты:

- емкость для запаса потенциальной энергии, используемой при преобразовании в кинетическую энергию колебаний;
- преобразователь потенциальной энергии в кинетическую энергию колебаний;
- система управления процессом преобразования потенциальной энергии в энергию колебаний,
- цепь положительной обратной связи для управления процессом преобразования.

Возможны два режима возникающих колебаний - устойчивый и неустойчивый.

Для устойчивости колебательного процесса необходимо чтобы расход энергии за одно колебание был мал по сравнению с емкостью аккумулятора:

$$\frac{E_a \omega}{\dot{E}_a} \sim \tau \omega = Q \gg 1. \quad (2)$$

Здесь  $Q$  – добротность колебательной системы,  $\tau$  - характерное время релаксации системы,  $\omega$  – частота колебаний. Это означает, что добротность системы должна быть существенно больше единицы.

Для типичных значений удельного сопротивления ( $1 < \rho < 10^4$ ) [ $\Omega \cdot m$ ] и диэлектрической проницаемости ( $5 < \epsilon < 20$ ) земной коры характерное время релаксации заряда в коре  $\tau = \rho \epsilon$  в зависимости от параметров среды заключено в диапазоне ( $10^{-7} \div 10^{-2}$ ) <  $\tau$  с. Иными словами, аккумулирующие свойства горной породы не допускают возможности возникновения генерации в горной породе в зависимости от ее параметров в диапазоне ниже  $\omega > (10^7 \div 10^2)$  Гц. Здесь следует отметить, что горная порода в диапазоне частот  $\omega > (10^7 \div 10^2)$  характеризуется высоким поглощением и потому вероятность обнаружения этого излучения весьма мала. Отсутствие механизма электромагнитной положительной обратной связи в среде горной породы полностью исключает возможность режима устойчивой генерации.

Это обстоятельство не исключает существование электромагнитных колебаний не связанных с генерационными свойствами системы. Для возникновения неустойчивых колебаний достаточно наличия электромагнитно-деформационного отклика, обусловленного наличием механизма механо-электромагнитного преобразования (МЭМП) породы. Наблюдаемое электромагнитное излучение коры может быть объяснено именно этим эффектом.

Иная ситуация существует для акустических колебаний. Горная порода представляет собой конгломерат породообразующих минералов в различных фазовых состояниях. Ее кристаллическая матрица способна накапливать потенциальную

энергию механических напряжений. Характерное время пребывания горной породы в напряженном состоянии сильно зависит от петрографического состава и температуры. Для большинства видов горной породы характерна обратная зависимость между скоростью и сопротивлением деформации, присущая сухому трению твердых тел и вязкости тиксотропных жидкостей. Эта зависимость реализует механизм положительной параметрической обратной связи в деформируемой горной среде, делая ее благоприятной для генерации деформационных колебаний релаксационной природы. Этот механизм привлекается для объяснения землетрясений и нашел подтверждение в многочисленных лабораторных экспериментах. Отсюда ясно, что горная порода является благоприятной средой для релаксационной генерации акустических колебаний, возникающих под действием тектонических напряжений.

## Механоэлектромагнитные механизмы коры

### Виды механоэлектромагнитных механизмы коры

Электромагнитные сигналы литосферного происхождения (ЭМ), сопутствующие землетрясениям, ассоциируют с процессами релаксации тектонических напряжений. Возникновение этих сигналов обусловлено МЭМП. Учет этих механизмов приводит к ряду последствий, которые неизбежно влияют на понимание физики явления и определяют подходы к регистрации сигналов литосферного происхождения. Проанализируем известные механизмы МЭМП.

1. Около 60% вещества земной коры является окисью кремния, наиболее часто встречающейся в форме обладающего пьезоэффектом кварца (электроупругость, пьезоэлектрический эффект). Это свойство используется в геофизической разведке [8]-[11]. Для этого эффекта скорость изменения поляризации  $\dot{P}$  пропорциональна скорости деформации  $\dot{\sigma}$ .

$$\dot{P} \sim \dot{\sigma}.$$

2. Около 5% вещества земной коры приходится на железо, обладающее ферромагнитными свойствами. Структура доменов ферромагнетика, ориентированная по постоянному геомагнитному полю, под воздействием сейсмоакустических возмущений или напряжений претерпевает нарушения, вызывая изменение магнитной индукции и эффективной магнитной проницаемости [12, 13].

$$\dot{P} \sim \frac{\partial \mu}{\partial \sigma} \dot{\sigma}.$$

3. Порода земной коры представляет собой конгломерат минералов в разных фазах - твердой, жидкой или газообразной. Твердые минералы в большинстве своем представлены в виде кристаллитов, формирующих матрицу, в порах и трещинах которой находятся флюиды — жидкие и газообразные минералы. При этом из-за неравенства работы выхода на границе раздела различных минералов возникает двойной электрический слой. Перемещение флюида с находящимися в нем зарядами, вызывает ток, пропорциональный скорости перемещения флюида относительно минеральной матрицы - электрокинетический эффект, приводящий к преобразованию акустических колебаний в электрические (волны Френкеля-Био) [11]-[14]. Эффект нашел применение в геофизической разведке [9, 14]. В данном

