

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-22-2-112-127

УДК 551.594.6 + 621.391.821

## **ХАРАКТЕРНЫЕ ФОРМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ**

**В. Н. Уваров**

Институт космических исследований и распространения радиоволн (ИКИР)  
ДВО РАН, 684034, с.Паратунка, Камчатский край

E-mail: uvarovvng@yandex.ru

Выделены неизвестные ранее простейшие повторяющиеся волновые формы электрической компоненты электромагнитного поля СНЧ-ОНЧ диапазона (паттерны), приуроченные к землетрясениям. Проведен анализ условий возникновения и распространения акустического и электромагнитного излучения и литосферных механизмов акустоэлектромагнитного преобразования. Сделаны выводы о конверсии акустического излучения в электромагнитное характере литосферных движений, сопутствующих простейшим волновым формам. Эти паттерны сопоставлены с простейшими видами деформационных движений деформируемого твердого тела.

*Ключевые слова: сейсмоэлектромагнетизм, электродинамика литосферы, электромагнитное проявление землетрясений, распространение радиоволн, естественное электромагнитное поле Земли, электромагнитное излучение литосферы, электрогидродинамика*

© Уваров В. Н., 2018

## Введение

Электромагнитные проявления динамики литосферы, сопутствующие землетрясениям, известны достаточно давно [1] и являются одной из наиболее интригующих и пока не до конца изученных проблем геофизики. В ее основе лежит электромагнитная природа формообразования твердых тел, в том числе и горной породы, которая приводит к неизбежной связи между деформационными процессами и электромагнитным излучением - существованию так называемых механо-электромагнитных механизмов. 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 [2,3,4]. Часть из них привлекалась для интерпретации лабораторных экспериментов.

Представления о электромагнитных проявлениях динамики литосферы, приуроченных к землетрясениям, достаточно широко обсуждается в научной литературе. В результате к настоящему времени установилось понятие «сейсмоэлектромагнетизм» как область радиофизики природных сред [5].

Однако несмотря принципиальную ясность физических основ этого феномена о его практическом использовании пока говорить преждевременно. Главные проблемы связаны с несопоставимостью природных процессов с их лабораторными моделями из-за масштабности и разнообразия условий протекания литосферных процессов [6]. А спорадичность и непредсказуемость процессов активизации литосферы в совокупности с недоступностью их для контактных исследований приводят к невозможности установления статистических связей и выделения доминирующих механизмов, необходимых для физического анализа. Все это приводит к недостаточной обоснованности использования электромагнитных измерений поля для интерпретации динамики земной коры [7,8]. Тем не менее неявно задача разработки методов диагностики геодинамического состояния коры присутствует во всех исследованиях сейсмоэлектромагнетизма. Подтверждением этому являются публикации, направленные на разработку нового подхода в дистанционном зондировании - диагностики геодинамического состояния по электромагнитному отклику [3,9].

Как известно, исследование любого феномена сводится к построению его модели - совокупности доминирующих закономерностей, выраженных в той или иной форме: аналитического выражения, ассоциативного, диаграмно-графического, словесного описания и т.д. В случае феномена обладающего большим разнообразием проявлений прямое построение модели оказывается осложнено большим числом параметров. Упрощение задачи построения модели достигается путем разбиения исследуемого явления на классы и подклассы, позволяющие построить более простые модели. Последующее построение полной модели достигается путем объединения и обобщения этих простых моделей.

При исследовании электромагнитных проявлений геодинамических процессов приходится иметь дело с достаточно сложным феноменом. Поэтому естественным первым этапом исследования этого явления является классификация. Построение модели в этом случае сводится к ассоциации простейшей формы электромагнитного сигнала с элементарными формами деформационных движений на основе законов электродинамики. В данной работе предпринята попытка выделить в естественном электромагнитном поле Земли компоненты сигналов, являющиеся

электромагнитным проявлением динамики литосферы, расклассифицировать простейшие формы этих сигналов и сопоставить им простейшие виды элементарных деформационных движений. Следует отметить, что большинство исследований, связанных с электромагнитным излучением литосферы [например, 10,11] основаны на анализе отдельных эпизодов, не позволяющих выделить систематический характер свойств электромагнитного проявления землетрясений от случайной составляющей. В настоящей работе предпринята попытка заполнить этот пробел.

## Структура естественное электромагнитное поле

Электромагнитное поле над поверхностью Земли представляет собой смесь электромагнитных полей различного происхождения. Сигналы естественного электромагнитного поля СНЧ-ОНЧ диапазона атмосферно-грозового и ионосферно-магнитосферного происхождения изучаются уже около 100 лет, формы их достаточно хорошо изучены и потому они легко идентифицируются. Его наиболее мощная компонента в нормальных условиях обусловлена атмосферно-грозовой активностью - это в основном атмосферерики - сигналы от удаленных молний, возникающих в приэкваториальных областях - так называемых центрах мировой грозовой активности. Частота появления этих разрядов от 50 до 300 разрядов в секунду длительность  $5 \div 20$  мс. Максимальная амплитуда напряженности поля в средних широтах может достигать долей и даже единиц в/м. На рисунке 1 пример динамического спектра электромагнитного поля, на котором атмосферерики выглядят в виде тонких вертикальных линий.

