

УДК 551.594

И.В. Брякин, д.т.н., профессор

Н.Г. Мамытов, аспирант

Институт машиноведения и автоматики НАН КР

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ЕЭМП ELF-VLF-ДИАПАЗОНОВ

Рассматриваются прикладные вопросы разведочной геофизики. Анализируются свойства и особенности возникновения и распространения естественных электромагнитных полей (ЕЭМП) в ELF-VLF-диапазонах. Обосновывается возможность применения ЕЭМП в ELF-VLF-диапазонах в качестве высокочувствительного носителя информации о земных и космических процессах.

Ключевые слова: атмосфера, атмосферный разряд, atmospheric, диэлектрическая проницаемость, грозовое облако, ЕЭМП, ELF-VLF-диапазон, магнитная восприимчивость, магнитная компонента, литосфера, поверхностный импеданс, spheric, tweek, удельное электрическое сопротивление, частотный диапазон, эндовибратор, электрическая компонента, электромагнитная волна, CG- и IC-молнии.

Введение

Известно, что различные геофизические методы исследований, в частности частотные электромагнитные зондирования, используют в качестве зондирующего поля радиоволновое излучение электрического или магнитного дипольных источников, которые располагаются на плоской границе раздела между двумя однородными полупространствами. Одно из полупространств имеет бесконечно высокое сопротивление и представляет собой воздушную среду, а другое из полупространств является проводящим поверхностным слоем земли, образующим в свою очередь нижнюю стенку волновода «Земля–ионосфера» [1–3].

В задачах распространения и возбуждения радиоволн основным параметром, характеризующим электрические свойства нижней стенки волновода «Земля–ионосфера», является поверхностный импеданс δ , учитывающий совокупное воздействие слоистой земной коры на электромагнитное поле [1]:

$$\delta = E_{\tau} / (H_{\tau} \times Z_0),$$

где E_{τ} и H_{τ} – одновременно регистрируемые горизонтальные соответственно электрическая и магнитная компоненты ЕЭМП; $Z_0 = 377$ Ом – характеристический импеданс свободного пространства.

В последнее время особый интерес у соответствующих специалистов вызывают методы зондирования, основанные на использовании естественных электромагнитных полей (ЕЭМП) в КНЧ–ОНЧ (ELF-VLF)-диапазонах. Главной особенностью электромагнитных полей указанных частотных диапазонов является их возможность распространения в волноводе Земля–ионосфера на большие расстояния с очень малым затуханием, составляющим несколько децибел на тысячу километров, и проникновения на большие глубины в землю и воду.

Следует отметить, что для решения многих задач разведочной геофизики и электромагнитного мониторинга сейсмотектонических процессов, а также для определения особенностей структуры самой земной коры необходимо знание прежде всего ее электрических характеристик в КНЧ–ОНЧ-диапазонах.

Широкое применение в качестве контролируемого источника КНЧ–ОНЧ-диапазонов ЕЭМП позволит открыть новые возможности не только для изучения электрических характеристик земной коры, но и для обнаружения погруженных

подводных объектов различного назначения, т.к. электромагнитные волны указанного диапазона также могут проникать на большие глубины в соленой или проводящей воде.

Поэтому разработки, направленные на повышение достоверности и эффективности методов зондирования, основанные на взаимодействии ЕЭМП с нижней границей волновода Земля-ионосфера, были и остаются актуальными, не теряющими свою прикладную значимость.

Для оценки возможностей более эффективного применения ЕЭМП в качестве активизирующего физического поля для задач электромагнитного зондирования необходимо знать условия возбуждения и распространения КНЧ–ОНЧ электромагнитных волн, понимать физическую природу ЕЭМП в целом, его особенности и свойства, что в свою очередь требует проведение соответствующей систематизации и углубленного феноменологического анализа всех этих факторов.

Свойства эндовибратора

Электромагнитные поля, наблюдаемые на Земле, порождаются различными причинами как земного, так и космического происхождения. Известно, что космические лучи представляют собой ионизирующее излучение, соответствующим образом воздействующее на верхний слой атмосферы. Ионизированный подобным образом верхний слой атмосферы фактически является ионосферой, которая при анализе процессов распространения электромагнитных волн в атмосфере Земли становится определяющим фактором. Высокая ионизация верхнего слоя атмосферы определяет ее способность отражать волны определенной частоты, т.е. не пропускать часть излучения из космоса и отражать часть излучения с Земли [4].

Фактически человек и окружающий его материальный мир объективно существуют в условиях резонатора Земля–ионосфера, т.е. в своеобразной электродинамической системе. В таком резонаторе (эндовибраторе) распространяются электромагнитные волны широкого частотного диапазона (рис.1) [4, 5].