случае скорость возникновения поляризации пропорциональна скорости течения флюида, которая свою очередь пропорциональна скорости деформации среды:

$$\dot{P} \sim \dot{\sigma}.$$

Помимо перечисленных выше эффектов известен еще ряд эффектов преобразования механических возмущений в электромагнитные волны:

4. инерционный - ионный аналог эффекта Стьюарда-Толмена в пористой двухфазной среде, связанный с инерционностью ионов относительно перемещающейся жидкости в порах породы [2, 15] :

$$\dot{P}_q \sim \dot{\sigma};$$

5. индукционный - при движении проводящей среды в магнитном поле [2, 15]. При этом поляризация пропорциональна произведению величины магнитного поля  $B$  на скорость деформации  $\dot{\sigma}$ :

$$\dot{P} \sim \dot{\sigma} \cdot \vec{B};$$

6. деформационный, обусловленный изменением проводимости при дилатансии горных пород  $\partial\rho/\partial\sigma$ , сопровождающейся диффузией жидкости по поровым каналам и приводящей к модуляции теллурических токов [2, 15]:

$$\dot{P} \sim \frac{\partial\rho}{\partial\sigma} \cdot \dot{\sigma};$$

7. обусловленные динамикой дислокаций [2, 15]:

$$\dot{P} \sim \dot{\sigma};$$

8. обусловленный различием подвижности носителей заряда при переносе заряда ядром дислокации в дислокационном течении в кристаллитах породы [16, 17]:

$$\dot{P} \sim \dot{\sigma};$$

9. вызванный изменением дипольных моментов микротрещин с противоположно заряженными бортами при растрескивании горных пород [2, 18]:

$$\dot{P} \sim \dot{\sigma};$$

10. возникновением между бортами трещин плазменного разряда [19]:

$$\dot{P} \sim \dot{\sigma};$$

11. трибоэлектрический, обусловленный различием работы выхода из контактирующих материалов при их разделении:

$$\dot{P} \sim \dot{\sigma};$$

12. возникновением электродвижущей силы от миграции подвижных кристаллических дефектов в поле градиента механического напряжения [20]:

$$\dot{P} \sim \dot{\sigma};$$

13. магнитогидродинамический, обусловленный растяжением магнитных силовых линий вмороженных в проводящую среду горной породы при деформации:

$$\dot{P} \sim \dot{\sigma}.$$

14. Наконец нельзя не упомянуть о глобальном пьезоэффекте земной коры, связанном с отсутствием инверсии вдоль вертикальной оси земной коры из-за наличия поля силы тяжести, ростом горного давления с глубиной и стратификацией коры в процессе корообразования. Это обстоятельство в соответствии с принципом Кюри должно приводить к возникновению глобального пьезоэлектрического эффекта.

$$\dot{P} \sim \dot{\sigma}.$$

По видимому, этот список не исчерпывает всех возможных МЭМП. Следует отметить, что основные эффекты (пьезоэлектрический, пьезомагнитный, электрокинетический и индукционный) в области Гуковских деформаций обратимы.

### Обобщение механоэлектромагнитных механизмов

Все эти эффекты связывают скорость изменения деформационно-индуцированной поляризации со скоростью деформации  $\dot{\sigma}$ . Поэтому с учетом предыдущих соотношений с учетом релаксационной деполяризации, обусловленной конечной проводимостью среды  $P/\tau$ , можно записать для скорости деформационно-индуцированной поляризации коры обобщающее соотношение

$$\dot{P} = K\dot{\sigma} - \frac{P}{\tau}; \quad (3)$$

Здесь  $K = (A + B\frac{\partial \rho}{\partial \sigma} + C\frac{\partial \mu}{\partial \sigma})$  - параметр, описывающий электромагнитные свойства породы,  $A, B, C$  - константы, определяющие вес каждого члена в общем балансе механоэлектрических преобразователей.

Наличие этих эффектов приводит к электромагнитным проявлениям динамики литосферы, в частности, к появлению сопутствующих электромагнитных волн, сопровождающих сейсмоакустические возмущения [4, 14]. Исследование этих явлений привело к появлению понятия «сейсмoeлектромагнетизм» как область радиофизики природных сред [21].

### Дипольное излучение и деформация

Электромагнитный отклик деформационной природы является физическим проявлением нестационарности электромагнитной структуры среды. В свою очередь эта нестационарность возникает при ускоренном движении электрических зарядов разной полярности друг относительно друга под действием внешних сил. Эти процессы возникают при изменении структуры зарядов горной породы при ее деформации, вызывая электромагнитное излучение деформационного происхождения.