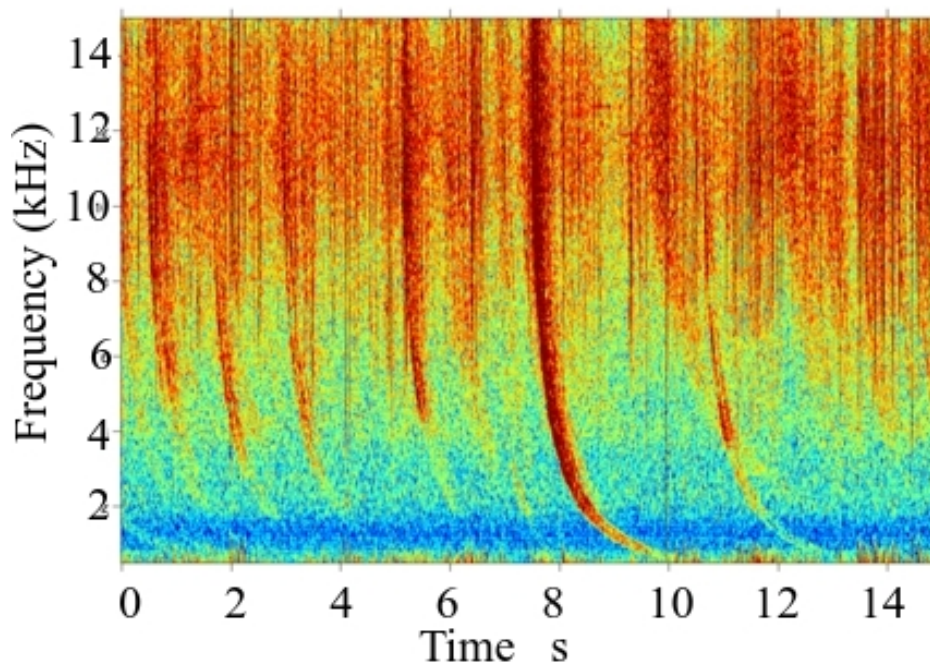


Рис. 1. Динамический спектр естественного электромагнитного излучения, содержащий атмосферерики и вистлеры.

Компонента магнитосферно-ионосферного происхождения содержит сигналы удаленных молний, модифицированные в результате распространения в ионосфере, или возникшие под влиянием потоков плазмы, выброшенной Солнцем. Она

представлена достаточно широким набором сигналов (вистлеры, твики, хоры, шипения), которая особенно сильно проявляется во время магнитных бурь [12]. Рисунок 1 прекрасно демонстрирует динамические спектры вистлеров (свистящих атмосфериков) имеющие саблевидную форму длительностью около 2 секунд - это модифицированные в результате прохождения через магнитосферу сигналы мощных молниевых разрядов, пришедшие из магнитосопряженных точек по магнитной трубке глобального геомагнитного поля через магнитосферу.

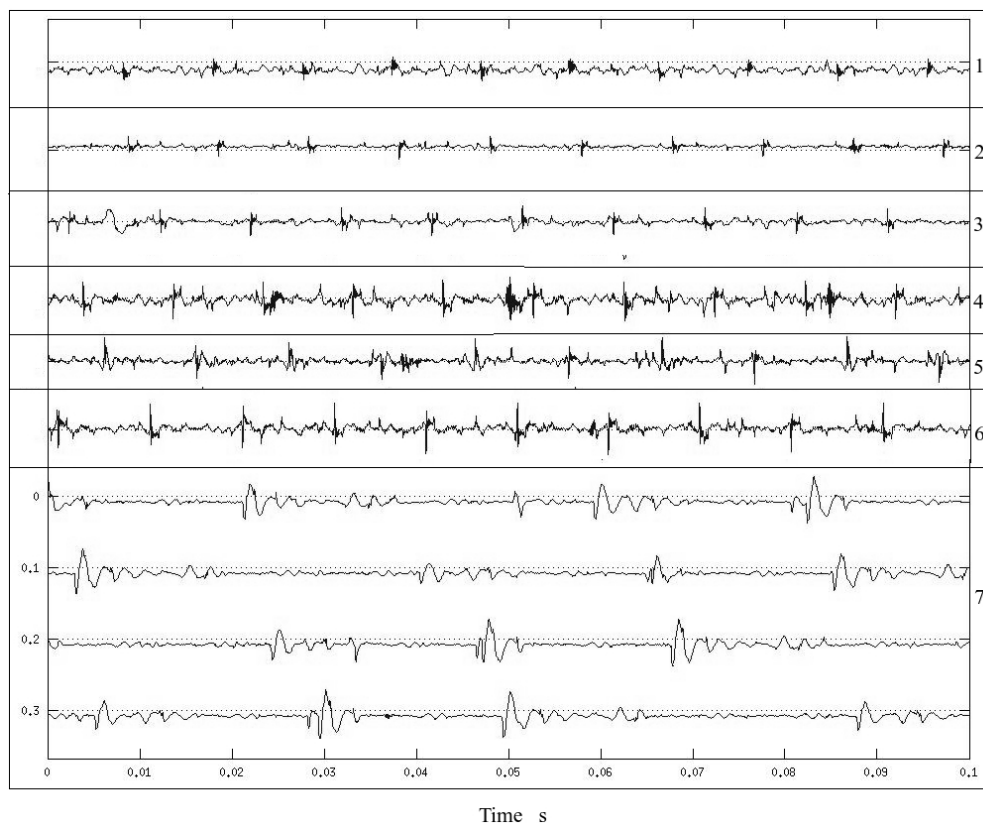


Рис. 2. Примеры техногенных сигналов

Связанное с технической деятельностью человека электромагнитное излучение особенно существенно в диапазоне промышленных частот в местах с высокой плотностью населения и развитой промышленностью. На рисунке 2 приведены примеры сигналов техногенного происхождения, связанные с силовой сетью. Видно, что информационным признаком сигналов силовой сети является кратность (как это видно в окнах 1 - 6)) или дробность (как это видно в окне 7) их частоты основной частоте силовой сети.

Радиолокационная, связная и вещательная активность в основном осуществляется на частотах значительно превышающих частоты УНЧ-КНЧ диапазона и потому в случае нормальных значений этих полей малозаметна в этом диапазоне. Однако в этот диапазон может попадать излучение на комбинационных частотах этих излучателей, возникшее в результате нелинейного взаимодействия и переизлучения ионосферой [13]. Однако это излучение достаточно слабо, имеет хорошо выраженный периодический характер и потому его легко идентифицировать.

