

О ВЫДЕЛЕНИИ СИГНАЛА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭМ-ПОЛЯ ЛИТОСФЕРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

© 2022 О.А. Лашин, В.В. Бобровский

*Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке,
Кыргызская Республика, 720049; e-mail: legyss@mail.ru*

Поступила в редакцию 04.03.2022; после доработки 14.06.2022; принята в печать 27.06.2022

Сложность выделения электромагнитного поля литосферного происхождения, регистрируемого на дневной поверхности, заключается во влиянии на регистрируемые сигналы различных источников электромагнитного поля как искусственного, так и естественного происхождения. В работе приведен обзор таких источников электромагнитного поля в килогерцовом диапазоне. Представлена математическая модель, описывающая форму импульсов (во временной области), прошедших через проводящую среду. На основе приведенной математической модели сделан вывод о том, что по форме импульса можно судить прошел ли импульс через проводящую горную породу или через воздух (непроводящая среда). Полученные результаты моделирования позволяют определить критерии по созданию прототипа обобщенной формы импульса, который может быть использован в алгоритмах выделения сигналов литосферного происхождения из наблюдаемого электромагнитного поля для дальнейшего их изучения.

Ключевые слова: источники электромагнитного поля, трещинообразование, импульс литосферного происхождения.

ВВЕДЕНИЕ

Основным направлением исследований, проводимых в Научной станции Российской академии наук (НС РАН), расположенной в г. Бишкек (Кыргызская Республика), является изучение геодинамических процессов, происходящих в глубинах земной коры. С точки зрения анализа геодинамического состояния среды одним из перспективных направлений исследований является регистрация электромагнитных полей в килогерцовом диапазоне. Целью данной работы является рассмотрение математической модели распространения электромагнитного поля от импульсного источника излучения в проводящей среде и анализ результатов моделирования для определения возможных критериев выделения сигнала высокочастотного электромагнитного поля литосферного происхождения из наблюдаемых данных. Вопросы, связанные с практической апробацией на территории Тянь-Шаня предлагаемого авторами подхода с использованием прототипа (обобщенного образа) импульса для выделения сигналов

литосферного происхождения из наблюдаемого электромагнитного поля, планируется подробно рассмотреть в последующей серии статей.

В настоящее время известны различные типы механо-электрических преобразований, которые могут быть основой формирования электромагнитного поля эндогенного (литосферного) происхождения, такие как пьезоэлектрический эффект (Шуман, 2010), возникающий при упругих деформациях в некоторых кристаллах, эффект Степанова (Светов, 1992) — разделение зарядов в однородном твердом диэлектрике при пластических деформациях, трещинообразование (Гохберг и др., 1980) — разрушающие деформации, при которых рвутся электрические связи и возникают не скомпенсированные электрические заряды, приводящие к высоким локальным электрическим полям.

В сейсмически активных зонах возникают различные типы деформаций, порождающие электромагнитное поле в широком спектральном диапазоне от квазипостоянного до нескольких десятков герц (Гохберг и др., 1980). При нелинейных преобразованиях (пластических

и разрушающих деформациях) спектральный состав расширяется до сотен килогерц (Светов, 1992).

Группа ученых из Института физики Земли АН СССР (Гохберг и др., 1988) под руководством академика М.А. Садовского в 1970-х гг. проводила исследования электромагнитных импульсных источников эндогенного происхождения. К настоящему времени отработаны основные черты методики наблюдения импульсных источников, в которой исследуется либо низкочастотная огибающая интенсивности этого излучения, либо проводится непосредственный подсчет количества регистрируемых импульсов (активность), превышающих некоторое фоновое значение, за 1 час (Светов, 1992; Токтосопиев, 2007).

При пассивном измерении возникает сложность отделения сигналов литосферного происхождения от сигналов экзогенного и техногенного происхождения, т.к. только малая часть измеряемой энергии электромагнитного поля порождается неупругими деформациями горных пород (трещинообразованием) в непосредственной окрестности точек наблюдения (Уваров, 2012), другая часть обусловлена фоновым уровнем электромагнитного поля и определяется, в основном, полями дальних гроз. Для правильного понимания получаемых данных при пассивном мониторинге требуется априорная информация о действующих источниках электромагнитного поля в месте установки измерителя магнитного поля.

ОБЗОР ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБЛАСТИ НИЗКИХ ЧАСТОТ (ДО 30 кГц)

В природе существует широкий спектр электромагнитных полей, генерируемых различными источниками как искусственного, так и естественного происхождения.

Экзогенные источники подразделяют на два типа. Первый тип — источники искусственного происхождения (*техногенные*). К ним относятся промышленные объекты, системы радиосвязи и т.д. Второй тип — *источники естественного происхождения*, такие как грозовая деятельность, процессы в ионосфере и атмосфере вызванные различными внешними факторами (Клейменова, 1977).