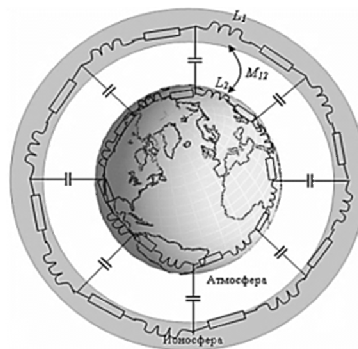


Рисунок 1 – Модель эндовибратора

Для анализа протекающих в атмосфере Земли электромагнитных процессов обычно используют модель базового элемента глобальной атмосферной электрической цепи в виде элементарной эквивалентной электрической ячейки (рис. 2), где L_1 , R_1 и L_2 , R_2 – компоненты электрической ячейки, отражающие процессы соответственно в коре Земли и ионосфере; M_{12} – взаимная индуктивность между компонентами L_1 и L_2 ; R_a и C_a – компоненты электрической ячейки, отражающие процессы в самой атмосфере [6].

В целом колебания электромагнитного поля, обусловленные резонансными свойствами земного шара, носят импульсный характер, и в их спектре одновременно представлены колебания, соответствующие набору резонансных частот эндовибратора.

Подобные электромагнитные волновые процессы вблизи поверхности Земли инициируют соответствующий колебательный обмен между энергией электрического поля, локализованного в атмосфере Земли, и энергией магнитного поля, обусловленного электрическими токами в ионосфере и проводящих слоях коры Земли. Такие колебательные процессы «фактически связаны с периодическим обменом энергией между

реактивными L и C элементами эндовибратора, что в свою очередь и приводит к резонансным явлениям, вызывающим локальные перенапряжения как в атмосфере, так и в коре Земли, которые и приводят к различного» [6] рода атмосферным разрядам.

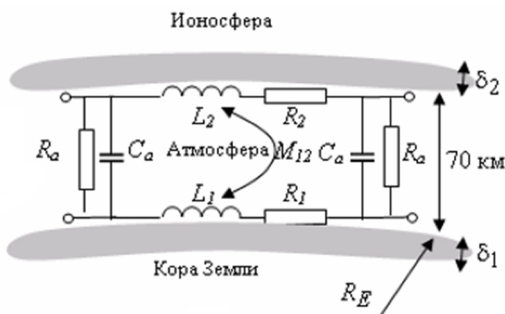


Рисунок 2 – Базовый элемент глобальной литосферно-атмосферно-ионосферной системы

Если рассматривать подобный эндовибратор в качестве грозового электрического генератора, то его режимы функционирования в основном будут зависеть от электрических характеристик грозового облака, которые «в свою очередь определяются пространственно-временной динамикой зарядов и токов, которая однозначно связана с электрическим полем вне облака. Наблюдаемыми вне облака его проявлениями электрической активности являются электрические разряды, формирующие импульсную компоненту возмущений, и относительно регулярные вариации электрического поля, обусловленные распределением и динамикой электрического заряда в облаке» [7].

Следует подчеркнуть, что первопричиной любых электрических разрядов в атмосфере является образование и пространственное разделение положительных и отрицательных зарядов, обуславливающих возникновение сильных электрических полей. Различают четыре разновидности атмосферных разрядов [4, 8]: 1 – коронный и искровой самостоятельные разряды, наблюдаемые в зонах значительной облачности на высотах тропосферы $h \leq 15$ км и длящиеся около 0,2 мс (молнии); 2 – разновидности стримерной короны в области пониженной плотности воздуха, стартующие на вершинах грозовых туч $h \sim 14-18$ км и распространяющиеся вверх до высот $\sim 40-50$ км в виде голубых струй (джеты); 3 – распространяющиеся вниз «высотные заоблачные разряды, возникающие в мезосфере и нижней термосфере на высотах от 50 до 90 км и тесно связанные с молниевой активностью (спрайты), причем в нижней мезосфере» [9] «свечение спрайтов неоднородно и распадается на каналы, похожие на лабораторные стримеры, получаемые при высоком напряжении на электродах» [9]; 4 – кольцеобразные красные свечения в горизонтальной плоскости над спрайтами на высоте ~ 100 км (эльфы).

Из перечисленных заоблачных разрядов наиболее распространёнными являются эльфы (на них приходится $\sim 96\%$), далее идут спрайты ($\sim 3\%$) и джеты ($\sim 1\%$). Все они являются бесшумными и не очень яркими, транзитными (кратковременными), т.е. с продолжительностью свечения, например, для спрайтов 0,01–0,1 с.

Особый интерес для задач разведочной геофизики представляет разновидность атмосферных разрядов в виде молниевых разрядов, т.к. происхождение ЕЭМП атмосферной природы в основном связано именно с грозовой активностью (рис. 3).