Литосферная компонента, свойствам которой посвящено последующее изложение, существенна для районов повышенной сейсмической активности. Вследствие

непредсказуемости места и времени сейсмических явлений, подавляющее число исследований электромагнитных проявлений этого феномена проводилось вдали от источников излучения - в удобных для проведения измерений областях. Обычно это геофизические обсерватории или станции наблюдения. Характер волновых форм и спектров этих сигналов до настоящего времени был не изучен. В настоящей работе представлены первые результаты классификации выделенных сигналов литосферного происхождения.

Характер электромагнитного излучения, его спектрально-временные, поляризационные и ориентационные свойства определяется характером, дислокацией источника и условиями распространения излучения до регистратора.

Для обычно доминирующей атмосферно-грозовой компоненты решающее значение имеет то обстоятельство, что для волн СНЧ-ОНЧ диапазона проводящая поверхность Земли и ионосфера формируют полость, обладающую волноводными условиями для субгоризонтальных мод излучения. Критическая длина волны этого волновода равна удвоенной высоте ионосферы. Естественно, это обстоятельство осложняется наличием структуры ионосферы [14,15].

Те же условия формируют плоский открытый малодобротный региональный резонатор для субвертикальных мод. Горизонтальный радиус когерентности излучения в этом резонаторе порядка длины волны. Электромагнитное излучение литосферы, вышедшее в атмосферу, в зависимости от угла выхода распространяется в волноводе или оказывается захвачено региональным резонатором.

В волноводе для субгоризонтальных мод доминирующим является поле излучения молний вблизи экватора. Для субвертикальных мод регионального резонатора условия исследования литосферного излучения более благоприятны, поскольку излучение грозового происхождения оказывается сильно ослабленным.

Для распространяющегося в земной коре электромагнитного излучения потери значительны и могут измеряться единицами - десятками дБ/м [16]. Поэтому оказывается возможным регистрировать непосредственно литосферные сигналы только от ближайших литосферных источников, расстояние до которых измеряется десятками-сотнями метров, что значительно меньше длины волны [17]. Эти же обстоятельства приводят к необходимости проводить исследование сигналов литосферного происхождения в сейсмически активных районах.

В атмосфере потери излучения на несколько порядков меньше. Поэтому наблюдение литосферного излучения в атмосфере оказывается гораздо более эффективным. Однако в процессе распространения через границу кора-атмосфера происходит усреднение по территории в области выхода и распространения по пути с неизвестными свойствами. Это обстоятельство меняет параметры излучения и вносит неопределенность в определение свойств и параметров источников.

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, особенно при регистрации в местах с повышенной сейсмичностью и хорошей электромагнитной экологией.

В настоящей работе представлена классификация наиболее характерных форм сигналов электрической компоненты и сделана попытка связать типичные формопроявления электромагнитного сигнала с характером литосферных движений.

В процессе исследований выяснилось, что основные отклики на сейсмические события несет вертикальная электрическая компонента электромагнитного

излучения. Это свидетельствует о расположении источников в волновой зоне регистратора ( $\lambda > r$ ) и является подтверждением литосферного происхождения исследуемых сигналов. Это обстоятельство позволило сосредоточить основное внимание изложения на анализе вертикальной электрической компоненты.

## Характерные формы аномальных сигналов

**Характеристики регистратора и рабочая гипотеза** Для выделения статистически значимых характерных форм сигналов литосферного происхождения использовались архивные данные наблюдения ОНЧ-СНЧ излучения 2013 г, проводимого на станции геофизических наблюдений "Карымшина" ИКИР ДВО РАН ( $52.82^{\circ}N, 158.13^{\circ}E$ ), расположенной в области пересечения региональных разломов Малко-Петропавловской зоны поперечной дислокации северо-западной ориентировки в Паратунской раздвиговой зоне у подножия экстрезивного купола сопки Горячая. Эта территория характеризуется низким уровнем промышленных помех и высокой микросейсмичностью. Регистрация осуществлялась с помощью цифровой многоканальной системы с чувствительностью не хуже  $2 \cdot 10^{-7} (nT/Hz^{1/2})$  по магнитной компоненте и  $6 \cdot 10^{-8} (V/m Hz^{1/2})$  по электрической. Частоты дискретизации - 48 кГц и 44.1 кГц. В качестве источника сейсмических данных использовался каталог землетрясений Камчатского филиала геофизической службы РАН, который в 2013 г содержал 3112 события.

Рабочей гипотезой служило предположение о том, что излучение является откликом активизации литосферных процессов, а необходимым условием сейсмического проявления этой активизации является землетрясение. Отсюда следует, что землетрясение является индикатором повышенной сейсмической активности, однако не всегда повышенная сейсмическая активность приводит к землетрясению.

**Характерные формы сигналов.** Настоящее исследование ограничено интервалом электромагнитных данных  $\pm 15$  минут в окрестности момента землетрясения. В результате визуального анализа волновых форм электромагнитных проявлений землетрясений 2013 года, обеспеченных электромагнитными данными (1201 событие) удалось выделить 8 типичных ситуаций. В этих ситуациях обнаружено 5 типов регулярно повторяющихся форм электромагнитных сигналов. В ряде случаев каждый тип формы был представлен несколькими сходными паттернами.

На рисунке 3 приведены примеры ситуаций электромагнитного излучения, сопутствующего землетрясениям.

В окне 1 рисунка 3 приведен фрагмент электромагнитного излучения в момент землетрясения. Здесь видны характерные всплески отдельных атмосфериков разной амплитуды, значительно превышающей уровень фона, но отсутствуют какие-либо иные аномалии. Волновые формы атмосфериков имеют вид, характерный для естественного невозмущенного поля. Судя по их амплитудам и форме хвостов эти всплески являются проявлением достаточно удаленных молниевых разрядов (spher-ic). Длительность этих атмосфериков -  $10 \div 30$  мсек. Следует отметить, что частота появления атмосфериков в интервалы времени, приуроченные к землетрясениям, существенно ниже, чем в периоды сейсмического затишья. Отсюда можно сделать вывод, что повышение активности литосферы может приводить к ухудшению условий