Полная мощность возникающего при этом излучения дается соотношением Лармора [22]

$$W = \frac{2}{3} \frac{(\ddot{\vec{P}})^2}{c^3}. \quad (4)$$

Здесь  $\vec{P} = Q \cdot \vec{d}$  - результирующий дипольный момент системы,  $c$  - скорость света.

При рассмотрении единичного объема

$W$  - это интенсивность излучение от элементарного объема,

$\vec{P}$  - поляризация вещества в области деформации,

$Q$  - плотность заряда,

$\vec{d}$  - эффективная база эквивалентного диполя,

$(\ddot{\phantom{x}})$  - операция взятия второй производной по времени.

Для простоты введем предположение о том, что тензор деформации полностью определяется модулем его главного вектора  $\sigma$  и пропорционален базе дипольного момента  $\vec{d} \sim \sigma$ . Выполняя необходимые подстановки и полагая, что рассматриваемые переменные подчиняются гауссовой статистке получим

$$W \sim (\ddot{\vec{P}})^2 = (K\ddot{\sigma})^2 + (\dot{K}\dot{\sigma})^2 + \left(\frac{K\dot{\sigma}}{\tau} + \frac{\dot{P}}{\tau^2}\right)^2. \quad (5)$$

Из анализа полученных выражений видно, что электромагнитное проявление является откликом как на изменение механоэлектрических свойств среды в процессе деформации, так и на кинетические параметры деформационного процесса. Иными словами, преобразование структуры среды при деформационной релаксации порождает электромагнитное возмущение, отражающее как динамику процесса тектонической перестройки коры, так и характер ее электромагнитных свойств.

## Электромагнитные проявления деформационной активности литосферы

Для выяснения существования электромагнитных проявлений деформационной активности были сопоставлены данные деформационной активности земной коры сейсмически активного региона, зарегистрированные лазерного деформографа и системы регистрации естественного электромагнитного излучения [23, 24]. Для этого использовались данные электромагнитного ОНЧ-СНЧ излучения (вертикальная электрическая и три взаимноортогональных магнитных компоненты поля), регистрируемые антеннами установленными на геофизической станции наблюдения "Карымшина" ИКИР ДВО РАН ( $52.82^\circ N, 158.13^\circ E$ ) и установленного там же лазерного деформографа. Станция расположена в области пересечения региональных разломов Малко-Петропавловской зоны поперечной дислокации северо-западной ориентировки в Паратунской раздвиговой зоне у подножия экструзивного купола сопки Горячая. Эта территория характеризуется низким уровнем промышленных помех и высокой микросейсмичностью.

Деформограф имел точность измерения относительных деформаций не хуже  $10^{-8}$ . Частота дискретизации данных деформографа 1 кГц.

Чувствительность системы, регистрирующей электромагнитное поле, по магнитной компоненте была не хуже  $2 \cdot 10^{-7} \text{ nT/Hz}^{1/2}$  и  $6 \cdot 10^{-8} \text{ V/(m Hz}^{1/2})$  по электрической. Регистрация осуществлялась в оцифрованном виде с частотами дискретизации 48 кГц.

Использовались результаты фильтрации исходных сигналов в частотном диапазоне  $55 \div 495 \text{ Hz}$ , из которого, с целью уменьшения уровня техногенных помех, удален набор полос шириной  $10 \text{ Hz}$  центрированных относительно частот, кратных промышленной частоте ( $50 \text{ Hz}$ ). В предыдущих исследованиях было

выяснено, что этот диапазон частот содержит достаточно интенсивное сейсмогенное излучение при относительно низком уровне влияния излучения атмосферно-грозового происхождения. После фильтрации модуль электромагнитного сигнала усреднялся в окне шириной 1 с. В результате электромагнитный сигнал представляет среднее значение отфильтрованной от промышленных помех амплитуды поля усредненной за одну секунду. Измерения были проведены за период с 01.02.2018г по 31.03.2018г. После удаления дефектных данных в нашем распоряжении осталось 1 294 405 секундных отсчетов, что соответствовало общей длительности периода изменения несколько более 15 суток.

Для анализа связи между деформационной активностью и естественным электромагнитным полем использовался анализ двумерных гистограмм величины ускорения деформации в зависимости как от прямых характеристик поля (амплитуды поля горизонтальной и вертикальной магнитных и вертикальной электрической компонент), так и косвенных (отношения амплитуд вертикальной электрической к вертикальной магнитной, вертикальной электрической к горизонтальной магнитной и произведение вертикальной электрической на горизонтальную магнитную, дающей представление о мощности поля). Косвенные относительные характеристики в значительной мере определяются параметрами горной породы и характером происходящих в ней процессов. Все эти гистограммы представлены на рис. 1.