Молнии появляются в атмосфере при напряженности электрического поля около 3 кВ/см, что на порядок ниже значения напряженности поля для электрического пробоя воздуха при нормальных условиях ($E \sim 30$ кВ/см) [10].

В общей сложности на Земле происходит порядка 100 грозовых разрядов в секунду. Импульсы грозового разряда следуют в виде отдельных пачек импульсов. За основным разрядом – лидером (предразрядом) следует группа обратных разрядов (возвратный удар) внутри ионизированного канала, образованного лидером, и имеющая длительность 250–500 мс с интервалом между отдельными импульсами около 50 мс. В свою очередь

импульс предразряда всегда имеет двойную полярность и знакопеременную форму, сохраняющуюся с расстоянием и имеющую хорошую регулярность, что позволяет рассматривать импульсы предразряда как квазипериодические.

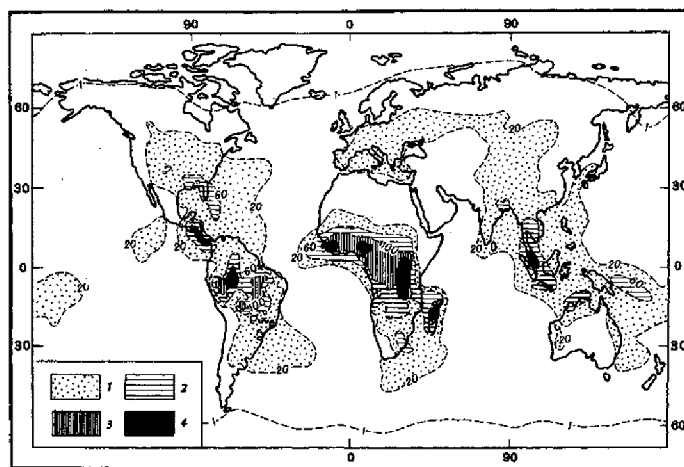


Рисунок 3 – Карта распределения числа дней с грозой по земному шару:
1 – свыше 20; 2 – свыше 60; 3 – свыше 100; 4 – свыше 140

Как известно, «распределения амплитуд импульсов и межимпульсных интервалов для всего времени развития молниевое разряда свидетельствуют в пользу независимости и случайности импульсов. Следует отметить, что параметры данных распределений меняются в ходе развития разряда в части уменьшения характерной амплитуды импульса и характерного межимпульсного интервала к стадии возвратного удара. Характерная длительность наблюдаемых биполярных импульсов составляет сотни наносекунд при наиболее вероятной длительности первого пика около 75 нс на подготовительной стадии разряда, уменьшающейся примерно до 55 нс ближе к стадии возвратного удара.

Квазинепрерывная компонента излучения на подготовительной стадии разряда практически отсутствует и появляется только ближе к возвратному удару, по-видимому, на стадии развития ступенчатого лидера, где ее интенсивность тем не менее остается существенно ниже интенсивности импульсной компоненты. На стадии возвратного удара интенсивность коротковолнового радиоизлучения молнии увеличивается более чем на порядок за счет значительного усиления квазинепрерывной компоненты, которая на этой стадии становится преобладающей» [9].

В целом «под воздействием гроз в верхних частях Земли повсеместно и всегда существует слабое грозовое поле, которое является шумовым. Оно состоит из периодически повторяемых импульсов (цугов), носящих квазисинусоидальный характер с преобладающими частотами от 10 Гц до 10 кГц и напряженностью по электрической составляющей величиной в десятые доли мВ/м» [11].

В общем случае известны три типичные формы грозовых разряда с соответствующими процентными распределениями (рис.4): а – тип a_1 (встречается в 46,4% случаев), имеет самые большие амплитуды вначале; б – тип a_2 (38,3%), имеет более равномерное распределение амплитуды в течение всей длительности; в – тип a_3 (15,3%), характерны самые большие пиковые значения в середине.

Фронты грозовой активности являются источником импульсных электромагнитных волн. Импульсные грозовые разряды порождают широкий спектр электромагнитных колебаний от 0,01 Гц до 10 ГГц и выше, т.е. в область тепловых, световых и рентгеновских электромагнитных колебаний непосредственно в месте разряда. Из всего спектра колебаний ионосферный резонатор выделяет наиболее низкие частоты, т.к. более высокие частоты глубже проникают в ионосферу и сильнее затухают с увеличением

расстояния [12].