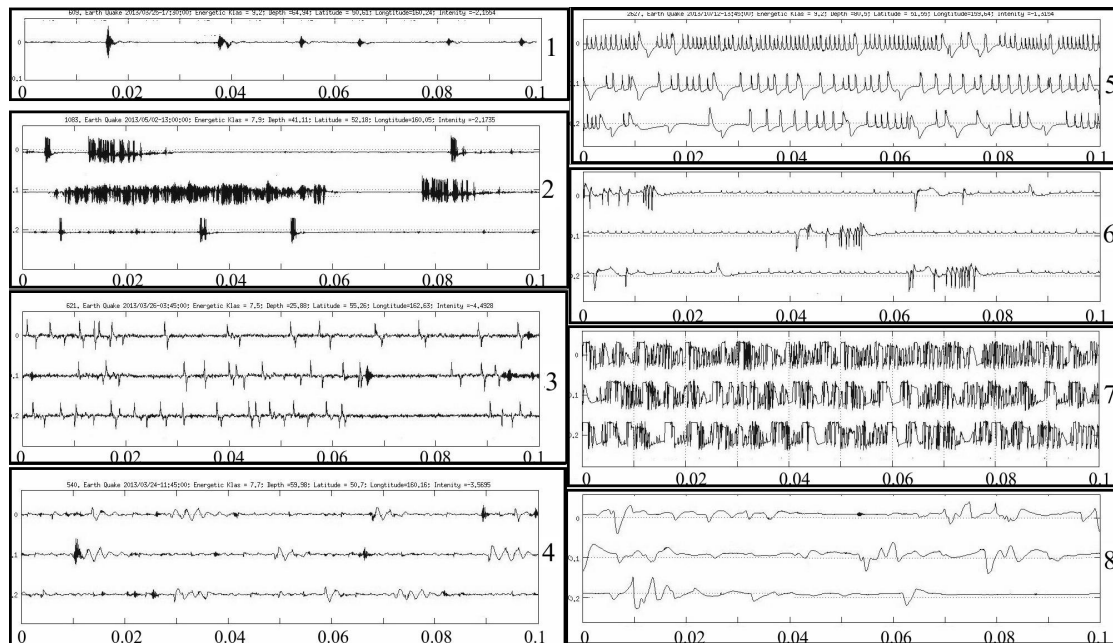


Рис. 3. Типичные электромагнитные ситуации в окрестности землетрясений: 1 — отсутствие электромагнитных проявлений; 2 — высокоамплитудные хаотичные; 3 - однополярные импульсы; 4 — ударные 12, 5 Гц; 5 — релаксационно-ударные ; 6 — сложные ; 7 — медленные высокоамплитудные. По горизонтальной оси - время в секундах.

распространения атмосфериков, однако не всегда сопровождается появлением характерного излучения.

На фрагменте 2 рисунка 3 приведен пример высокоамплитудных всплесков, формирующих цуги высокочастотны колебаний длительностью  $0.001 \div 0.1$  с частотой около 8 кГц. Видно, что значительная часть выбросов имеет почти равную высоту, формируя столообразную огибающую. Это свидетельствует о нештатном режиме работы приемной аппаратуры - возникновению резонансных колебаний. Такой режим возможен при амплитуде входного сигнала значительно превышающей допустимое динамическим диапазоном регистратора. Иными словами, наблюдается аномально высокий уровень входного сигнала, на который приемная аппаратура не в состоянии адекватно реагировать.

На фрагменте 3 рисунка 3 приведен пример хаотически следующих однополярных импульсов по величине сравнимых или превосходящих по амплитуде атмосферики. В большинстве случаев импульс одной полярности сменяется импульсом противоположной полярности. Следует отметить, что наблюдаемые однополярные импульсы обладают высокой стабильностью формы и амплитуды. Более детально форма однополярного импульса приведена в окне 3 рисунка 4. Общая длительность импульса около 0.5 мсек. Длительность крутого переднего фронта в  $3 \div 5$  раз меньше заднего. Форма импульса сильно напоминает аperiодические колебания низкодобротного осциллятора с импульсным возбуждением, что характерно для переходных релаксационных процессов. К числу таких процессов, характерных для деформационных процессов коры, относится прерывистое скольжение (stick slip motion), возникающее при сухом трении.