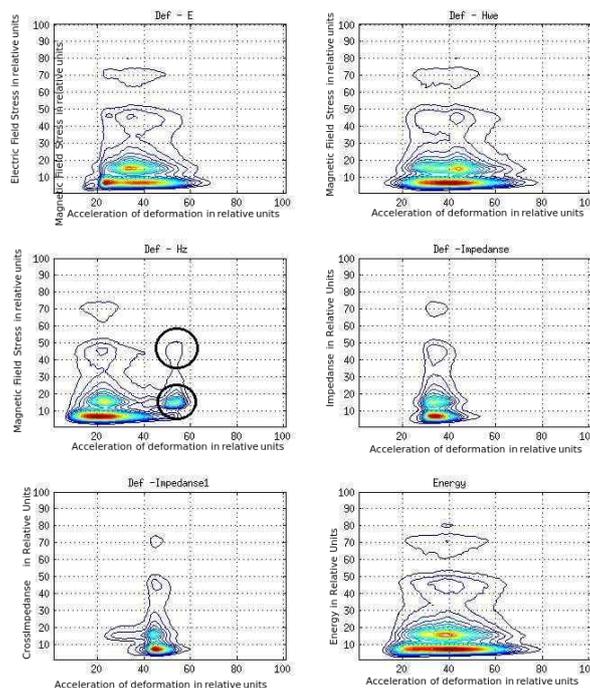


Рис. 1. Двумерные гистограммы логарифма плотности частоты совместных событий ускорения деформации и характеристик электромагнитного поля. Ось X - ускорение деформации. Ось Y для (Def - Ez) - амплитуда вертикального электрического поля; (Def - Hwe) - амплитуда WE-компоненты магнитного поля; (Def-Hz) - амплитуда Z-компоненты магнитного поля; амплитуда  $Ez/Hwe$  (Def-Impedance) ; амплитуда  $Ez/Hz$  (Def-CrossImpedance); (Energy) -  $Ez \cdot Hwe$  (мощность). Все значения в относительных единицах

Наблюдаемые на этих гистограммах кластеры имеют несколько точек притяжения, соответствующих максимумам плотности частоты совместных электромагнитно-деформационных событий.

Прежде всего следует обратить внимание на наибольшие максимумы, соответствующие малым значениям амплитуды электромагнитного поля при достаточно широком диапазоне ускорений деформации, расположенные в нижней части гистограмм рисунка 1. Это можно трактовать как отсутствие электромагнитного проявления деформаций соответствующих малым амплитудам электромагнитного излучения.

Остальные максимумы говорят о наличии нескольких видов стационарных условий возникновения и протекания процессов. Такими условиями могут быть как различия величин порогов напряжения между упругой и пластической деформацией для разных пород и условий их залегания, так и различная эффективность механо-электромагнитных преобразований, обусловленная петрографическим составом породы в области протекания деформационных процессов.

Если предположить, что максимумы частоты появления событий определяются значением порога упруго-пластической деформации, то можно сказать, что существуют два порога, соответствующие двум диапазонам ускорений деформации со значениями  $15 \div 30$  и  $35 \div 50$  условных единиц. Это может соответствовать породам двух различных петрографических составов или двум различным физическим условиям (например, различным температурам).

Аналогичным образом можно оценить значения максимумов, соответствующих характерным значениям механо-электромагнитным преобразований -  $5 \div 8$ ,  $13 \div 17$ ,  $43 \div 48$  и  $65 \div 75$  условных единиц. Можно предположить, что эти максимумы обусловлены различными значениями механо-электромагнитных преобразований минералов в области деформации. Значения числа максимумов (точек притяжения) на различных гистограммах варьируются. Наибольшее число максимумов на гистограмме (Def-Hz) равно 7.

Видны значительные различия гистограмм разных параметров. На гистограмме ускорение - вертикальная магнитная компонента (Def-Hz) присутствуют два максимума, отмеченных окружностями, соответствующие большим значениям ускорений, которые крайне слабо выражены на гистограмме с горизонтальным направлением магнитного поля (Def-Hwe). Это позволяет предположить, что эффективность механо-электромагнитных преобразований является величиной анизотропной и связана с направлением силы тяжести.

## Основные виды аномальных сигналов, сопутствующих землетрясениям

Коре, как сложной реологической среде, присущ широкий диапазон видов механических движений - от ударного типа релаксационных всплесков, сопровождающих хрупкое разрушение, до течений (крип), свойственных породам обогащенным флюидами или находящимися в размягченном или расплавленном состоянии. Естественно, все это нашло отражение в волновых формах электромагнитного проявления релаксационных процессов, представленных ниже [4, 6, 5, 7].

