

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

© 2024 г. Н. Г. Мазур¹, В. А. Пилипенко^{1,2, *}, Е. Н. Федоров¹

¹Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия

²Геофизический Центр РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: pilipenko_va@mail.ru

Поступила в редакцию 17.10.2023 г.

После доработки 26.03.2024 г.

Принята к публикации 27.03.2024 г.

Одной из ключевых проблем при поиске электромагнитных предвестников землетрясений является возможность разделения магнитосферных и сейсмогенных возмущений. Здесь мы приводим результаты модели, которая позволяет численно рассчитать низкочастотные поля на земной поверхности, создаваемые подземным горизонтальным током конечной длины. Эта модель имитирует появление механо-электрических преобразователей при подвижках вдоль разлома на заключительной фазе подготовки землетрясения. Проведенные расчеты показывают несколько характерных особенностей поля подземного источника по сравнению с полем ионосферных возмущений. Если в магнитном поле ионосферного возмущения вертикальная компонента B_z мала по сравнению с горизонтальной B_{\perp} , то для подземного источника $|B_z| > |B_{\perp}|$ вблизи источника. Для ионосферных источников кажущийся импеданс, т.е. отношение $\mu_0 |E_{\perp}| / |B_{\perp}|$, совпадает с поверхностным импедансом Земли Z_g , в то время как импеданс возмущений, возбуждаемых литосферным источником, может в окрестности источника на порядок превышать Z_g . Встречается утверждение, что подземный источник может возбуждать вертикальное электрическое поле E_z значительной величины. Причина этого связывается с условием непрерывности вертикального тока на границе Земля–атмосфера, которая тем самым оказывается мощным “усилителем” поля с коэффициентом порядка отношения комплексных проводимостей земной коры и воздуха. Расчеты показывают, что эти представления оказываются неверными, и вертикальная компонента E_z на земной поверхности имеет такой же порядок величины, что и горизонтальная компонента E_{\perp} . Были предложены использовать градиентные измерения с малой базой, которые подавляли бы вклад крупномасштабных возмущений ионосферного происхождения. Расчет структуры поля показал, что амплитудно-фазовые градиенты в окрестности подземного источника сильно неоднородны и могут дать неоднозначные результаты.

Ключевые слова: электромагнитные предвестники землетрясений, УНЧ излучения, подземный источник.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724060021>, **EDN:** RGXVYB

ВВЕДЕНИЕ: НАБЛЮДЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ УНЧ ПОЛЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Одной из актуальных тем современной геофизики является разработка физических основ оперативного (с горизонтом дни–недели) метода прогноза землетрясений на основе аномальных возмущений электромагнитных полей, который дополнил бы стандартные сейсмические методы [Шуман, 2007; Богданов, Павлович, 2008]. В настоящее время представляется перспективным мониторинг ультранизкочастотных

(УНЧ) широкополосных излучений и импульсов (0.01–10 Гц), источником которых являются динамические процессы в очагах землетрясений [Попов и др., 1994]. Такими процессами могут быть трещинообразование в земной коре [Мастов, Ласуков, 1989], иррегулярное течение поровых флюидов [Fedorov et al., 2001], акустические импульсы раскрывающихся трещин [Сурков, 1997]. Однако оценки суммарных УНЧ электромагнитных полей, генерируемых системой случайно ориентированных трещин, показали, что статистический эффект такого

ансамбля микроизлучателей вдали от очага слишком мал [Surkov, Hayakawa, 2006]. В то же время возможно формирование крупномасштабных токовых систем при подвижках горной среды по разломам при активизации сейсмической активности [Гохберг и др., 1985; Гульельми, Левшенко, 1997]. Такие подвижки можно было бы отслеживать путем регистрации УНЧ импульсов и шумов на земной поверхности [Наумов, 1999; Losseva, Nemchinov, 2005].

Однако ситуация с электромагнитными УНЧ предвестниками остается до сих пор неоднозначной, и высказываются сомнения в достоверности связи обнаруженных УНЧ аномалий с землетрясениями [Thomas et al., 2009; Masci, Thomas, 2015]. Основные сомнения вызывает неубедительность дискриминации сигналов от гипотетических литосферных источников и возмущений от ионосферных токов.