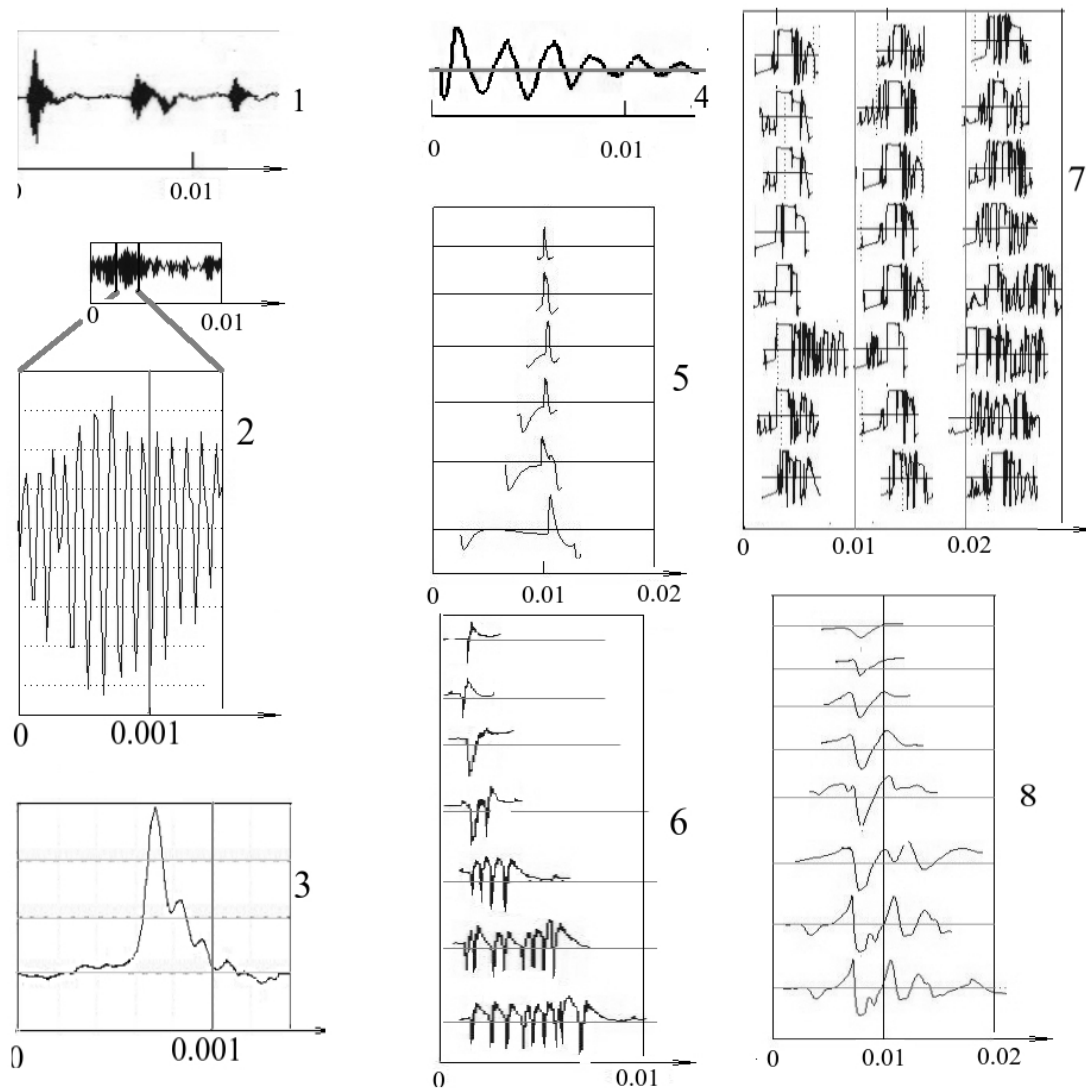


Рис. 4. Различные формы простейших фрагментов волновых форм и их вариации. По горизонтальной оси - время в секундах. Нумерация окон соответствует нумерации фрагментов на рисунке 1. 1 - атмосферерики; 2 - высокочастотные хаотичные. Врезка демонстрирует их заполнение; 3 - однополярный импульс; 4 - затухающая последовательность колебаний; 5 - вариации простейших формы последовательности колебаний типа 5 ; 6 - вариации простейших форм колебаний типа 6 ; 7 - вариации форм колебаний типа 7 ; 8 - вариации низкочастотных форм.

На фрагменте 4 рисунка 3 приведен пример сигнала, представленного единственной формой. Как видно на детальном графике этого паттерна (рисунок 4 окно 4 ) он содержит одну форму затухающих колебаний низкой частоты (около 500 Гц). При общей длительности цуга около 10 мсек этот паттерн обычно содержит около 6 периодов затухающих колебаний. Наличие этих колебаний позволяет оценить добротность колебаний ( $Q \approx \pi N$ , где  $N$  - число колебаний за время релаксации). В нашем случае  $N = 6$ , следовательно, добротность резонатора  $Q \approx 20$ . Серия всегда начинается крутым фронтом ударного характера, при котором амплитуда достигает максимального значения. Расстояние между цугами в диапазоне  $0.1 \div 0.2$



с. Частота следования цугов 12,5 Гц - четвертая часть промышленной частоты 50 Гц. Это обстоятельство позволяет отнести этот вид волновых форм к техногенным или комбинации техногенного с литосферно-индуцированным.

На фрагменте 5 рисунка 3 приведен пример последовательности хорошо выраженных колебаний с амплитудой превышающей амплитуду атмосфериков. Период этих колебаний меняется в пределах  $1 \div 50$  мс, положительный и отрицательный полупериоды несимметричны. Колебания не имеют устойчивой формы, содержат как резкие фронты, так и медленные изменения. Общая длительность последовательности таких колебаний может достигать нескольких секунд. Семейство паттернов этого вида сигналов представлено в окне 5 рисунка 4. Они формируют последовательности периодических импульсов с меняющимся периодом повторения, но постоянной амплитудой и формой центрального пика. Размер крыльев и соотношение переднего и заднего крыла меняется. Крыло, предшествующее центральному пику, обычно длиннее заднего крыла в  $2 \div 3$  раза. Передний фронт центрального импульса в  $2 \div 3$  раза круче заднего. Импульсы данной формы встречаются большими сериями с меняющимся периодом следования и формы.

На фрагменте 6 рисунка 3 представлен пример электромагнитного проявления в виде цуга несимметричных колебаний меняющейся длительности периода (clacks, дребезг) и числа импульсов в одном цуге. В окне 6 рисунка 4 представлено семейство соответствующее семейство паттернов. Длительность отдельного импульса около 0.5 миллисекунды.

Фрагмент 7 рисунка 3 демонстрирует последовательность хаотически чередующихся импульсов разной амплитуды и длительности с регулярно возникающими максимумами, значительно превышающими предельное значение динамического диапазона регистрирующей аппаратуры. Это обстоятельство проявляется в виде появления плоской вершины соответствующего импульса. В окне 7 рисунка 4 представлено соответствующее этому виду сигналов семейство паттернов. Они имеют сложную форму (sасорhоnу), включают как высокочастотные высокоамплитудные импульсы, так и медленные изменения. Длительность этих сигналов лежит в диапазоне  $0.05 \div 0.01$  секунды. Вероятно, наблюдаемые проявления связаны с сильной перегрузкой входного тракта антенного усилителя мощным низкочастотным сигналом.

Во фрагменте 8 рисунка 3 представлены низкочастотные колебания меняющейся формы. Длительность этих сигналов лежит в диапазоне  $0.25 \div 20$  мсек. Окно 8 рисунка 4 содержит соответствующее семейство паттернов.

Анализ разных видов волновых форм сигналов позволил сделать следующие заключения.

1. Большинство волновых форм характеризуются наличием высокоамплитудных кратковременных импульсов.