Эндогенные источники также могут быть двух типов (Петров, 2012). Первый — *естественная электрохимическая активность* горных пород. В результате неоднородности геологической среды и сложных физико-химических процессов, протекающих в ней (окисление, диффузия ионов,

течение поровой влаги и т.д.), внутри горных пород накапливаются заряды, которые подобно естественным гальваническим элементам возбуждают самопроизвольные электромагнитные поля. Ко второму типу относят *импульсное электромагнитное поле литосферного происхождения*, вызываемое механо-электрическими преобразованиями. В работе Б.С. Светова (1992, с. 100) сказано следующее: «... механо-электрические преобразования представляют собой результат нарушения электростатического и электродинамического равновесия в целом нейтральной системы зарядов и двойных слоев в гетерогенной и полифазной среде, которую представляет собой гордая порода».

Наиболее значимый вклад в уровень электромагнитного поля вносят экзогенные источники. Среди которых, самые значимые — техногенные источники и атмосферики.

Источники техногенного происхождения связаны с технической деятельностью человека. Они сильнее всего проявляются в диапазоне промышленных частот в местах с высокой плотностью населения и развитой промышленностью. Как правило, информационным признаком сигналов силовой сети является кратность или дробность их частоты основной частоте силовой сети (Уваров, 2018).

Радиолокационная, связная и вещательная активность в основном осуществляется на частотах значительно превышающих единицы килогерц и потому в случае нормальных значений этих полей малозаметна (Уваров, 2018). Однако в этот диапазон может попадать излучение на комбинационных частотах этих излучателей, возникшее в результате нелинейного взаимодействия и переизлучения ионосферой (Альперт и др., 1967).

Для детального рассмотрения источников сигналов в килогерцовом диапазоне был использован Web-SDR расположенный в сети интернет по адресу: <http://websdr.ewi.utwente.nl:8901>. Web-SDR принимает на широкополосную антенну в диапазоне частот от сотен герц до 29.16 МГц и на его шкале частот нанесены пометки с названиями радиостанций. На рис.1 и 2 показаны спектры сигналов в диапазоне частот до 30 кГц.

На частотах выше 11 кГц (рис. 2) практически круглосуточно работают мощные радиостанции дальней навигации и связи, и радиостанции передающие эталонные сигналы частоты и времени информацию о которых можно найти на официальном сайте ФГУП Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений по адресу: <https://www.vniiftri.ru>. О частотах радиостанций дальней навигации и связи информации не много, поэтому сложно судить об энергетике



Рис. 1. Спектр частот в килогерцовом диапазоне от сотен Гц до 30 кГц.
Fig. 1. Frequency spectrum in the kilohertz range from hundreds of Hz to 30 kHz.

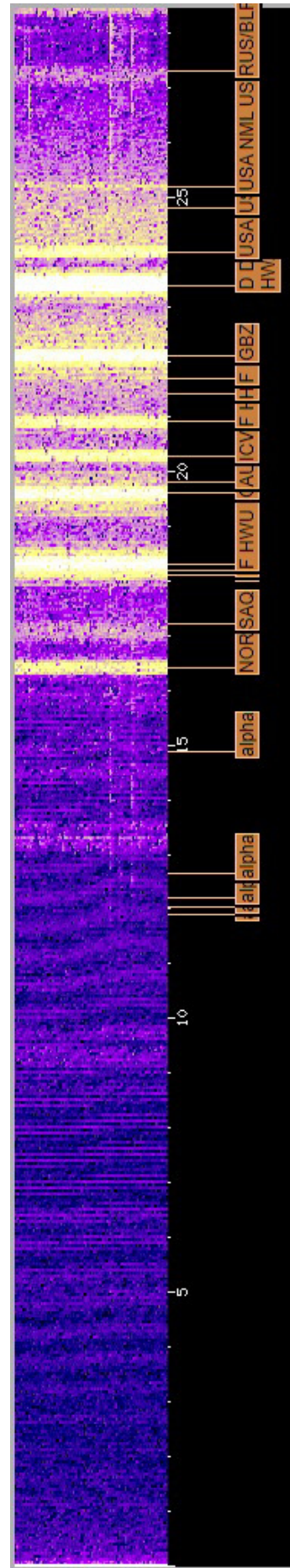


Рис. 2. Частотно-временная диаграмма спектра сигнала (водопад) от сотен Гц до 30 кГц.
Fig. 2. Frequency-time diagram of the signal spectrum (waterfall) from hundreds of Hz to 30 kHz.

излучаемых ими сигналов. О радиостанциях, передающих эталонные сигналы частоты и времени, расположенных на территории Содружества Независимых Государств информации достаточно. Как правило, это узкополосные не более 500 Гц модулированные по амплитуде, фазе или частоте сигналы. К примеру, в 100 км от НС РАН г. Бишкек расположена радиостанция РЙХ-86 (Эталонные..., 2008). Несущая частота радиостанции, в зависимости от времени суток, равна 25.0 кГц, 25.1 кГц, 25.5 кГц, 23.0 кГц, 20.5 кГц. Излучаемая мощность составляет 300 кВт. Уровень сигнала регистрируемый на территории научной станции при помощи широкополосного (0.1–300 кГц) индукционного датчика интегрирующего типа (Ильичев, Лашин, 2017) имеющего коэффициент преобразования по полю 33 мВ/нТл и специально разработанного анализатора спектра (Лашин, 2019, 2020) составил 9.6 нТл.