Амплитуда возможных электромагнитных помех, вызванных сейсмической активностью, по-видимому, невелика. Поэтому для уверенной дискриминации сейсмогенных возмущений необходима разработка специальных методов регистрации и анализа данных. Для оценки необходимой интенсивности сейсмического источника аномального излучения, которое могло бы быть обнаружено на земной поверхности, необходимо смоделировать пространственную структуру поля, создаваемого крупномасштабным излучателем сейсмической природы. Теоретическое моделирование позволило бы отбросить нереалистичные физические механизмы – иначе случайные совпадения могут быть восприняты как экспериментальные доказательства. Кроме того, моделирование могло бы подсказать, какие специфические особенности сигналов от подземного излучателя стоит использовать для их дискриминации.

В данной работе предлагается модель, позволяющая численно рассчитывать УНЧ поля от подземного линейного тока конечной длины во всей системе Земля–атмосфера. С помощью моделирования мы попытались дать ответ на следующие вопросы:

– Какова связь между амплитудами электромагнитных возмущений на земле и величиной подземного тока?

– Каков кажущийся импеданс, т.е. отношение между горизонтальными электрической и магнитной компонентами $\mu_0 |\mathbf{E}_\perp| / |\mathbf{B}_\perp|$, для сигнала от подземного источника?

– Каково соотношение вертикальных и горизонтальных составляющих возмущения электромагнитного поля?

– Можно ли по картине горизонтальных магнитных возмущений на земле локализовать “эпицентр” подземного излучателя?

– Каких амплитудно-фазовых градиентов следует ожидать от литосферного источника?

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПОДЗЕМНОГО ТОКОВОГО ИСТОЧНИКА

Мы используем модель, которая позволяет численно рассчитать УНЧ поля на земной поверхности, создаваемые подземным линейным током конечной длины. Численная модель основана на математическом формализме, разработанном в работе [Федоров и др., 2022] для горизонтально-слоистых сред. Ось z декартовой системы координат направлена вертикально вверх ($z = 0$ на поверхности Земли), а ось x – на восток и ось y – на север (рис. 1). Для простоты принимается, что геомагнитное поле вертикально, т.е. его наклонение $I = 90^\circ$. Атмосферная проводимость вблизи земной поверхности принимается равной $\sigma_a = 10^{-14}$ См/м и не меняется по высоте. Таким образом, фактически рассматривается двухслойная модель Земля–атмосфера.

Нестационарный линейный ток расположен на глубине $z = -h$ под поверхностью в однородной Земле с проводимостью σ_g и направлен вдоль оси x . Задача состоит в нахождении электромагнитного поля $\mathbf{B}(x, y, z, t)$ и $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ на границе Земля–атмосфера, возбуждаемого подземным гармоническим источником $J(t) = J_0 \exp(-i\omega t)$. Механо-электрические преобразования в земной коре генерируют заданный ток $J(t)$, который затем замыкается токами проводимости в земной коре и частично просачивается в атмосферу. Эта система осциллирующих токов создает электромагнитное поле в атмосфере и земной коре, которое и определяется с помощью численной модели. Эта модель была использована в работе [Мазур и др., 2024], в которой рассматривался вопрос о том, может ли излучение гипотетического источника в очаге землетрясения быть ответственным за “предвестниковые” УНЧ сигналы, регистрируемые на низкоорбитальных спутниках.

Для нахождения электромагнитного поля тока конечной длины L можно использовать результаты, полученные для горизонтального

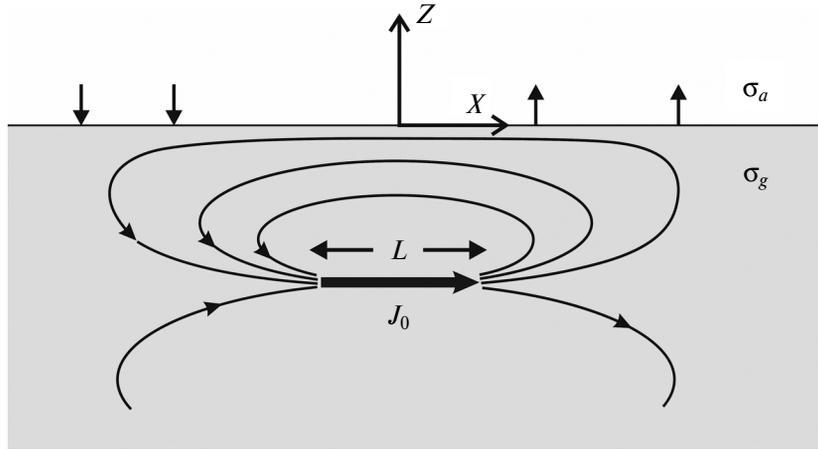


Рис. 1. Схема модели для численного расчета УНЧ поля на земной поверхности, создаваемого подземным горизонтальным током конечной длины.