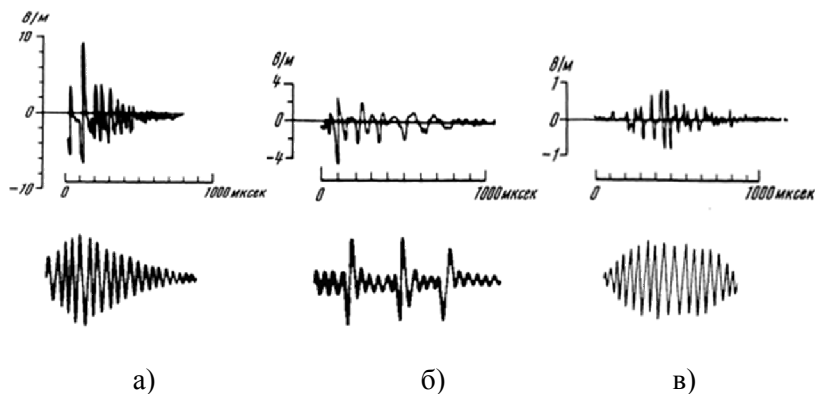


Рисунок 4 – Типичные формы грозových разрядов

Наибольший интерес для изучения представляют электромагнитные излучения в диапазоне КНЧ–ОНЧ (табл. 1), порождаемые в литосферно-атмосферно-ионосферной системе в основном грозowymi очагами Земли [13, 14].

Таблица 1–Таблица частотных диапазонов

Наименование частотного диапазона	Границы диапазона (Гц)	Наименование волнового диапазона	Границы диапазона (км)
Крайние низкие, КНЧ (ELF)	3...30	Декаметровые	100000...10000
Сверхнизкие, СНЧ (SLF)	30...300	Метровые	10000...1000
Инфранизкие, ИНЧ (ULF)	300...3000	Гектокилометровые	1000...100
Очень низкие, ОНЧ (VLF)	3000...30000	Мириаметровые	100...10

Следует отметить, что «при распространении СНЧ–ОНЧ-волны в волноводе Земля-ионосфера часть энергии этой волны проникает через ионосферу в вышележащие слои плазмосферы и магнитосферы (рис. 5), что связано с образованием в нижней ионосфере областей неоднородностей, создаваемых процессами как в литосфере (тектонические разломы, проявления сейсмической активности и др.), так и в зонах повышенной электромагнитной активности (промышленные центры, энергетические объекты, мощные радиостанции)» [15]. Кроме того, «при волноводном распространении основное влияние на амплитудно-частотные характеристики СНЧ–ОНЧ-сигналов оказывают стенки волновода, образованные нижними отражающими слоями ионосферы, главным образом D-слой ионосферы» [10] (характерная высота слоя составляет 60–90 км), и поверхностью Земли.

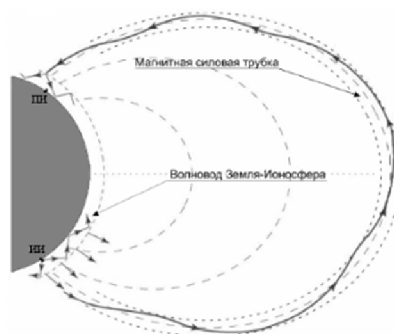


Рисунок 5 – Распространение СНЧ–ОНЧ-излучения: ИИ и ПИ – соответственно источник и приемник излучения

Электромагнитный фон рассматриваемых частотных диапазонов, измеренный в

произвольной точке пространства, содержит информацию о полной активности гроз в каждый момент времени. Это дает основание для использования радиофизических методов локации молний при исследовании мировой грозовой активности.

Диапазон 3–1000 Гц является сверхнизкочастотным по отношению к радиочастотам и «высокочастотным» по отношению к магнитотеллурическим вариациям естественного поля. Низкочастотное электромагнитное поле создается молниевыми разрядами дальних гроз в центрах мировой атмосферно-электрической активности, а также местных гроз. Количество грозовых дней в этих центрах достаточно велико и колеблется от 100 до 240 в году [16].

Спектр ЕЭМПЗ в диапазоне частот 3–100 Гц в значительной мере зависит от частотных характеристик объемного резонатора Земля–ионосфера, имеющего собственную нижнюю резонансную частоту порядка 7 Гц [17, 18]. При распространении электромагнитных волн вдоль земной поверхности поглощение энергии на резонансных частотах эндовибратора минимально. Поэтому на этих частотах повышается спектральная плотность мощности, что особенно заметно на первых частотах эндовибратора $8 \pm 0,1$; $14,1 \pm 0,2$; $20 \pm 0,4$; $26 \pm 0,8$ Гц и т.д. [22].