Достаточно хорошая изученность сигналов атмосферно-грозового, ионосферно-магнитосферного и техногенного происхождения, которые в данном случае

выступают как помехи, позволяет отделить их от сигналов литосферного происхождения.

В процессе исследований выяснилось, что наиболее яркие отклики на сейсмические события содержит вертикальная электрическая компонента электромагнитного излучения, на которой сосредоточено внимание настоящего сообщения.

В результате анализа волновых форм электромагнитных проявлений всех землетрясений 2013 года, обеспеченных электромагнитными данными (1201 событие), и сопоставления с каталогом землетрясений Камчатского филиала геофизической службы РАН удалось выделить 5 основных типов регулярно повторяющихся форм электромагнитных сигналов.

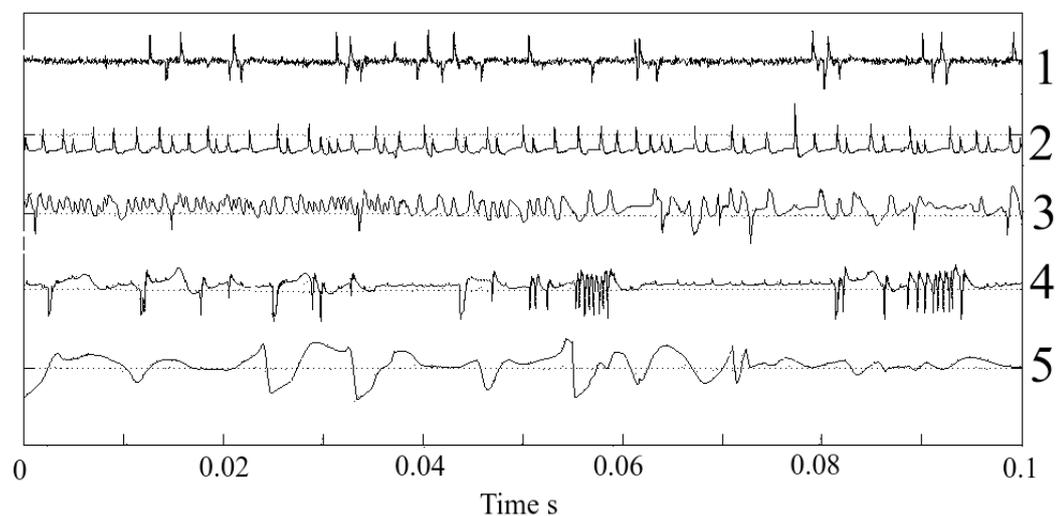


Рис. 2. Типичные формы электромагнитных сигналов, сопутствующих землетрясениям. По горизонтальной оси - время в секундах

На рис. 2 в строке 1 представлены кратковременные высокоамплитудные всплески с крутым передним и пологим задним фронтами, напоминающие аperiodические колебания малодобротного осциллятора. Все всплески этого типа приурочены к моменту землетрясения. Экстремальные значения этих всплесков мало отличаются по амплитуде, но могут иметь случайно появляющуюся полярность разных знаков.

На наш взгляд это предельный случай сигнала, который можно ассоциировать с постоянно протекающим хрупким разрушением, каждый акт которого сопровождается кратковременным импульсом. Сигналы, представленные в строке 5 рисунка 2 следует отнести к противоположному предельному случаю, связанному с течением реологически сложной среды в условиях переменных тектонических напряжений. Промежуточные случаи (2, 3, 4), по видимому, можно связать с релаксационными процессами при разной доле влияния этих крайних случаев.

## Выводы

Задача разработки методов диагностики геодинамического состояние коры в исследованиях сейсмоэлектromagnetизма присутствует постоянно [3]. Однако на наш взгляд несмотря принципиальную ясность физических основ сейсмоэлектromagnetизма о его практическом использовании как инструмента мониторинга геодинамики пока говорить преждевременно. Главные проблемы обусловлены несопоставимостью природных процессов с их лабораторными моделями по масштабам, условиям и невозможностью однозначно связать наблюдаемые сигналы с характерными деформационно-релаксационными процессами. Спорадичность и непредсказуемость процессов активизации литосферы в совокупности с недоступностью их для контактных исследований приводят к невозможности выделения доминирующих механизмов, необходимых для физического анализа.

Из проведенного анализа следует, что электромагнитные исследования сейсмо-тектонической активности открывают новые подходы к исследованию физического состояния породы в условиях естественного залегания, недоступные для других методов. Предпринятая в настоящей работе первая попытка не претендует на абсолютную достоверность, а скорее показывает направление пути создания электромагнитной диагностики мезомасштабной геодинамики.

## Результаты

1. Проведенный анализ механо-электромагнитных эффектов земной коры позволил выделить связь наведенной поляризации породы с ее деформацией.

2. На основании полученных соотношений для различных эффектов деформация-поляризация сделано их обобщенное аналитическое описание.