токового диполя $\mathbf{j}_\perp = j_x \hat{\mathbf{x}} = M_0 \delta(x) \delta(y) \delta(z-h) \hat{\mathbf{x}}$, где $M_0 = J_0 L$ – токовый момент. С этой целью достаточно расположить большое число диполей плотно вдоль линии тока и численно просуммировать создаваемые ими поля. Численная модель дает решение уравнений Максвелла

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 (-i\omega \hat{\mathbf{e}} \mathbf{E} + \mathbf{j}), \quad \nabla \times \mathbf{E} = i\omega \mathbf{B} \quad (1)$$

с током источника \mathbf{j} . Здесь $\hat{\mathbf{e}} = \epsilon_0 \hat{\epsilon}_r$, где $\hat{\epsilon}_r$ – тензор относительной диэлектрической проницаемости; ϵ_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума. Диагональные элементы тензора $\hat{\epsilon}_r$ равны $\epsilon_r = \text{Re} \epsilon_r + i\sigma / (\omega \epsilon_0)$, где σ – проводимость среды, а его недиагональные элементы равны нулю.

При решении задачи использовано представление электромагнитного поля через потенциалы, при этом сторонний ток и возбуждаемые им поля разбиваются на потенциальную и вихревую составляющие. Полная задача, очевидно, лишена осевой симметрии, тогда как потенциальная и вихревая составляющие в отдельности такой симметрией обладают. Это позволяет разделить переменные с помощью преобразования Ганкеля и прийти к краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

Рассчитанные компоненты поля соответствуют току источника $J_0 = 1$ А с длиной $L = 20$ км, находящимся на глубине 20 км ($h = -20$ км). Проводимость Земли $\sigma_g = 10^{-3}$ См/м, и $\text{Re} \epsilon_g = 10$. Для учета нестационарности источника предполагается, что ток осциллирует с частотой $f = 0.1$ Гц, чему соответствует скин-длина $\delta_g = 50$ км.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ СЕЙСМОГЕННЫМ ТОКОМ

Для оценки электромагнитного отклика на земной поверхности обычно использовались аналитические решения задачи о поле заглубленного диполя [Бурсиан, 1972; Honkura and Kuwata, 1993]. Однако в реальных условиях длина разлома, а значит и масштаб гипотетического сейсмогенного тока, может достигать нескольких десятков километров. Поэтому модель точечного диполя не позволяет получить корректную оценку.

Характерные особенности электромагнитного поля подземного источника конечной длины можно увидеть из рис. 2 и рис. 3, на которых показано пространственное распределение горизонтальной и вертикальной магнитной и электрической составляющих на земной поверхности ($z = 0$) в направлении (а) вдоль тока (ось x) и (б) поперек него (ось y).

Пространственная структура амплитуд горизонтальной $|B_y(x, y)|$ и вертикальной $|B_z(0, y)|$ магнитных компонент представлена на рис. 2. В рассматриваемой двухслойной модели из-за симметрии в направлении вдоль тока ($y = 0$) имеем $B_x = 0$ и $B_z = 0$, а поперек тока ($x = 0$) – $B_x = 0$. Максимальной величины ~ 2 пТл магнитное поле достигает непосредственно над токовым источником при $x = 0$ (рис. 2а). Можно показать, что компонента $B_y(x)$ на больших расстояниях ($x > 200$ км) затухает по степенному закону $|B_y(x, 0)| \sim x^{-3}$. Для направления поперек тока источника ($x = 0$) компонента $B_y(y)$