Важно отметить, что в «атмосфере Земли существует несколько резонаторов для электромагнитных волн различных типов. Одним из таких резонаторов является Шумановский резонатор (ШР) – сферическая полость между Землей и ионосферой. Резонансы в ШР возникают на основной моде волны *E*-типа, имеющей радиальную составляющую электрического поля и горизонтальную – магнитного поля. Собственные частоты этого резонатора без учёта потерь $f_n \approx (c/2\pi R)[n(n+1)]^{1/2}$, где $R=6370$ км – радиус Земли, c – скорость света, $n = 1, 2, \dots$ – целое число, определяющее номер моды колебаний ($f_{n \max} \approx 8, 14, 20, 26, 32, \dots$ Гц.) [22]. Согласно современным представлениям, основными источниками возбуждения ШР являются вертикальные молниевые разряды. Кроме того, определенный вклад могут вносить и электромагнитные колебания, генерируемые в магнитосфере [23]. Характеристики резонансных колебаний существенно зависят от времени суток и сезона. Кроме этих квазипериодических вариаций, наблюдаются значительные (более чем на порядок) возрастания амплитуды колебаний» [9].

Анализ свойств компонент сигналов КНЧ–ОНЧ-диапазонов

Одним из «характерных свойств импульсного излучения молнии является его внезапное начало и слабое изменение интенсивности в течение всего времени развития разряда. Частота следования импульсов остается практически неизменной на подготовительной стадии развития молнии, составляя 30–40 импульсов за миллисекунду. При дальнейшем развитии разряда частота следования импульсов существенно повышается (до 10 раз непосредственно перед возвратным ударом). При этом среднеквадратическая интенсивность излучения меняется незначительно в связи с пропаданием импульсов большой амплитуды» [9].

Наблюдаемый при этом естественный КНЧ–ОНЧ-сигнал морфологически состоит из двух компонент: 1 – фоновый сигнал, формируемый перекрывающимися друг друга КНЧ–ОНЧ-атмосферами, излучаемыми совокупностью разрядов молний, распределенных по поверхности Земли; 2 – СНЧ-всплески, источниками которых служат сверхмощные разряды [9].

Атмосферика представляет собой электромагнитные сигналы от разрядов молний на достаточно большом расстоянии от места их возникновения [13], которым соответствуют частоты резонанса в полости ионосферного волновода 3 Гц – 1 КГц и которые в основном состоят из серии высокочастотных колебаний с преимущественной частотой несколько килогерц и аperiodического колебания – «хвоста» – с преимущественной частотой несколько сот герц [13, 14]. Поэтому электромагнитное поле гроз имеет два максимума спектральной плотности мощности (0,5 – 1 КГц) и (6 – 8

кГц).

По «мере увеличения расстояния от места возникновения разряда до точки приема величина низкочастотного максимума увеличивается, а высокочастотного – уменьшается, т.е. низкочастотный максимум смещается в сторону низких, а высокочастотный – в сторону высоких частот» [18]. Кроме того, «средний уровень поля атмосфериков подвержен заметным суточным и сезонным вариациям, т.е. вектора напряженности электрической (E) и магнитной (H) составляющих не остаются постоянными по амплитуде и направлению. Однако средний уровень напряженности E_{cp} и H_{cp} за время в течение десятка секунд зависит от удельного электрического сопротивления слоев геоэлектрического разреза, над которым ведутся наблюдения, что говорит возможности использования в качестве измеряемых параметрами атмосфериков различные составляющие» [18] E_{cp} и H_{cp} .

В зависимости от генезиса атмосферерики можно условно разделить на следующие типы: сферики (Sferic), или радиоатмосферерики; твики (Tweek), или твик-атмосферерики; вистлер (Whistler), или свистящие атмосферерики.

В случае вырождения импульсного сигнала грозового разряда в низкочастотный сигнал звукового диапазона наблюдается явление свистящих атмосферерики, которые представляют собой электромагнитное излучение, распространяющееся вдоль силовых линий магнитного поля Земли.

Кроме того, каждый удар молнии возбуждает электромагнитный импульс, известный как радиоатмосферик, или сферик, представляющий собой скоротечные широкополосные электромагнитные поля крайне низкой частоты (extremely low frequency), которые распространяются в виде нулевой, или qTEM моды волновода Земля–ионосфера. В общем случае сферики, основная часть энергии которых лежит в полосе частот от 3 Гц до 30 кГц, порождаются, собственно, обратными разрядами. Для практических целей за источник сферика достаточно принимать первый обратный разряд (который превышает последующие в 2–5 раз).

Обобщая, можно констатировать, что сферики порождаются в основном двумя типами молний: 1 – CG-молнии (так называемые *cloud-to-ground*), которые бьют из облаков в Землю и разряжаются на поверхности Земли хотя бы частично; 2 – IC-молнии (*intracloud*), т.е. внутриоблачные молнии.