3. Показано, что, хотя земная кора является энергонасыщенной структурой, находящейся в критическом состоянии, однако в силу электромагнитных свойств она не является средой, в которой возможна генерация электромагнитных колебаний в низкочастотной области. Вместе с тем земная кора является благоприятной средой для возникновения сейсмо-акустических колебаний.

4. Показано, что механизмы механо-электромагнитных преобразований коры приводят к появлению электромагнитных волн, сопутствующих сейсмо-акустическим возмущениям. Приведены примеры полевых измерений, демонстрирующих эти волны.

5. Проведенное сопоставление параметров деформации коры с параметрами естественного электромагнитного поля Земли показало наличие хорошо выраженной корреляции, проявившейся в формировании кластеров вокруг точек притяжения. Предположительно, что эти точки притяжения определяются физико-петрографическими свойствами породы и параметрами движений в очагах деформации.

6. Выявлены характерные волновые формы электромагнитного излучения, сопутствующего землетрясения. Предположительно, что эти характерные формы также определяются физико-петрографическими свойствами породы в очагах деформации.

## Список литературы

- [1] Садовский М. А., *Электромагнитные предвестники землетрясений*, Наука, М, 1982, 145 с. [Sadovsky M. A., *Electromagnetic Precursors of Earthquakes*, Nauka, Moscow, 1982, 145 pp.]
- [2] Surkov V., Hayakawa M., *Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields*, Springer, Japan, 2014, 486 pp.
- [3] Krumbholz M., *Electromagnetic radiation as a tool to determine actual crustal stress - application and limitation*, Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten der Georg-August-Universität zu Göttingen, Göttingen, 2010, 151 pp.
- [4] Уваров В. Н., “Электромагнитно-деформационные волны земной коры”, *Геофизический журнал*, **38**:6 (2016), 180-185. [Uvarov V. N., “Electromagnetic-deformation waves of the earth’s crust”, *Geophysical Journal*, **38**:6 (2016), 180-185].
- [5] Uvarov V., “Electromagnetic-Deformation Response of the Crust”, *E3S of Conference*, **62**, 03003.
- [6] Уваров В. Н., “Механо-электромагнитные механизмы и электромагнитно-деформационные волны коры”, *Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений*, Сборник тезисов докладов VII международная конференция, с. Паратунка, Камчатский край, 29 августа — 2 сентября 2016 г., ИКИР ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2016, 52. [Uvarov V. N., “Mechano-electromagnetic mechanisms and electromagnetic-deformation waves of the cortex”, *Solar-earth relationships and physics of earthquarters of earthquakes*, Collection of abstracts of reports VII international conference, p. Paratunka, Kamchatka Krai, August 29 - September 2 2016, IKIR FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 2016, 52].
- [7] Уваров В. Н. “Деформационно-электромагнитные механизмы и гибридные волны коры”, *Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений*, Сборник тезисов докладов IX международной конференции. Паратунка. Камчатский край. 17 - 21 октября 2018, 2018, 66. [Uvarov V. N., “Deformation-electromagnetic mechanisms and hybrid waves of the cortex Solar-earth relationships and physics of earthquarters of earthquakes”, A collection of abstracts of the IX international conference. Paratunka Kamchatsky kray. 17 - 21 October 2018, 2018, 66].
- [8] Пархоменко Э. И., *Явления электризации в горных породах*, Наука, М, 1968, 225 pp. [Parkhomenko E. I., *The phenomenon of electrification in rocks*, Nauka, Moscow, 1968, 225 pp.]
- [9] Светов Б. С., Губатенко В. П. “Электромагнитное поле механоэлектрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах: 1. Постановка задачи”, *Физика Земли*, 1999, № 10, 67-73. [Svetov B. S., Gubatenko V. P., “Electromagnetic field of mechanoelectric origin in porous moisture-saturated rocks: 1. Statement of the problem”, *Physics of the Earth*, 1999, № 10, 67-73].
- [10] Скипочка С. И., *Механоэлектрические эффекты в породах и их использование в горной геофизике*, Национальная горная академия Украины, Днепропетровск, 2002, 177 с. [Skipochka S. I., *Mechanoelectric effects in rocks and their use in mining geophysics*, National Mining Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, 2002, 177 pp.]
- [11] Соболев Г. А., Демин В. М., *Механоэлектрические явления в Земле*, Наука, М, 1980, 215 с. [Sobolev G. A., Demin V. M., *Mechanoelectric phenomena in the Earth*, Nauka, Moscow, 1980, 215 pp.]
- [12] Villary E., “Change of magnetization by tension and by electric current”, *Ann. Phys. Chem.*, **126** (1865).
- [13] Jiles D. C., “Theory of the magnetomechanical effect”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **28** (1995), 1537-1546.
- [14] Светов Б. С., “К теоретическому обоснованию сейсмоэлектрического метода геофизической разведки”, *Геофизика*, 2000, № 1, 28-39. [Svetov B. S., “To the theoretical justification of the seismoelectric method of geophysical prospecting”, *Geophysics*, 2000, № 1, 28-39].
- [15] Гульельми А. В., “Проблемы физики геоэлектромагнитных волн”, *Физика Земли*, 2006, № 3, 3-16. [Guglielmi A. V., “Problems of physics of geoelectromagnetic waves”, *Physics of the Earth*, 2006, № 3, 3-16].