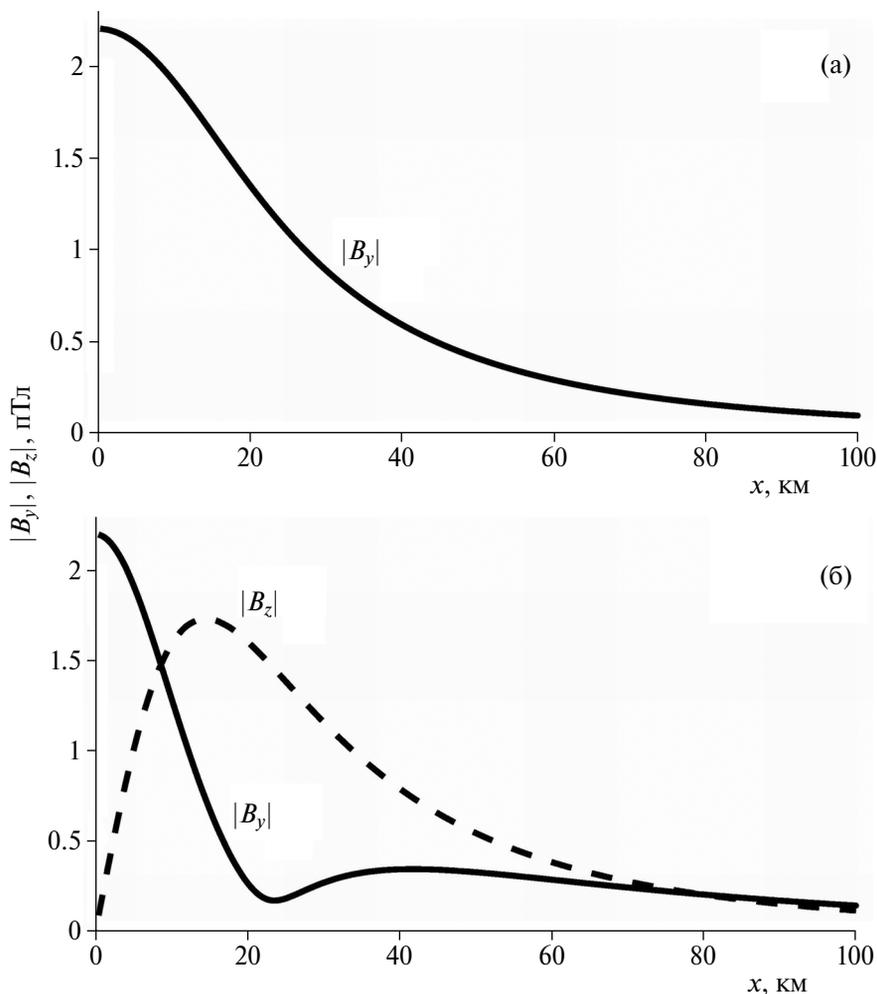


Рис. 2. Пространственное распределение горизонтальной и вертикальной магнитных составляющих на земной поверхности ($z=0$) в направлении вдоль тока (ось x) – (а) и поперек него (ось y) – (б). Параметры источника и среды: $h=-20$ км, $L=20$ км, $J_0=1$ А, $f=0.1$ Гц, $\sigma_g=10^{-3}$ См/м.

вдали от источника затухает по мере удаления по тому же закону (рис. 2б).

Пространственная структура амплитуд вертикальной $|E_z(x,0)|$ и горизонтальной $|E_x(x,y)|$ компонент электрического поля на поверхности Земли показана на рис. 3. Вдоль тока ($y=0$) из-за симметрии составляющая $E_y=0$ и не показана (рис. 3а). Аналогично, не показаны компоненты $E_y=E_z=0$ для направления поперек тока ($x=0$). Максимальная величина горизонтальной компоненты достигает ~ 0.3 мкВ/м над источником. Амплитуда компоненты $|E_x(x,0)|$ на больших расстояниях ($x > 200$ км) затухает по степенному закону $\propto x^{-3}$.

Локальные минимумы магнитного поля $B_y(0,y)$ при $y \sim 22$ км и электрического поля $E_x(x,0)$ при $x \sim 18$ км обсуждаются в последующих разделах.