2. Передний фронт таких импульсов всегда в  $2 \div 3$  раза короче заднего и, повидимому, не превосходит минимальное время разрешения регистрирующего устройства ( $0.5 \cdot 10^{-4}$  с).

3. Длительность простейшей повторяющейся формы варьируется в пределах ( $3 \cdot 10^{-4} \div 10^{-2}$  с).

## Кора как преобразователь тектонической энергии

Может ли горная порода быть генератором колебаний? Это главный вопрос, на который необходимо ответить, прежде чем пытаться интерпретировать полученные результаты.

Для любого генератора колебаний необходимо наличие следующих компонент:

1. емкости для запаса потенциальной энергии, используемой при преобразовании в кинетическую энергию колебаний;
2. блока управления процессом преобразования потенциальной энергии в энергию колебаний;
3. цепи положительной обратной связи, связывающей выход генератора с блоком управления.

Для спектра генерируемых частот должно выполняться основное релаксационное условие генерации, заключающееся в том, что характерное время существования запаса энергии (характерное время релаксации возбужденного состояния, саморазряда аккумулятора)  $\tau$  должно быть значительно больше характерного периода возбуждаемых колебаний  $T$ :  $\tau \gg T$ .

Горная порода представляет собой конгломерат породообразующих минералов в различных фазовых состояниях, кристаллическая матрица которых способна накапливать потенциальную энергию механических напряжений. Уменьшение сопротивления деформации деформации горной породы при возрастании ее скорости (характерное для сухого трения твердых тел и вязкости тиксотропных жидкостей [18,19]) представляет собой достаточно эффективный механизм положительной параметрической обратной связью. Этот механизм подтверждается многочисленными лабораторными экспериментами и является главным в объяснении механики землетрясений [20, 21, 22]. Отсюда ясно, что горная порода является благоприятной средой для релаксационной генерации акустических колебаний.

Иная ситуация имеет место для электромагнитных колебаний. Здесь следует обратить внимание на релаксационные характеристики. Применительно к электромагнитным колебаниям это означает, что характерное время релаксации заряда в горной породе, возникающее под действием деформации ( $\tau \approx \epsilon \cdot \rho$ ), должно быть существенно больше периода возбуждаемых колебаний  $T$ :  $\tau \gg T$ .

Для типичных значений удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости земной коры ( $1 < \rho < 10^4$  ( $\Omega \cdot m$ ),  $5 < \epsilon < 20$ ) получаем, что это характерное время  $\tau < 10^{-6}$  с. Иными словами, горная порода может служить емкостью заряда только для колебаний, частота которых лежит в выше мегагерцового диапазона. Отсутствие механизма управления и положительной обратной связи дополнительно усугубляют возможность генерации. Все это позволяет утверждать, что генерация электромагнитного излучения в горной породе в диапазоне  $1 < f < 10^6$  Гц невозможна.

В то же время наблюдается достаточно интенсивное электромагнитное излучение, сопутствующее землетрясениям [1,6]. Поэтому для понимания физики этого явления необходимо по новому проанализировать процессы преобразования механических возмущений в электромагнитные.

Для объяснения наблюдаемых сейсмоэлектромагнитных явлений предложен ряд механоэлектромагнитных механизмов преобразования механической энергии в электромагнитную: дислокационные течения в кристаллах породообразующих минералов, активизация подвижных носителей заряда, пьезоэлектрический,

пьезомагнитный, электрокинетический, трибоэлектрический, индуктивный, инерционный, сейсмомагнитный и другие эффекты [9 — 14]. Как следует из общего названия этих эффектов — они суть электромагнитные проявления изменения дипольного момента вещества под влиянием механических воздействий, проявляющиеся в зависимости от петрографической обстановки в виде того или иного эффекта. Мощность возникающего при этом излучения дается соотношением Лармора [23 ]

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

Здесь  $\vec{P} = Q \cdot \vec{l}$  - эффективные значения дипольного момента, заряда и базы диполя.  $c$  - скорость света соответственно.

Иными словами, преобразование механических возмущений при деформационной релаксации тектонических напряжений горными породами, обладающими механоэлектромагнитными механизмами, порождает электромагнитное излучение, отражающее процесс тектонической перестройки коры.

## Анализ данных

Большинство выделенных паттернов (типа 3, 4, 5, 6, 7) характеризуются наличием высокоамплитудных всплесков с крутым передним фронтом длительностью меньше периода дискретизации ( $\Delta t \lesssim 5 \cdot 10^{-5} c$ ). Можно предположить, что этот всплеск спровоцирован срывом стопора. Последующая картина определяется механическими свойствами горной породы в окрестности активизированного стопора.

Срыв стопора приводит к релаксационному деформированию, изменению компенсирующей конфигурации избыточных зарядов и возникновению электромагнитного излучения. Из-за малой величины характерного времени релаксации заряда в среде ( $\tau \lesssim 10^{-6} c$ ) изменение конфигурации компенсирующих зарядов полностью контролируется скоростью деформирования, меньшей скорости звука. Если следовать Гриффитсу, то эта скорость  $\sim 0.4$  скорости звука в среде. Отсюда получаем размер области релаксации (трещины) как  $\delta l \approx \Delta t \cdot c \approx 0.1 m$ .

Значительную амплитуду импульса можно объяснить коллективными эффектами, заключающимися в том, что деформация осуществляется когерентно в достаточно большом объеме. При  $\delta t \approx 0.1 m$  такая деформация может быть осуществлена в случае, если область когерентного сдвига имеет большую протяженность в направлении, перпендикулярном направлению сдвига.

Паттерн типа 3 представляет однополярный всплеск по форме похожий на движение апериодического осциллятора, возникшего под воздействием ударного импульса.

Передний фронт имеет длительность  $\Delta t \lesssim 10^{-4} c$ . Поскольку задний фронт имеет гораздо большую длительностью ( $\approx 3 \cdot 10^{-4} c$ ), чем характерной время релаксации заряда в среде ( $\tau < 10^{-6} c$ ), его форму можно ассоциировать с релаксацией апериодического осциллятора. Можно сказать, что в данном случае имеет место низкодобротная среда и скорость нарастания напряжений значительно меньше скорости релаксации. Механическим аналогом является сухое трение когда характерное время накопления напряжения до порога срыва значительно превышает характерное время релаксации.