На основании приведенной частотно-временной диаграммы (рис. 2) можно сделать вывод о том, что наиболее благоприятный (с точки зрения помеховой обстановки) диапазон частот для измерения электромагнитного поля в килогерцовом диапазоне лежит в пределах от 1–4 кГц до 11–20 кГц.

Атмосферика. Сигналы естественного электромагнитного поля атмосферно-грозового и ионосферно-магнитосферного происхождения в частотном диапазоне 0.3–30 кГц изучаются уже давно, формы их достаточно хорошо изучены и потому они легко идентифицируются. Наиболее мощная компонента электромагнитного поля в нормальных условиях обусловлена атмосферно-грозовой активностью — это в основном атмосферика — сигналы от удаленных молний, возникающих в приэкваториальных областях — так называемых центрах мировой грозовой активности. Частота их появления от 50 до 300 разрядов в секунду длительность 5–20 мс. Максимальная амплитуда напряженности поля в средних широтах может достигать долей и даже единиц В/м (Уваров, 2018).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЭНДОГЕННОГО (ЛИТОСФЕРНОГО) ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Практическими вопросами изучения источников электромагнитного поля эндогенного происхождения занимались многие ученые (Гохберг и др., 1988; Соболев, Демин, 1980; Токтосопиев, 2007; Шуман, 2010; Уваров, 2012). Одна из работ — монография (Токтосопиев, 2007), посвященная поиску предвестников землетрясений Северо-Тянь-Шаньского региона. Данные, используемые в цитируемой монографии, отно-

сятся к 80-тым годам прошлого столетия и в ней представлены результаты экспериментального исследования форм регистрируемых сигналов импульсного типа с целью определения компонент электромагнитного поля атмосферного и литосферного происхождения.

Эксперимент заключался в следующем. Для приема сигналов электрического поля импульсного типа использовался измерительный диполь и осциллограф с памятью. Работы проводились в районе разломов Кунгей-Алатоо (окаймляет с севера котловину, в которой находится озеро Иссык-Куль) и Предтерекского (окаймляет с юга котловину, озера Иссык-Куль), имеющих активные тектонические подвижки (Чаримов и др., 2010; Корженков и др., 2015; Токтосопиев, 2007). Регистрация проводилась в отсутствие гроз. Было зарегистрировано 1000 импульсов. Амплитуды зарегистрированных сигналов варьировались в пределах 20–100 мВ/м, а их длительность составляла 50–1000 мкс. По характерным особенностям (амплитуда, период, степень затухания), которые были определены по литературным источникам, приведенным в этой монографии, импульсы были разбиты на семь групп. Первые четыре группы представляют собой электрические поля (E) атмосферного происхождения и приведены на рис. 3.

Группы импульсов с I по IV составляют 89% всех зарегистрированных сигналов. Количество зарегистрированных импульсов, соответствующее I группе составляет 11 %, II группе — 17%, III группе — 41% и IV группе — 20%. Решалась задача оценки спектров этих сигналов в зависимости от расстояния, для выбора оптимальных частот регистрации электромагнитного поля, результаты приведены на рис. 4.

В работе (Токтосопиев, 2007) говорится, что наиболее благоприятным для регистрации электромагнитного поля является участок 10–15 кГц (рис. 4). Первые три группы зарегистрированных импульсов показаны на рис. 5.

Импульсы группы V (рис. 5a) наиболее высокочастотные, колебания имеют период порядка 10 мкс. Количество импульсов данной группы составляет 6%. Они появляются в основном в утренние и вечерние часы суток и связаны, возможно, с индустриальными помехами.

Форму импульсов группы VI (рис. 5b) не удалось отождествить с какими-либо источниками помех и атмосфериками. Данные импульсы составляют 4% от общего количества зарегистрированных импульсов. Период этих колебаний равен 100–200 мкс (10–5 кГц), а длительность около 400 мкс. Было высказано предположение, что эти сигналы связаны с импульсами литосферного происхождения. Проведено сопоставление количества импульсов с сейсмическими