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ВЕРТИКАЛЬНОЙ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТАМИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Соотношение между вертикальной и горизонтальной магнитными компонентами можно видеть на рис. 2б. Величина вертикальной компоненты $|B_z(y)|$ над источником проходит через нуль и достигает максимума ~ 1.8 пТл на расстоянии ~ 18 км. Расчеты показывают характерную особенность поля подземного источника по сравнению с полем падающих сверху магнитосферно-ионосферных возмущений. При типичных масштабах этих возмущений и проводимости подстилающей земной поверхности их вертикальная составляющая мала по сравнению с горизонтальной: $|B_z|/|B_\perp| \sim \delta_g/\lambda \ll 1$, где λ – горизонтальный масштаб возмущения [Pilipenko et al., 1998]. Структура же поля подземного источника такова, что

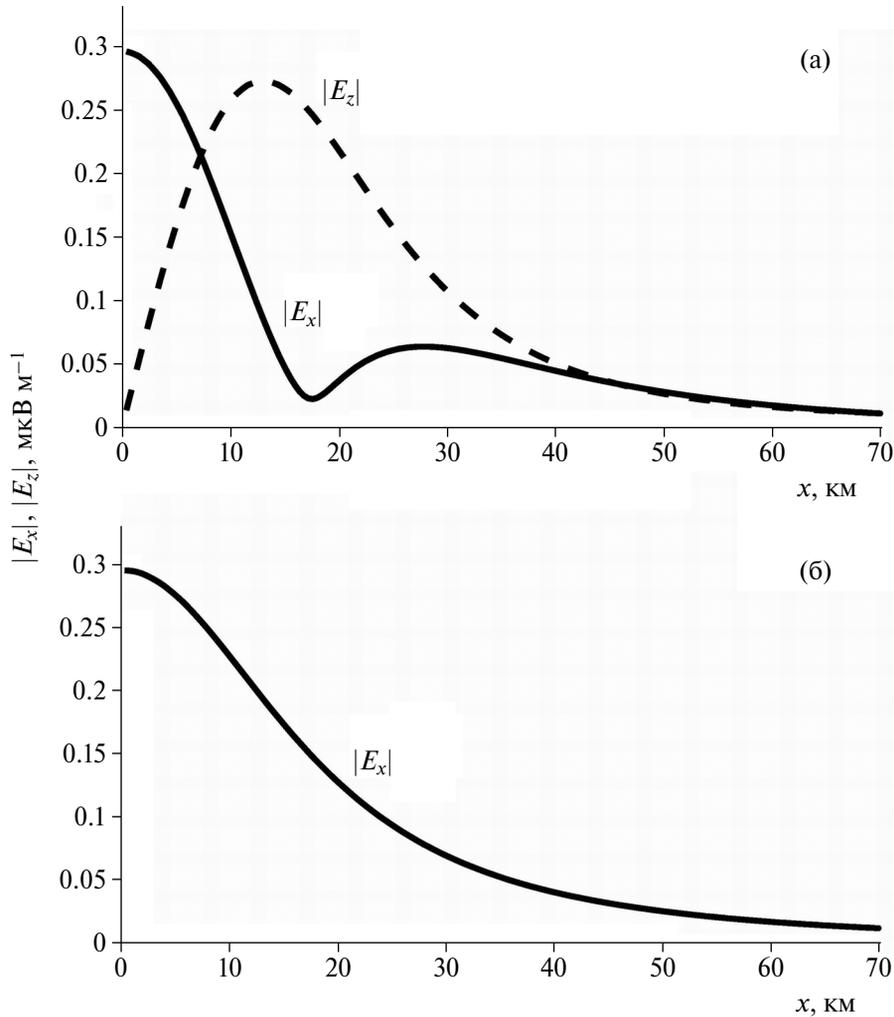


Рис. 3. Пространственное распределение горизонтальной и вертикальной составляющих электрического поля возмущения на земной поверхности ($z=0$) в направлении вдоль тока (ось x) – (а) и поперек него (ось y) – (б). Параметры источника и среды те же, что на рис. 2.

вблизи источника на удалении 10–60 км $|B_z| > |B_y|$ (рис. 2б). Эту особенность пытались использовать для выделения сейсмогенных сигналов перед сильными землетрясениями [Nobara et al., 2004; Li et al., 2011; Kanata et al., 2014]. Однако как показывают расчеты, эта особенность поляризации структуры магнитного поля проявляется только в окрестности источника, а на удалении $|y| > 80$ км ситуация меняется: структура поля становится подобной полю ионосферных источников с $|B_z| < |B_y|$.