- [16] Hadjicontis V., C. Mavromatou C., Antsygina T. N., Chishko K. A., “Mechanism of electromagnetic emission in plastically deformed ionic crystals”, *Phys. Rev. B*, **76**:2 (2007), 024106.
- [17] Шевцова И.Р., “Заряжение дислокации при деформировании кристаллов с ионным типом связи”, *Физика Земли*, 1984, № 4, 106-112. [Shevtsova I.R., “Discharging of dislocations during deformation of crystals with an ionic bond type”, *Physics of the Earth*, 1984, № 4, 106-112].
- [18] Tzanis A., Vallianatos F., “A physical model of electric earthquake precursors due to crack propagation and the motion of charged edge dislocations”, *Seismo Electromagnetics Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*, Terrapub, Tokyo, 2003, 117-130.
- [19] Молоцкий М.И., “Оже-механизм дислокационной экзо-эмиссии”, *Физ. Тверд. тела*, **25**:1 (1983), 121-126. [Molotsky M.I., “Auger mechanism of dislocation exo-emission”, *Phys. Solid. body*, **25**:1 (1983), 121-126].
- [20] St-Laurent F, Derr J.S., Freund F.T., “Earthquake length and the stress-activation of positive hole charge carriers in rocks”, *Physics and chemistry of the earth*, 2006, № 31, 305-312.
- [21] Hayakawa M., Molchanov O.A., “Seismo-electromagnetics as a new field of radiophysics: Electromagnetic phenomena associated with earthquakes”, *Radio Sci. Bull.*, 2007, № 320, 8-17.
- [22] Ланлау Л. Д., Лифшиц Е. М., *Теоретическая физика*, Учебное пособие в 10 т, Теория поля, Наука, М., 1988, 512 с. [Lanlau L. D., Lifshits E. M., *Theoretical physics*, Textbook in 10 tons, Field Theory, Nauka, Moscow, 1988, 512 pp.]
- [23] Larionov I., Malkin E., Uvarov V., “Deformation-Electromagnetic Relations in Lithospheric Activity Manifestations”, *E3S of Conference*, **62** (2018), 03002.
- [24] Ларионов И. А., Малкин Е. И., Уваров В. Н., “Деформационно-электромагнитные связи в проявлениях литосферной активности”, *Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений*, Сборник тезисов докладов IX международной конференции. Паратунка, Камчатский край. 17-21 октября 2018, 2018, 59. [Larionov I. A., Malkin E. I., Uvarov V. N., “Deformation-electromagnetic connections in manifestations of lithospheric activity”, *Solar-earth relationships and physics of earthquakes of earthquakes*, Announcer Abstract of reports of the IX international conference. Paratunka. Kamchatsky kray. 17-21 October 2018, 2018, 59].

## Список литературы (ГОСТ)

- [1] Садовский М. А. Электромагнитные предвестники землетрясений. М: Наука, 1982. 145 с.
- [2] Surkov V., Hayakawa M. Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields. Springer Japan 2014, 486p. DOI 10.1007/978-4-431-54367-1.
- [3] Krumbholz M. Electromagnetic radiation as a tool to determine actual crustal stress - application and limitation. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultaten der Georg-August-Universität zu Göttingen, Göttingen, Januar 2010, 151 p.
- [4] Уваров В. Н. Электромагнитно-деформационные волны земной коры. Геофизический журнал. Т.38. 2016. №6. С.180-185.
- [5] Uvarov V. Electromagnetic-Deformation Response of the Crust. 2018. vol. 62. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186203003>
- [6] Уваров В. Н. Механо-электромагнитные механизмы и электромагнитно-деформационные волны коры // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений. Сборник тезисов докладов VII международной конференции, с. Паратунка, Камчатский край, 29 августа — 2 сентября 2016 г. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2016. С. 52.
- [7] Уваров В. Н. Деформационно-электромагнитные механизмы и гибридные волны коры // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений. Сборник тезисов докладов IX международной конференции. 17 - 21 октября 2018. Паратунка. Камчатский край. 2018. С. 66.