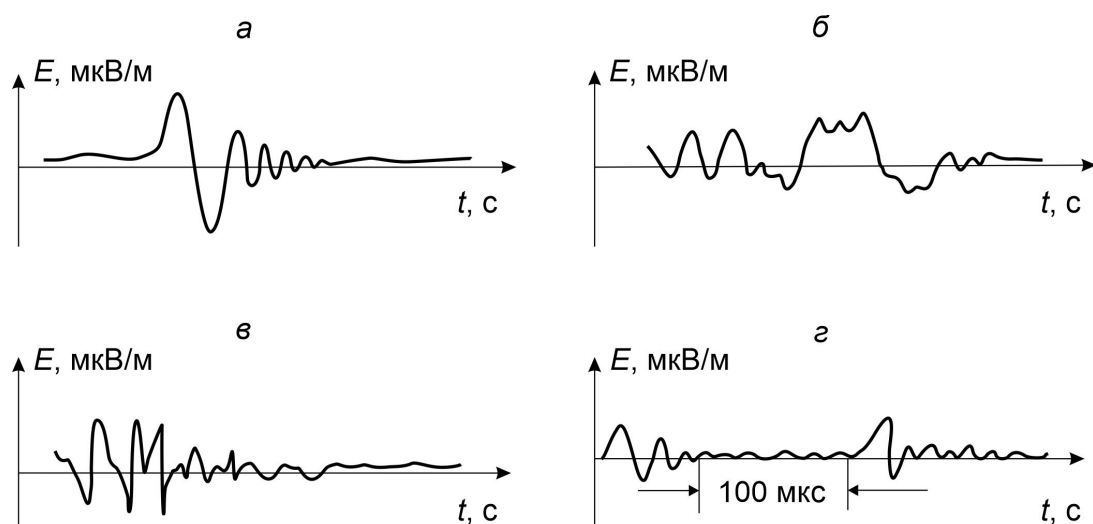


Рис. 3. Типовые формы атмосфериков по (Токтосопиев, 2007) с доработкой. Импульсы группы: I — а; II — б; III — в; IV — г.

Fig. 3. Typical forms of atmospherics after (Toktosopiev, 2007) with revision. Impulses of the group: I — а; II — б; III — в; IV — г.

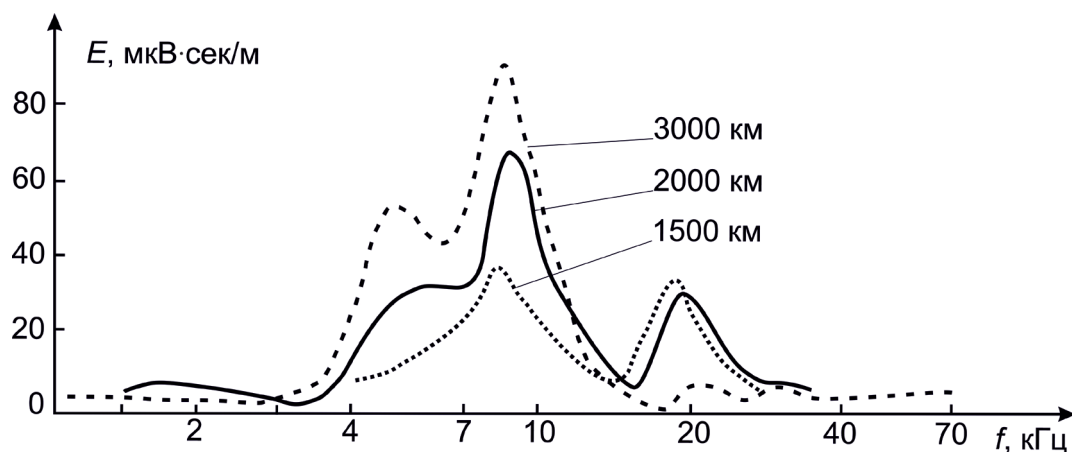


Рис. 4. Графики спектральной плотности атмосфериков по (Токтосопиев, 2007) с доработкой.

Fig. 4. Graphs of the spectral density of atmospherics according to (Toktosopiev, 2007) with revision.

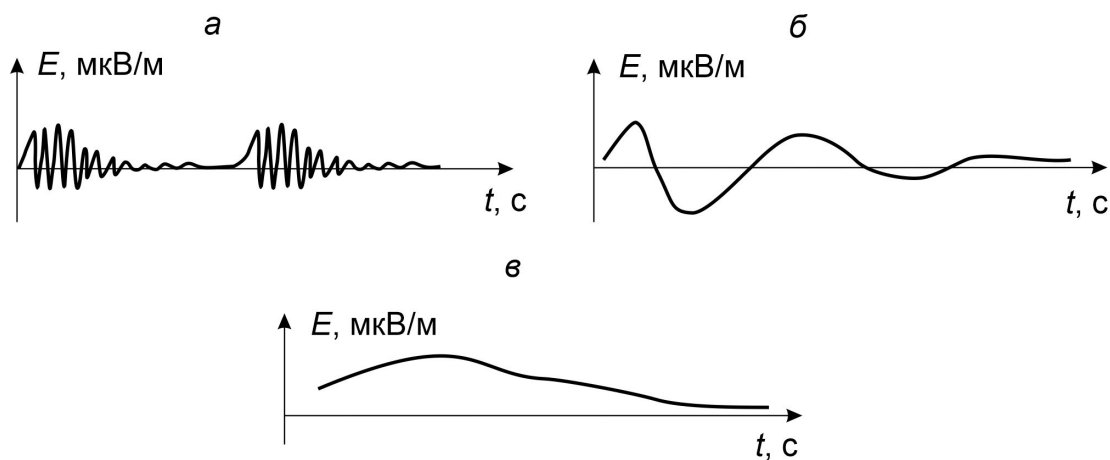


Рис. 5. Типовые формы зарегистрированных импульсов предположительно неатмосферного происхождения по (Токтосопиев, 2007) с доработкой. Импульсы группы: V — а; VI — б; VII — в.