Наиболее информативными являются атмосферерики, распространяющиеся по трассе, проходящей под ночной ионосферой. Затухание, обусловленное потерями в ионосфере, падает при повышении ее нижней границы в ночных условиях, и наблюдаются так называемые отражательные атмосферерики, или твики. Такие твик-атмосферерики формируются в результате многократного переотражения импульса, излученного разрядом молнии, от земной поверхности и нижней границы ионосферы. Следует отметить, что твик-атмосферерики имеют яркое проявление, как правило, в ночных условиях и отличаются от обычных атмосферерики большей длительностью (10–150 мс).

Кроме того, сферики и твик-атмосферерики, порождаемые разными типами молний, различаются спектральным составом, то есть обладают большим или меньшим присутствием высокочастотных гармоник в составе сигнала. Например, для сфериков, порождаемых CG-молниями, отношение пиковых интенсивностей в полосе ОНЧ – (5,5–9,5 кГц) и СНЧ – (< 1,5 кГц) радиоволн в среднем на 14 % выше, чем для остальных [17]. Кроме того, широкополосные естественные сигналы СНЧ–ОНЧ твик-атмосферерики благодаря частотной дисперсии возможно вычленивать и отдельно исследовать отдельные волноводные моды.

Амплитуды СНЧ-всплесков превышают уровень фона в несколько (до ~10) раз, а интервалы между ними лежат в диапазоне от десятков секунд до нескольких минут. СНЧ-всплески являются изолированными во времени событиями, и координаты их источников, а также параметры распространения СНЧ-радиоволн могут быть определены с помощью

методов, основанных на анализе спектров горизонтального магнитного и вертикального электрического полей.

Следует иметь в виду, что существуют еще и электромагнитные поля, создаваемые промышленными установками, а также длинно- и сверхдлинноволновыми радиостанциями. Напряженность такого рода полей может превосходить уровень ЕЭМП в десятки тысяч раз, но при этом уровень средней напряженности этих полей в полосе 17–23 Гц плавно изменяется во времени. При отсутствии сильных местных гроз эти изменения, как суточные, так и сезонные, незначительны. Интервалы времени, в течение которых уровень средней напряженности подобных полей имеет минимальные значения, для разных районов СНГ неодинаковы, но для одного и того же района временной ход уровня средней напряженности поля повторяется (рис. 6).

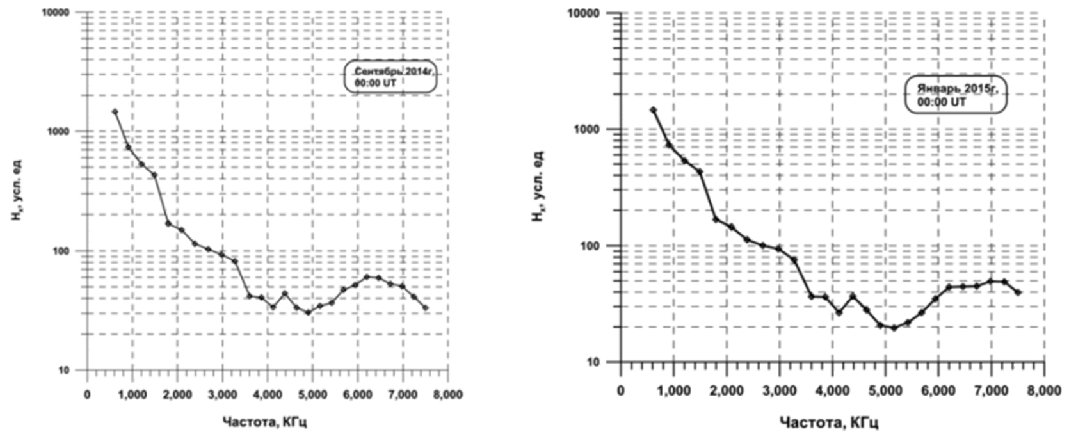


Рисунок 6 – Графики повторяемости средней напряженности магнитного поля

Исходя из свойств КНЧ–ОНЧ-диапазонов, нужно отметить, что при решении отдельных прикладных задач геофизики, ориентированных на применении этих свойств, можно условно разделить весь диапазон на следующие поддиапазоны: 1 – $f_{1д} < 5$ Гц, ограниченный снизу возможностями антенной техники и смыкающийся с «диапазоном частот колебаний теллурических токов и микропульсаций магнитного поля Земли, а сверху он ограничен близостью нижней резонансной частоты земного шара; 2 – $f_{2д} \in [5–50$ Гц], охватывающий практически весь спектр наблюдаемых резонансных частот земного шара и ограниченный сверху частотой силовой сети; 3 – $f_{3д} \in [60$ Гц–3 кГц], ограниченный снизу частотой силовой сети североамериканского континента, а сверху – нижней критической частотой волновода «Земля-ионосфера», которая обычно лежит в пределах 1,5–4,5 кГц в зависимости от состояния ионосферы и свойств подстилающей поверхности; 4 – $f_{4д} \in]3–50$ кГц], для которого характерен волноводный тип распространения радиоволн в сферическом волноводе Земля–ионосфера [20].