КАЖУЩИЙСЯ ИМПЕДАНС ПОЛЯ ПОДЗЕМНОГО ИСТОЧНИКА

Укажем на еще одну особенность, которую можно использовать для разделения магнитосферных и сейсмогенных возмущений:

соотношение между кажущимся импедансом (отношение спектральных амплитуд горизонтальной электрической E_{\perp} и магнитной B_{\perp} компонент) и поверхностным импедансом Земли $Z_g(\omega) = \sqrt{-i\omega\mu_0/\sigma_g}$ [Pilipenko et al., 2005]. Амплитуда кажущегося импеданса сейсмогенных возмущений на частоте 0.1 Гц, рассчитанная по модельным значениям магнитного и электротеллурического полей $|Z_{xy}| = \mu_0 |E_x/B_y|$, представлена на рис. 4.

Для магнитосферных источников кажущийся импеданс практически для всех реальных условий совпадает с поверхностным импедансом Земли Z_g . Напротив, для подземного источника кажущийся импеданс наземного отклика почти на порядок может превышать поверхностный импеданс, который для заданной частоты и проводимости составляет $Z_g = 0.028$ Ом. Однако на

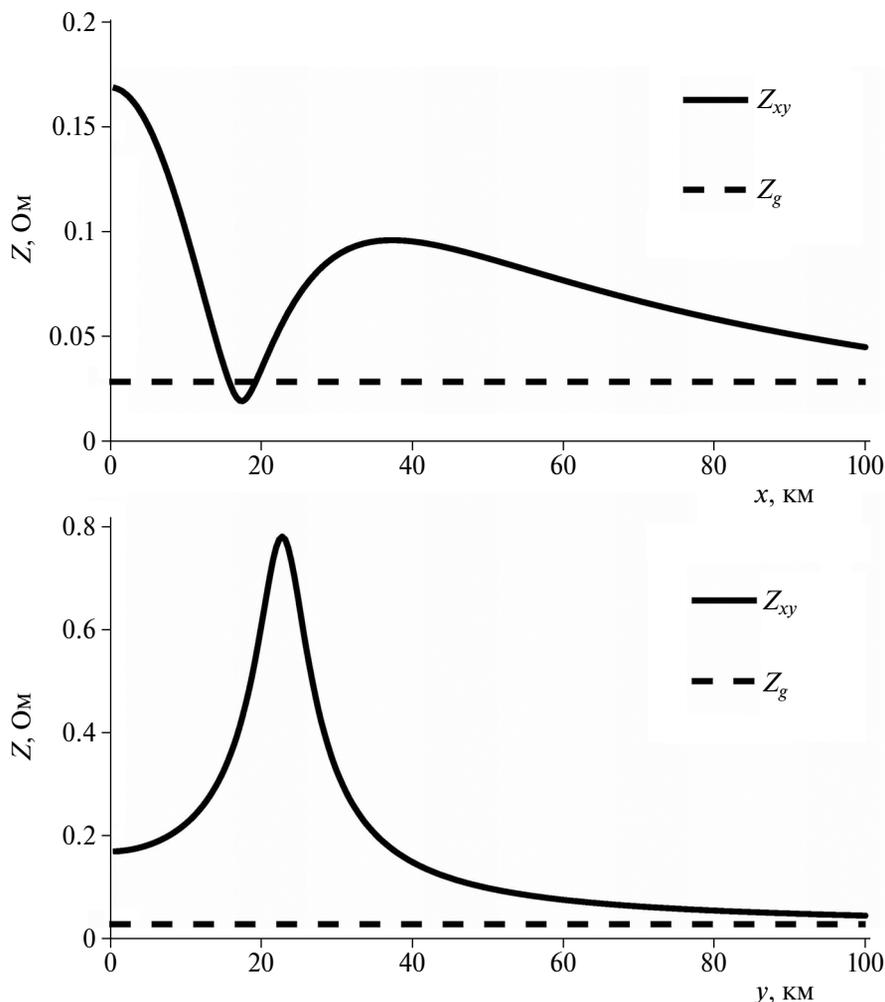


Рис. 4. Пространственное распределение кажущегося импеданса $|Z_{xy}| = \mu_0 |E_x/B_y|$ сейсмогенных возмущений на частоте 0.1 Гц в направлении вдоль тока (верхняя панель) и поперек него (нижняя панель). Импеданс Земли $Z_g = 0.028$ Ом показан штриховой линией. Параметры источника и среды те же, что на рис. 2.