Fig. 5. Typical forms of recorded pulses of presumably non-atmospheric origin according to (Toktosopiev, 2007) with modification. Impulses of the group: V — а; VI — б; VII — в.

событиями. Было замечено, что после сейсмического события импульсы VI группы наблюдаются в два раза чаще (Токтосопиев, 2007).

Импульсы группы VII (рис. 5б), наиболее длиннопериодные из зарегистрированных сигналов, имеют длительность порядка 400–500 мкс и по видимому, вызваны ветровыми помехами, приводящими к движению электрического диполя в месте установки. Количество таких импульсов составляет 1 %.

Таким образом, наиболее интересны импульсы группы VI, которые в целом согласуются с формой электрических сигналов регистрируемых при разрушении образцов в лабораторных условиях (Klyuchkin et al., 2022). Данные импульсы характеризуются тем, что начало имеет высокочастотную составляющую, а спадающая часть более низкочастотную. Описанный эксперимент показывает, что импульсы предположительно литосферного происхождения (группа VI) составляют лишь малую долю от регистрируемых импульсов, в связи с этим ставится задача модельного описания формы импульса с целью определения критериев по их выделению из всего многообразия импульсов.

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \sigma \mu \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{H} = 0, \quad \nabla^2 \mathbf{E} - \sigma \mu \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

где $\mathbf{H}$ и $\mathbf{E}$ — векторы напряженности магнитного и электрического полей соответственно, σ — проводимость, μ — магнитная постоянная, ε — электрическая постоянная, t — время.

Согласно выражениям (1), все компоненты электромагнитного поля будут обладать одинаковыми свойствами, следовательно, неважно какую компоненту электромагнитного поля измерять (электрическую или магнитную). Для измерения могут быть использованы индукционные датчики, напряжение на выходе которых

МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА В ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ

Было отмечено, что форму импульсов группы VI (рис. 5б) не удалось отождествить с какими-либо источниками помех и атмосфериками, и как предположил А.М. Токтосопиев (2007), они связаны с процессами в литосфере. Подобные по форме импульсы во временной области были замечены при регистрации сигналов в георадарном методе исследования грунтов. В работе П.Н. Александрова (2007), посвященной теоретическим основам георадарного метода, было отмечено, что помимо высокочастотной составляющей сигнала, прошедшего через массив горных пород, присутствует еще и спадающая низкочастотная составляющая. Там же приводится подробное описание природы возникновения спадающей низкочастотной части импульсов, прошедших через проводящую среду, на основании законов электродинамики. Показано, что взаимодействие электромагнитного поля со сплошной средой подчиняется телеграфным уравнениям:

пропорционально скорости или самому магнитному полю, т.к. морфология сигнала сохраняется, т.е. не меняется закон взаимодействия электромагнитного поля с проводящей средой.

В рамках решения задачи нахождения аналитического выражения, описывающего точечный электрический источник в проводящей однородной изотропной $\mu\sigma\varepsilon$ -среде в работе (Александров, 2007) телеграфное уравнение (1) исследовалось с помощью функции Грина, решение которого имеет вид:

$$(R, t) = e^{-\frac{\sigma}{2\varepsilon}t} \frac{\delta(t - \sqrt{\varepsilon\mu}R)}{4\pi R} - \sigma \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{e^{-\frac{\sigma}{2\varepsilon}t}}{8\pi \sqrt{t^2 - \varepsilon\mu R^2}} I_1 \left(\frac{\sigma}{2\varepsilon} \sqrt{t^2 - \varepsilon\mu R^2} \right) U(t - \sqrt{\varepsilon\mu}R), \quad (2)$$

где R — расстояние от источника до приемника, δ — дельта функция Дирака, I_1 — модифицированная функция Бесселя первого порядка (Справочник..., 1979), U — функция Хэвисайда (Кеч, Теодореску, 1978).

Выражение (2) условно можно разделить на две части: первая — волновая, определяемая диэлектрической проницаемостью атмосферы, вторая — диффузионная, связанная с электропроводностью геосреды. Волновой процесс имеет более высокие скорости распространения, чем диффузионный. Нами было проведено моделирование импульса согласно приведенной теоретической базы и его сопоставление с

импульсами группы VI зарегистрированных А.М. Токтосопиевым (2007). Суммарное действие волнового и диффузионного процессов иллюстрируется на графике рис. 6, на котором приведен модельный импульс (в нормированных единицах поля), прошедший через проводящую среду, параметры которой взяты равными:

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн / м },$$

$$\sigma = \frac{1}{100} \text{ См / м },$$

$$\varepsilon = \frac{1}{36 \cdot \pi} 10^{-9} \text{ Ф / м }.$$

Импульс (рис. 6) был смоделирован при расстоянии от источника до приемника равного 105 метров.