Из анализа имеющихся результатов «инструментальных наблюдений ЕЭМП, полученных путем усреднения на месячном интервале интенсивности импульсного потока, можно сделать следующие выводы: 1 – суточные вариации интенсивности ОНЧ-импульсного потока ЕЭМП довольно устойчивы для каждого сезона года, при этом максимум интенсивности в летнее время (период наибольшей местной грозовой активности) в 60–70 раз превышает максимум интенсивности в зимнее время года; 2 – интенсивность импульсного потока ЕЭМП по одинаковым месяцам из года в год имеет сходные суточные вариации с высокими коэффициентами корреляции 0,75–0,98 по обоим направлениям приема север-юг и запад-восток; 3 – преимущественное направление прихода импульсного потока ЕЭМП с направления запад-восток во все сезоны года» [21].

Для «геологической разведки наибольший интерес представляет шумовая составляющая ЕЭМП, которая в диапазоне частот 8–300 Гц максимальна. В разных

районах напряженность ее электрической компоненты меняется от 0,01 до 10 мкВ/м, а магнитной от 10^{-4} до 10^{-3} Гн/м. Так как поле зависит от многих факторов, то мгновенные значения напряженностей электрического и магнитного полей случайным образом изменяются во времени и эллиптически поляризованы в пространстве. Изменения во времени (вариации) средних значений напряженности поля оказываются плавными и не превышают 10–15% за час и 150–170% за сутки, а сезонные и годовые вариации редко превышают 100–200%. Причем летом уровень поля выше, чем зимой, а резкие отклонения от средних значений наблюдаются лишь во время местных гроз и за счет всевозможных промышленных помех» [13, 16].

Исходя из результатов исследований, можно констатировать, что с «началом развития молниевых разрядов отношение средних амплитуд резко возрастает, указывая на импульсный характер излучения. При этом среднеквадратическая амплитуда сигнала увеличивается почти на порядок, а медианная практически не изменяется. Такое поведение отношения средних амплитуд сохраняется вплоть до возвратного удара, вблизи которого оно начинает уменьшаться, возвращаясь к значению, близкому к 1,5, непосредственно во время возвратного удара» [9].

При разработке соответствующих алгоритмов регистрации информационных сигналов следует учитывать тот факт, что в звуковом и субзвуковом диапазоне частот ЕЭМП имеет сложный импульсно-шумовой характер с наибольшей напряженностью шумовой части в диапазоне частот 8–300 Гц.

Заключение

Обобщая, можно констатировать, что, по сути, ЕЭМП представляет собой высокочувствительный вид переносчика информации о земных и космических процессах. Поведение ЕЭМП определяется фактически «тремя основными свойствами среды: удельным электрическим сопротивлением, диэлектрической проницаемостью и магнитной восприимчивостью. Удельное сопротивление в земле варьируется в широком диапазоне, тогда как другие физические свойства, используемые в геофизической разведке, например, акустические волны, плотность, магнитная восприимчивость, обычно варьируются в достаточном ограниченном диапазоне» [24].

«Многие петрофизические параметры влияют на удельное сопротивление, наиболее важными из которых являются наличие воды или углеродов в породе, соленость грунтовых вод, количество электрически проводящих минералов в породе, температура и давление. Все эти факторы делают удельное сопротивление естественным индикатором присутствия во вмещающей среде различного рода месторождений полезных ископаемых. Поэтому при геофизических исследованиях с относительно низкими частотами именно удельное сопротивление является наиболее информативным из физических свойств, характеризующих как вмещающую среду» [22], так содержащиеся в ней структурные компоненты.

Известно, что для однородной среды кажущееся сопротивление равно ее удельному сопротивлению ρ_r , которое в случае горизонтально-слоистой среды зависит от параметров разреза (мощности и сопротивления слоев) и частоты вариаций поля. При этом на поверхности горизонтально-однородной среды напряженность магнитной компоненты поля с точностью до нескольких процентов равна удвоенной величине напряженности возбуждающего поля и не зависит от электрических параметров [22].

На горизонтально-неоднородных средах зависимости между параметрами разреза и компонентами естественного электромагнитного поля более сложные. Отметим только, что магнитная компонента поля при изменении электрических параметров геологического разреза изменяется меньше, чем электрическая. Исключения представляют электропроводящие объекты, над которыми магнитная компонента поля изменяется больше, чем электрическая.