Паттерн типа 4 напоминает процесс затухания колебаний осциллятора умеренной добротности ( $Q \approx 20$ ), возбужденного ударным импульсом. Иными словами, срыв стопора происходил в среде с малым затуханием. Причем частота инициирующего импульса синхронизирована с частотой силовой сети.

Паттерны типа 5 и 6 можно рассматривать как смесь движений - ползучести (вязкого трения) с сухим трением. В этом случае с увеличением мощности потока тектонических напряжений будет происходить увеличение частоты срывов стопоров, что можно наблюдать в окнах 5 и 6 рисунка 1.

Паттерны типа 8 очень напоминают неустойчивое движение тиксотропной вязкой среды под влиянием меняющихся напряжений. Его можно ассоциировать с асейсмическим крипом [24].

## Выводы

1. В коре имеются условия для возникновения акустической генерации: накопления потенциальной энергии и наличие параметрической положительной обратной связи. Присутствие разнообразных механоэлектромагнитных механизмов преобразования создают благоприятные условия для преобразования акустических колебаний в электромагнитные.

2. Возникающие в коре акустические релаксационные колебания преобразуются в электромагнитные колебания, выходят в атмосферу и далее распространяются в атмосфере.

3. Поскольку момент регистрации представленных волновых форм находится в непосредственной окрестности момента землетрясения и эти волновые формы не соответствуют известным волновым формам сигналов атмосферно-грозового, магнитосферно-ионосферного или техногенного происхождения, с большой долей правдоподобия можно утверждать, что они имеют литосферное происхождение.

4. Все найденные стабильные простейшие волновые формы (паттерны) можно разделить на два основных типа — короткие импульсы, соответствующие срыву стопоров с малым проскальзыванием, и низкочастотные, соответствующие пульсирующим течениям.

5. Частота следования импульсов при осциляциях типа 3, 4, 5 и 6 является мерилем мощности потока тектонических напряжений - повышение этой частоты свидетельствует о возрастании тектонической активности.

6. Электромагнитное излучение литосферы отражает ее динамику.

## Список литературы

- [1] Садовский М. А., *Электромагнитные предвестники землетрясений*, Наука, 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] 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.
- [6] Уваров В. Н., “Электромагнитное проявление литосферы с СНЧ-ОНЧ диапазоне”, *Геофизический журнал*, **34**:6 (2012), 133–146. [Uvarov V. N., “Electromagnetic manifestation of the lithosphere with a VLF-LF range”, *Geophysical Journal*, **34**:6 (2012), 133–146].
- [7] Krumbholz M., Bock M., Burchardt S., Kelka U., Vollbrecht A., “A critical discussion of the electromagnetic radiation (EMR) method to determine stress orientations within the crust”, *Solid Earth*, **3** (2012), 401–414.
- [8] Hayakawa M., *Earthquake prediction with radio technique*, John Wiley, Singapore, 2015, 296 pp.
- [9] Mullayarov V. A., Druzhin G. I., Argunov V. V., Abzaletdinova L. M., Melnikov A. N., “Variations of VLF radio signals and atmospheric during the deep earthquake with  $M = 8.2$  occurred on 24 May 2013 near Kamchatka peninsula”, *Natural Science*, **6**:3(2014) (2014), 43242.
- [10] Дружин Г. И., “Опыт прогноза камчатских землетрясений на основе наблюдения за электромагнитным ОНЧ излучением”, *Вулканология и сейсмология*, 2002, № 6, 51–62. [Druzhin G. I., “Experience in forecasting Kamchatka earthquakes based on observation of electromagnetic VLF radiation”, *Volcanology and seismology*, 2002, № 6, 51–62].
- [11] Молчанов О. А., *Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме*, Наука, М., 1985, 223 с. [Molchanov O. A., *Low-frequency waves and induced radiation in near-earth plasma*, Science, Moscow, 1985, 223 pp.]
- [12] Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я., *Волновые явления в ионосферной и космической плазме*, Наука, М., 1984, 392 с. [Gershman B. N., Erukhimov L. M., Yashin Y. Ya., *Wave phenomena in ionospheric and cosmic plasma*, Science, Moscow, 1984, 392 pp.]
- [13] Альперт Я. Л., Гусева Э. Г., Флигель Д. С., *Распространение низкочастотных электромагнитных волн в волноводе Земля-ионосфера*, Наука, М., 1967, 124 с. [Alpert Ya. L., Guseva E. G., Fligel D. S., *Propagation of low-frequency electromagnetic waves in the Earth-ionosphere waveguide*, Science, Moscow, 1967, 124 pp.]
- [14] Долуханов М. П., *Распространение радиоволн*, Связь, М., 1972, 336 с. [Dolukhanov M. P., *Propagation of radio waves*, Communications, Moscow, 1972, 336 pp.]
- [15] Тархова А. Г., *Электроразведка. Справочник геофизика*, Недра, М., 1980, 518 с. [Tarkhova A. G., *Electrical Exploration. Handbook of geophysics*, Nedra, Moscow, 1980, 518 pp.]
- [16] Уваров В. Н., Дружин Г. И., Санников Д. В., “Электромагнитное излучение литосферного происхождения: метод обнаружения и первые результаты”, *Приборы и техника эксперимента*, 2010, № 6, 131–137. [Uvarov V. N., Druzhin G. I., Sannikov D. V., “Electromagnetic radiation of lithospheric origin: the method of detection and the first results”, *Devices and technics of the experiment*, 2010, № 6, 131–137].
- [17] Андронов В. В., Журавлев В. Ф., 2010, 184 с. [Andronov V. V., Zhuravlev V. F., 2010, 184 pp.]
- [18] Хасанов М. М., Булгакова Г. Т., *Нелинейные и неравновесные эффекты в реологически сложных средах*, Институт компьютерных исследований, Москва-Ижевск, 2003, 288 с. [Khasanov M. M., Bulgakova G. T., *Nonlinear and nonequilibrium effects in reologicheskies complex environments*, Institute of computer science, Moscow-Izhevsk, 2003, 288 pp.]
- [19] Соболев Г. А., Пономарев А. В., *Физика землетрясений и предвестники*, Наука, М., 2003, 270 с. [Sobolev G., Ponomarev A., *Earthquake physics and precursors*, Nauka, Moscow, 2003, 270 pp.]
- [20] Райс Дж., *Механика очага землетрясения*, Мир, М., 1982, 217 с. [Rajs Dzh., *Mekhhanika ochaga zemletryaseniya*, Mir, M., 1982, 217 pp.]
- [21] Аки К., Ричардс П., *Количественная сейсмология. Теория и методы*, Мир, М., 1982. [Aki R., Ricards P., *Quantitative seismology. Theory and methods.*, Mir, Moscow, 1982].