- [8] Пархоменко Э. И. Явления электризации в горных породах. М: Наука, 1968. 225 с.
- [9] 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.
- [10] Скипочка С. И. Механоэлектрические эффекты в породах и их использование в горной геофизике.- Днепропетровск: Национальная горная академия Украины, 2002. 177 с.
- [11] Соболев Г. А., Демин В. М. Механоэлектрические явления в Земле. М: Наука, 1980. 215 с.
- [12] Villary E. Change of magnetization by tension and by electric current // *Ann. Phys. Chem.* 1865. vol. 126, 87.
- [13] Jiles.D.C. Theory of the magnetomechanical effect // *J.Phys. D: Appl. Phys.* 1995. vol. 28. P. 1537-1546.
- [14] Светов Б. С. К теоретическому обоснованию сейсмоэлектрического метода геофизической разведки // *Геофизика*. 2000, №1. С. 28-39.
- [15] Гульельми А.В. Проблемы физики геоэлектромагнитных волн // *Физика Земли*. 2006. №3. С. 3-16.
- [16] Hadjicontis V., C. Mavromatou C., Antsygina T. N., Chishko K. A. Mechanism of electromagnetic emission in plastically deformed ionic crystals // *Phys.Rev.B*. 2007. vol. 76. no. 2. 024106.
- [17] Шевцова И. Р. Заряджение дислокации при деформировании кристаллов с ионным типом связи // *Физика Земли*. 1984. № 4. С. 106-112.
- [18] Tzanis A., Vallianatos F. A physical model of electric earthquake precursors due to crack propagation and the motion of charged edge dislocations. pp. 117-130. in book «Seismo Electromagnetics Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling», Eds. Hayakawa and Molchanov, Tokyo: Terrapub, 2003. 477 p.
- [19] Молоцкий М.И. Оже-механизм дислокационной экзо-эмиссии // *Физ. Тverd. тела*. 1983. Т. 25. № 1. С. 121-126.
- [20] St-Laurent F, Derr J. S., Freund F. T. Earthquake length and the stress-activation of positive hole charge carriers in rocks. *Physics and chemistry of the earth*. 2006. vol. 31. P. 305-312.
- [21] Hayakawa M. Seismo-electromagnetics as a new field of radiophysics: Electromagnetic phenomena associated with earthquakes / M. Hayakawa, O. A. Molchanov // *Radio Sci.Bull*. 2007. № 320. P. 8–17.
- [22] Ланлау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Учебное пособие в 10 Т. Теория поля. М: Наука, 1988. 512 с.
- [23] Larionov L., Malkin E. and Uvarov V. Deformation-Electromagnetic Relations in Lithospheric Activity Manifestations // *E3S of conference*. 2018. Vol. 62. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186203002>.
- [24] Ларионов И.А., Малкин Е.И., Уваров В.Н. Деформационно-электромагнитные связи в проявлениях литосферной активности // *Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений. Сборник тезисов докладов IX международной конференции*. 17 - 21 октября 2018. Паратунка, Камчатский край. 2018. С. 59.

**Для цитирования:** Уваров В.Н., Ларионов И.А., Малкин Е.И. Электромагнитные проявления активной земной коры // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. № 5(25). С. 115-129. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-115-129

**For citation:** Uvarov V.N., Larionov I. A., Malkin E. I. Electromagnetic manifestations of the active crust, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2018, **25**: 5, 115-129. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-115-129

Поступила в редакцию / Original article submitted: 30.11.2018

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-115-129

PACS: 41.20.Jb + 91.10.Kg + 91.30.Px

## **ELECTROMAGNETIC MANIFESTATIONS OF THE ACTIVE CRUST**

**V. N. Uvarov, I. A. Larionov, E. I. Malkin**

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 684034, Russian Federation, Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, Mirnaya str., 7 Russia  
E-mail: uvarovvng@yandex.ru

The geological environment of the earth's crust is considered as a non-equilibrium active open system. It is shown that the rock is a favorable medium for the occurrence of seismic-acoustic oscillations and unfavorable for the occurrence of electromagnetic oscillations in the low-frequency region. It is shown that the analysis of known mechano-electromagnetic mechanisms, explaining the existence of electromagnetic radiation accompanying earthquakes, is deformation-induced dipole radiation, the intensity of which is determined by both the nature of the movements and the electrophysical properties of the rock. An analysis of two-dimensional histograms of crustal deformations and natural electromagnetic radiation made it possible to identify several clusters corresponding to stable conditions of mechano-electromagnetic transformations, which can be explained by the nature of mechano-electromagnetic properties of the rock in the deformation sites. A joint analysis of the catalog of earthquakes and electromagnetic radiation signals made it possible to isolate electromagnetic signals of lithospheric origin.

*Key words: seismoelectromagnetism, crust electromagnetic radiation, natural electromagnetic field of ELF-VLF range, seismic activity, rock electromagnetic and mechanic properties, lithosphere electrodynamics*

© Uvarov V. N., Larionov I. A., Malkin E. I., 2018