Таким образом, особенности геологического разреза вызывают изменения

абсолютных осредненных величин составляющих электрического и магнитного полей и параметров их абсолютных осредненных эллипсов поляризации. Причем наиболее чувствительной к изменениям электрических параметров разреза является электрическая компонента поля.

Измерения средней напряженности компонент электромагнитного поля в субзвуковом диапазоне частот, выполненные в различных районах стран СНГ, показывают, что электрическая компонента изменяется от сотых долей до единиц микровольт на метр, а магнитная компонента колеблется в пределах 10^{-9} – 10^{-8} Гн/м.

В «целом средние значения напряженности поля и элементов эллипса поляризации зависят от электрических свойств пород вблизи пункта наблюдения. Электрические и магнитные составляющие наиболее чувствительны к изменению электропроводности пород, и над разными геоэлектрическими разрезами они меняются в 2–10 раз, т.е. значительно больше существующих вариаций» [22, 25].

Приведенное в статье обобщение существующих разрозненных и фрагментарных сведений о свойствах ЕЭМП и отдельные сформулированные положения могут быть использованы разработчиками специализированной геофизической аппаратуры, ориентированной на решение существующих геофизических задач.

Литература

1. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1994. – 216 с.
2. Брякин, И. В. Особенности георадиолокационного зондирования / И. В. Брякин // Проблемы автоматики и управления. – 2013. – № 2(25). – С. 111–121.
3. Брякин, И. В. Системы подповерхностного зондирования для малоглубинной геофизики / И. В. Брякин // Проблемы автоматики и управления. – 2015. – № 1(28). – С. 83–93.
4. http://freme.vlsu.ru/trudy_pdf/freme_2016_book_2.pdf (дата обращения: 22.02.22)
5. Александров М.С. Исследование атмосферных радиопомех ОНЧ- и НЧ-диапазонов и их источников // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. № 10. – С. 3–25.
6. Podoltsev A. Global electric rlc -circuit of a system "the earth's crust - atmosphere - ionosphere" and its resonance properties // Технічна електродинаміка. – №2. – 2016. – С. 3–10
7. Козлов. В.И., Муллаяров В.А. Грозовая активность в Якутии. – Якутск: ЯФ Изд-во СО РАН, 2004. – 104 с.
8. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Цыдыпов Ч.Ц., Буянова Д.Г. Естественное электромагнитное поле в Забайкалье. – М.: Наука, 1989. – 112 с.
9. http://voeikovmgo.ru/download/Atm_Elec_conf/AE_tom_1.pdf#6 (дата обращения: 22.02.22)
10. <https://dlib.rsl.ru/01007576171> (дата обращения: 22.02.22)
11. <https://dlib.rsl.ru/01004125548> (дата обращения: 22.02.22)
12. Ремизов Л.Т. Естественные радиопомехи. – М.: Наука, 1985. – 196 с.
13. Блиох П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости земля–ионосфера. – Киев. Наукова думка, 1977. – 200с.
14. Кириллов В.В., Копейкин В.Н., Муштак В.К. Электромагнитные волны СНЧ-диапазона в волноводном канале Земля–ионосфера. // Геомагнетизм и Аэронавигация. – 1997. –Т. 37. –№3. – С. 114–120.

15. http://idg.chph.ras.ru/data_files/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%A0%D1%8F%D1%85%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE.pdf#1 (дата обращения: 22.02.22)
16. Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. – М.: Наука, 1983. –192 с.
17. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. – М.: Научный мир, 1997. – 218 с.
18. <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-osnovy-geofizicheskikh-metodov.pdf>
19. Молчанов О.А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околосферной плазме. – М.: Наука, 1985. –224 с
20. http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-216170906.pdf (дата обращения: 22.02.22)
21. Нагуслаева И.Б., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г. Сезонные и пространственные изменения суточных вариаций ОНЧ импульсного потока естественного электромагнитного поля, регистрируемые на средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия. – Т. 56. – №3. – 2016. – С. 380
22. Башкуев Ю.Б. Электрические свойства природных слоистых сред. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. – 207с.
23. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Ханхараев А.В. Анализ условий распространения СНЧ-радиоволн на трассе «Зевс» – Забайкалье // Известия вузов. – Радиофизика. – Т.XLVI. – № 12. – 2003. – С. 1017–1026.
24. Ангархаева Л.Х., Башкуев Ю.Б., Мельчинов В.П. Обратная задача для слоистой импедансной среды // Радиотехника и электроника. –1997. – Т.42. №10. – С. 1169–1173.
25. Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике. – М.: ГЕОС, 2014. – 360 с.