значительном удалении от источника (> 90 км) кажущийся импеданс возмущения стремится к Z_g . Таким образом, определение импеданса зарегистрированных возмущений при синхронных электротеллурических и геомагнитных наблюдениях могло бы эффективно выделять возмущения от близких сейсмогенных источников.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ КОМПОНЕНТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В геофизической литературе часто встречается утверждение, что подземный источник создает на поверхности вертикальное электрическое поле E_z значительной величины [Finkelstein, Powell, 1970]. Причина этого связывается с условием непрерывности вертикального тока на границе Земля–атмосфера, при этом скачок E_z оценивается из соотношения

$\tilde{\sigma}_a E_z(z = +0) = \sigma_g E_z(z = -0)$, где комплексная проводимость с учетом тока смещения $\tilde{\sigma} = \sigma - i\omega\epsilon_0$.

Авторы работы [Алексеев, Аксенов, 2003] утверждают, что из-за непрерывности вертикального тока земная поверхность является мощным “усилителем” вертикального электрического поля. В качестве коэффициента такого усиления дается отношением проводимостей земной коры и воздуха в приземном слое атмосферы $|\sigma_g/\tilde{\sigma}_a| \gg 1$. Поэтому авторы предложили для наблюдения за ростом напряжения в земной коре в процессе подготовки землетрясения вести мониторинг E_z . По расчетам авторов при горизонтальном теллурическом поле $|E_{\perp}| \sim 10$ мВ/м, величина E_z должна достигать $\sim 10^3$ В/м. Тем более, что возмущения E_z , создаваемые ионосферными УНЧ источниками,

малы [Pilipenko et al., 2021]. Поскольку этот вопрос имеет принципиальное значение для стратегии поиска и выделения сейсмо-электромагнитных эффектов, уделим ему особое внимание.

Наше моделирование показало, что представление о границе раздела Земля–атмосфера как “усилителе” E_z неверно. Вертикальный ток, текущий из глубины земной коры, приближаясь к границе Земля–атмосфера, резко отклоняется в сторону, т.к. “не хочет” течь в плохо проводящую атмосферу. В результате значительная часть тока отклоняется в горизонтальном направлении, и только малая часть вертикального тока ($\sim \omega \epsilon_0 / \sigma_g$) просачивается в атмосферу. И хотя компонента E_z , связанная с этим током, испытывает скачок на границе, но в общей структуре поля вертикальное поле в воздухе над поверхностью Земли оказывается по величине примерно таким же, как и горизонтальное теллурическое поле.

Как видно на рис. 3а, максимальная амплитуда вертикальной составляющей оказывается примерно равной амплитуде горизонтальной составляющей $\max E_z(x) \sim \max E_x(x) \sim 0.3$ мкВ/м. При этом подземный источник создает максимальное магнитное возмущение ~ 2 пТл (рис. 2). Для ожидаемых сейсмо-магнитных возмущений с амплитудами ~ 2 нТл, возмущение электрического поля должно быть $E_z \sim E_x \sim 0.3$ мВ/м. Горизонтальная компонента такого порядка величины может быть измерена на протяженной

дипольной установке. Однако зарегистрировать вертикальное поле такой величины нереально, т.к. уровень шума при измерениях вертикального электрического поля имеет порядок нескольких В/м.

ВЕКТОРНОЕ ПОЛЕ ВОЗМУЩЕНИЯ И ЛОКАЦИЯ ЭПИЦЕНТРА ИЗЛУЧЕНИЯ

Структуру токов литосферного источника вблизи земной поверхности можно представить по двумерной картине нормированных векторов горизонтального электрического поля (рис. 5). Над источником (серая полоса) преобладают токи, которые замыкают вытекающие и втекающие из концов источника токи. Вдали же от источника преобладают токи растекания, направленные в обратную сторону. В результате, при удалении на ~ 20 км вдоль оси x токи меняют направление. Там, где электрическое поле меняет знак, амплитуда проходит через минимум, и образуется максимальный градиент. Эта особенность структуры поля отмечалась ранее при рассмотрении рис. 2б и рис. 3а.