Ноль времени на графике рис. 6 соответствует короткому импульсу, излучаемому точечным источником (расположенным в среде), после чего создаваемое им (источником) поле начинает распространяться к поверхности (месту соединения двух сред проводящей и непроводящей) на которой расположен приемник. Как показано на графике (рис. 6) каждый последующий период импульса больше предыдущего, т.е. импульс имеет низкочастотную затухающую составляющую, связанную с параметрами проводящей среды.

Рассмотренные результаты проведенного математического моделирования распространения электромагнитного поля от точечного электрического источника в проводящей однородной среде, хорошо объясняют зарегистрированные на практике импульсы литосферного происхождения группы VI (Токтосопиев, 2007).

В развитие теории, описывающей импульсный источник электромагнитного поля литосферного происхождения регистрируемого на дневной поверхности, П.Н. Александровым (2009) была предложена гипотеза, согласно которой: в процессе необратимых деформаций массива горных пород одна отдельная трещина с точки зрения теории электромагнитного поля представляет собой локальный импульсный источник электромагнитного излучения, в спектре которого присутствуют все частоты. При распространении электромагнитного поля от литосферного источника к дневной поверхности во временной области наблюдается первое вступление, представленное высокочастотной компонентой, и последующая низкочастотная составляющая поля.

На основании теории распространения электромагнитного поля в проводящей среде от импульсного электрического источника предложенной П.Н. Александровым для георадарного метода исследования грунта нами было объяснено, что импульсы группы VI, зарегистрированные при проведении измерений А.М. Токтосопиевым, являются эндогенными, т.е. прошедшими через проводящую среду. Тем самым подтвердилось предположение А.М. Токтосопиева о том, что данные импульсы связаны с процессами в литосфере.

На основании проведенного моделирования, стало ясно, что электромагнитные сигналы от источников литосферного происхождения после волнового процесса имеют еще и диффузионную часть, а сигналы, связанные с техногенными и атмосферными источниками, содержат в себе лишь волновую часть. Таким образом, по форме принятого сигнала можно судить о том, прошел ли импульс через горную породу (проводящая среда) или через воздух (непроводящая среда). Для практического выделения сигналов электромагнитного поля эндогенного (литосферного) происхождения из всего набора наблюдаемых данных, нами предложен метод, основанный на создании прототипа (обобщенного образа) формы импульса. С использованием такого прототипа планируется провести мониторинговые наблюдения с целью выявления вариаций высокочастотного электромагнитного поля литосферного происхождения в отдельных сейсмоактивных районах Северного Тянь-Шаня.

Дополнительно отметим, что проведенный обзор источников техногенного происхождения в килогерцовом диапазоне, позволил определить оптимальный диапазон частот для измерений

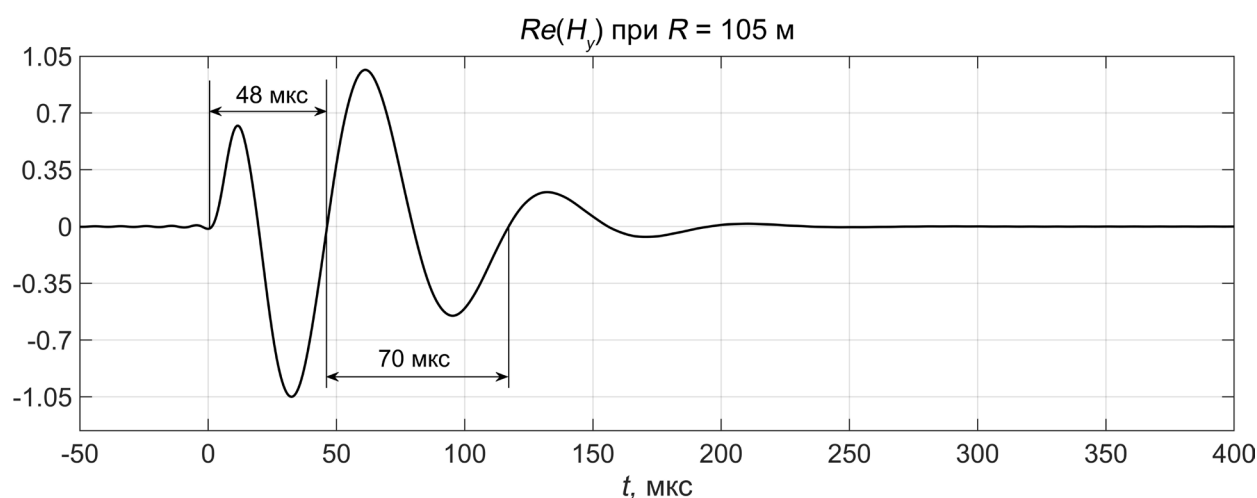


Рис. 6. График модельного импульса прошедшего через проводящую геосреду.