- [22] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., *Теоретическая физика. Теория поля*, Наука, М., 1988, 512 с. [Landau L. D., Lifshitz E. M., *Theoretical physics. Field theory*, Nauka, M., 1988, 512 pp.]
- [23] Kocharyan G. G., Kishkina S. B., Novikov V. A., Ostapchuk A. A., "Slow slip events: parameters, conditions of occurrence, and future research prospects", *Geodynamics & Tectonophysics*, **5(4)** (2014), 863–891.

## 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. Japan: Springer, 2014. 486 с.
- [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, 2010. 151 с.
- [4] Уваров В. Н. Электромагнитно-деформационные волны земной коры // Геофизический журнал. 2016. Т. 38. №6. С. 180-185
- [5] Hayakawa M., Molchanov O. A. Seismo-electromagnetics as a new field of radiophysics: Electromagnetic phenomena associated with earthquakes // Radio Sci. Bull. 2007. №320. С. 8–17
- [6] Уваров В. Н. Электромагнитное проявление литосферы с СНЧ-ОНЧ диапазоне // Геофизический журнал. 2012. Т. 34. №6. С. 133–146
- [7] Krumbholz M., Bock M., Burchardt S., Kelka U., Vollbrecht A. A critical discussion of the electromagnetic radiation (EMR) method to determine stress orientations within the crust // Solid Earth. 2012. vol. 3. p. 401-414
- [8] Hayakawa M. Earthquake prediction with radio technique. Singapore: John Wiley, 2015. 296 p.
- [9] Mullayarov V. A., Druzhin G. I., Argunov V. V., Abzaletdinova L. M., Melnikov A., N. Variations of VLF radio signals and atmospherics during the deep earthquake with  $M = 8.2$  occurred on 24 May 2013 near Kamchatka peninsula // Natural Science. 2014. vol. 6. no. 3(2014). ID 43242
- [10] Дружин Г. И. Опыт прогноза камчатских землетрясений на основе наблюдения за электромагнитным ОНЧ излучением // Вулканология и сейсмология. 2002. №6. С. 51-62
- [11] Молчанов О. А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. М.: Наука, 1985. 223 с.
- [12] Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосферной и космической плазме. М.: Наука. 1984. 392 с.
- [13] Альперт Я. Л., Гусева Э. Г., Флигель Д. С. Распространение низкочастотных электромагнитных волн в волноводе Земля-ионосфера. М.: Наука, 1967. 124 с.
- [14] Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972. 336 с.
- [15] Тархова А. Г. Электроразведка. Справочник геофизика. М.: Недра. 1980. 518 с.
- [16] Уваров В. Н., Дружин Г. И., Санников Д. В. Электромагнитное излучение литосферного происхождения: метод обнаружения и первые результаты // Приборы и техника эксперимента. 2010. №6. С. 131–137
- [17] Андронов В. В., Журавлев В. Ф. Сухое трение в задачах механики. М.-Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика. 2010. 184 с.
- [18] Хасанов М. М., Булгакова Г. Т. Нелинейные и неравновесные эффекты в реологически сложных средах. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 288 с.

- [19] Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- [20] Райс Дж. Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. 217 с.
- [21] Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. М.: Мир, 1982
- [22] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Теория поля. М.: Наука, 1988. 512 с.
- [23] Kocharyan G. G., Kishkina S. B., Novikov V. A., Ostapchuk A. A. Slow slip events: parameters, conditions of occurrence, and future research prospects // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. vol 5(4). p. 863–891

**Для цитирования:** Уваров В. Н. Характерные формы электромагнитных сигналов // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. № 2(22). С. 112-127. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-22-2-112-127

**For citation:** Uvarov V. N. Characteristic Patterns of Electromagnetic Manifestation of Lithosphere Dynamics, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2018, **22**: 2, 112-127. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-22-2-112-127

Поступила в редакцию / Original article submitted: 04.04.2018

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-22-2-112-127

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

## **CHARACTERISTIC PATTERNS OF ELECTROMAGNETIC MANIFESTATION OF LITHOSPHERE DYNAMICS**

**V. N. Uvarov**

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation (IKIR) FEB RAS,  
684034, c.Paratunka, Kamchatka

E-mail: uvarovvng@yandex.ru

The signals of the lithosphere dynamics with the seismic activity of Kamchatka are compared. Earlier unknown simple repeating waveforms of the electrical component of the electromagnetic field in ELF-SLF range (patterns) associated with earthquakes were identified. The analysis of the conditions of acoustic and electromagnetic radiation occurrence and lithospheric mechanisms of acoustic-electromagnetic transformation was carried out. Conclusions about the conversion of acoustic radiation into the electromagnetic radiation, character of the lithospheric motions accompanying the simplest waveforms were drawn. These patterns were compared with the simplest forms of deformation movements of a deformed solid.

*Key words: seismoelectromagnetism, electrodynamics of the lithosphere, electromagnetic manifestation of earthquakes, propagation of radio waves, natural electromagnetic field of the Earth, electromagnetic radiation of the lithosphere, electrohydrodynamics*

© Uvarov V.N., 2018