Fig. 6. Graph of a model impulse passed through a conducting geomedium.

электромагнитного поля (от 1 до 20 кГц) с точки зрения техногенных помеховых сигналов.

Работа проводилась в рамках выполнения Государственного задания НС РАН по теме: «Разработка аппаратно-программных средств и основ технологии электромагнитного мониторинга геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах и оценки их опасностей» (Регистрационный номер темы в системе ЕГИСУ АААА-А19-119020190065-6).

Авторы выражают глубокую признательность и благодарность д.ф.м.н. Анатолию Кузьмичу Рыбину и д.ф.м.н. Павлу Николаевичу Александрову за консультации и помощь, оказанные при написании статьи, а также сотруднику НС РАН Денису Витальевичу Коломейцеву за помощь в подготовке графического материала.

Список литературы [References]

- Александров П.Н.* К теории сейсмического и электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 2. Вып. 14. С. 49–58 [*Alexandrov P.N.* To the theory of seismic and electromagnetic monitoring of the modern geodynamic processes // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2018. № 2 (14). P. 49–58 (in Russian)].
- Александров П.Н.* Теоретические основы георадарного метода. М.: Физматлит, 2007. 112 с. [*Alexandrov P.N.* Theoretical foundations of the georadar method. M.: Fizmatlit, 2007. 112 p. (in Russian)].
- Альперт Я.Л., Гусева Э.Г., Флигель Д.С.* Распространение низкочастотных электромагнитных волн в волноводе Земля-ионосфера. М.: Наука, 1967, 124 с. [*Alpert Ya.L., Guseva E.G., Flygel D.S.* Distribution of low-frequency electromagnetic waves in the earth-ionosphere waveguide. M.: Science, 1967, 124 p. (in Russian)].
- Геологический словарь. В трех томах. Издание третье, переработанное и дополненное. 440 с. / Гл. ред. О.В. Петров. Т. 3. Р–Я. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. 440 с [Geological dictionary. In three volumes. Third edition, revised. and additional / Ch. ed. O.V. Petrov. T. 3. R-Ya. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2012. 440 p. (in Russian)].
- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Добровольский И.П.* Источники электромагнитных предвестников землетрясений. Доклады АН СССР. Т. 250. № 2. 1980. С. 323–326 [*Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Dobrovolsky I.P.* Sources of electromagnetic precursors of earthquakes. Report AN SSSR. V. 250. № 2, 1980, P. 323–326 (in Russian)].
- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А.* Сейсмoeлектромагнитные явления. М.: Наука, 1988. 174 с. [*Gokhberg M.B., Morgunov V.A., Pipes O.A.* Seismo electromagnetic phenomena. M.: Science, 1988. 174 p. (in Russian)].
- Ильичев П.В., Лашин О.А.* Широкополосный термостабильный измеритель индукции магнитного поля: Патент Российской Федерации на полезную модель №168302, дата регистрации 30.01.2017 г. [*Ilyichev P.V., Lashin O.A.* Broadband thermostable magnetic field induction meter: Patent of the Russian Federation for utility model №168302, registration date 30.01.2017 (in Russian)].
- Кеч В., Теодореску П.* Введение в теорию обобщенных функций с приложениями в технике. М.: Мир, 1978. 518 с [Kech V., Theodorescu P. Introduction to the theory of generalized functions with applications in the technique. M.: Mir, 1978. 518 p. (in Russian)].
- Клейменова Н.Г.* Связь ОНЧ-излучений с геомагнитными пульсациями // Естественное электромагнитное поле земли под ред. Д.Н. Четаева. Изд. Наука, 1977, С. 53–63 [*Kleimenova N.G.* Communication of VLF radiation with geomagnetic pulsations // Natural electromagnetic field of the earth, ed. D.N. Chetaeva. Ed. Science, 1977. P. 53–63 (in Russian)].
- Корженков А.М., Абдиева С.В., Фортуна А.Б. и др.* Сейсмически мобилизованные морены в Тянь-Шане // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 10. С. 1871–1881 [*Korzenkov A.M., Abdieva S.V., Fortuna A.B. et al.* Seismically mobilized seas in the Tien Shan // Geology and Geophysics. 2015. V. 56. №.10. P. 1871–1881 (in Russian)].
- Лашин О.А.* Анализатор спектра для контроля помеховой обстановки в полевых геофизических исследованиях // Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сб. материалов XI Междунар. конф. молодых ученых и студентов. В 2 т. / Отв. ред. О.Б. Забинякова. Бишкек: НС РАН, 2019. Т. 1. С. 104–108 [*Lashin O.A.* Spectrum Analyzer for Controlling Noise Conditions in Field Geophysical Research // Modern Techniques and Technologies in Scientific Research: Sat. materials XI Intern. conf. young scientists and students. In 2 volumes / Rep. ed. ABOUT. Zabinyakova. Bishkek: NS RAS, 2019. T. 1. P. 104–108 (in Russian)].
- Лашин О.А.* Программа вычисления спектра измеряемого сигнала в режиме реального времени // Свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020613371, дата регистрации 13.03.2020 [*Lashin O.A.* The program for calculating the spectrum of the measured signal in real time // Certificate of the Russian Federation on state registration of the computer program №2020613371, registration date 03.13.2020 (in Russian)].
- Светов Б.С.* Электромагнитный мониторинг сейсмoтектонических процессов. // Известия Вузов. Геология и разведка 1992. № 2. С. 99–116 [*Svetov B.S.* Electromagnetic monitoring of seismotectonic processes. // Izv. Universities. Geology and exploration 1992. No. 2. P. 99–116 (in Russian)].
- Соболев Г.А., Демин В.Н.* Механoeлектрические явления в земле. М.: Наука, 1980. 215 с [*Sobolev G.A., Demin V.N.* Mechanoelectric phenomena in the ground. M.: Science, 1980. 215 p. (in Russian)].
- Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под редакцией М. Абрамовиц, И. Стиган. М.: Наука, 1979. 486 с. [Handbook of special features with formulas, graphs and mathematical tables / edited by M. Abramowitz, I. Stigan. M.: Science, 1979. 486 p. (in Russian)].

- Токтосопиев А.М.* Электромагнитные предвестники землетрясений. Каракол, 2007. 312 с. [Toktosopiev A.M. Electromagnetic precursors earthquakes. Karakol, 2007. 312 p. (in Russian)].
- Уваров В.Н.* Электромагнитное проявление литосферы в СНЧ-ОНЧ-диапазоне // Геофизический журнал. 2012. Т.34. № 6. С. 133–146 [Uvarov V.N. Electromagnetic manifestation of lithosphere in the SNC-ONC band // Geophysical magazine. 2012. T.34. № 6. P. 133–146 (in Russian)].
- Уваров В.Н.* Характерные формы электромагнитных сигналов // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 2. Вып. 22. С. 112–127. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-22-2-112-127> [Uvarov V.N. Characteristic patterns of electromagnetic manifestation of lithosphere dynamics // Vestnik KRAUNTs. Физ.-мат. науки. 2018. № 2(22). P. 112–127 (in Russian)].
- Чаримов Т.А., Абдиева С.В., Керимбаева Д. и др.* Комплексы четвертичных отложений и гравитационные сейсмодислокации в долинах рек Тоссор и Чон-Кызылсуу южное приискулье // Наука и новые технологии. 2010. №2. С. 53–60 [Charimov T.A., Abdieva S.V., Kerimbaeva D. et al. Complexes of Quaternary sediments and gravitational seismic dislocations in the valleys of the rivers Tossor and Chon-Kyzylsuu, southern Issyk-Kul area // Science and new technologies. 2010. № 2. P. 53–60 (in Russian)].
- Шуман В.Н.* Концепция динамически неустойчивой геосреды и сейсмoeлектромагнитный шум литосферы // Геофизический журнал. 2010. №6, Т. 32. С. 101–118 [Shuman V.N. The concept of a dynamically unstable geo-environment and seismoelectromagnetic noise of the lithosphere // Geophysical Journal. 2010. № . V. 32. P. 101–118 (in Russian)].
- Эталонные сигналы частоты и времени. М.: ГСВЧ. Бюллетень В16/2008 [Reference frequency and time signals. M.: HSWH. Bulletin В16/2008].
- Klyuchkin V.N., Novikov V.A., Okunev V.I., Zeigarnik V.A.* Acoustic and electromagnetic emissions of rocks: insight from laboratory tests at press and shear machines // Environmental Earth Sciences. 2022. № 81. С. 64–77. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10189-z>

ON THE EXTRACTION A HIGH FREQUENCY EM FIELD SIGNAL OF LITHOSPHERIC ORIGIN: A THEORETICAL ASPECT

O.A. Lashin, V.V. Bobrovsky

Federal State Budgetary Institution of Science Scientific station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Kyrgyz Republic, 720049

Received March 4, 2022; revised June 14, 2022; accepted June 27, 2022

The complexity of isolating the electromagnetic field of lithospheric origin, recorded on the day surface, is the influence on the registered signals of various electromagnetic field sources of both artificial and natural origin. The paper provides an overview of such electromagnetic field sources in the kilohertz range. A mathematical model describing the shape of pulses (in the time domain) that have passed through a conducting medium is presented. Based on the above mathematical model, it is concluded that the shape of the pulse can be used to judge whether the pulse has passed through a conductive rock or through air (non-conductive medium). The simulation results obtained allow us to determine the criteria for creating a prototype of a generalized pulse shape, which can be used in algorithms for the extraction of signals of lithospheric origin from the observed electromagnetic field for their further study.

Keywords: electromagnetic field sources, fracturing, pulse of lithospheric origin.