Магнитный эффект на поверхности земли создается совместно током источника и токами растекания в земле. Мгновенный снимок пространственной структуры вектора горизонтального магнитного возмущения \mathbf{V}_\perp представлен на рис. 6. Непосредственно над источником магнитное поле ориентировано преимущественно

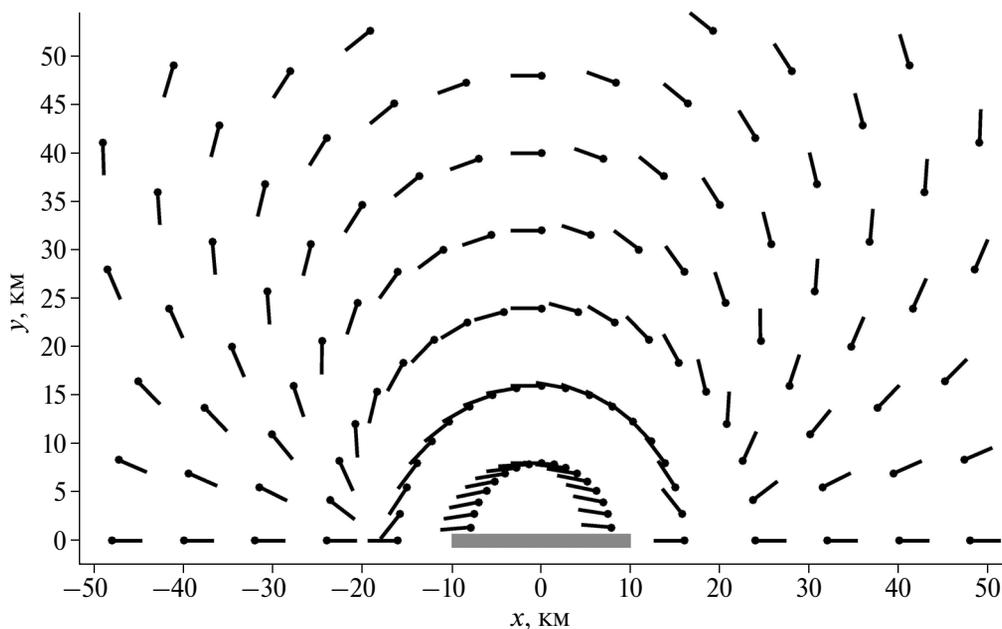


Рис. 5. Поле направлений векторов горизонтального электрического поля $\mathbf{E}_\perp / |\mathbf{E}_\perp|^{-1}$ литосферного источника на земной поверхности. Проекция на земную поверхность подземного тока показана толстой серой линией.

поперек направления тока. В направлении вдоль тока источника векторы горизонтального магнитного возмущения ортогональны радиус-вектору от источника.

Ориентацию вектора горизонтального магнитного возмущения было предложено использовать для определения направления на эпицентр предстоящего землетрясения [Schekotov et al., 2008]. Однако наше моделирование показало, что поляризация возмущения не может быть универсальным рецептом. Лишь в секторе, направленном вдоль тока, вектор магнитного возмущения ортогонален радиус-вектору, тогда как в направлении поперек тока источника ориентация возмущения может меняться с расстоянием.

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЕ ГРАДИЕНТЫ МАГНИТНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ

Были предложения использовать градиентные измерения с малой базой (не более нескольких километров), чтобы подавить вклад крупномасштабных возмущений ионосферного происхождения [Крылов, Левшенко, 1990; Исмагилов

и др., 2006]. Метод обосновывался следующим физическим соображением. Электромагнитное УНЧ возмущение в однородном проводящем пространстве подчиняется дисперсионному уравнению $k_g^2 = i\mu_0\omega\sigma_g$, где k_g – волновой вектор возмущения. При распространении поля в проводящей среде, помимо затухания амплитуды с масштабом $\delta_g = \sqrt{2/\mu_0\omega\sigma_g}$, происходит и изменение фазы, соответствующее кажущейся фазовой скорости $U_g = |\omega/k_g| = \sqrt{\omega/(\mu_0\sigma_g)}$. Эта скорость соответствует импедансной скорости, выражение для которой формально следует из формулы для поверхностного импеданса проводящего полупространства $U_g = |\mu_0^{-1}Z_g(\omega)|$. Обнаружение такой кажущейся скорости наземных магнитных возмущений должно было бы свидетельствовать об их литосферном происхождении. Измеренные градиенты амплитуды и фазовые скорости сигналов в диапазоне 0.1–0.4 Гц в сейсмоактивном регионе Японии, которые приписывались сейсмическому источнику, составляли около ~ 0.1 пТл/км и ~ 20 м/с [Kopytenko et al., 2006].

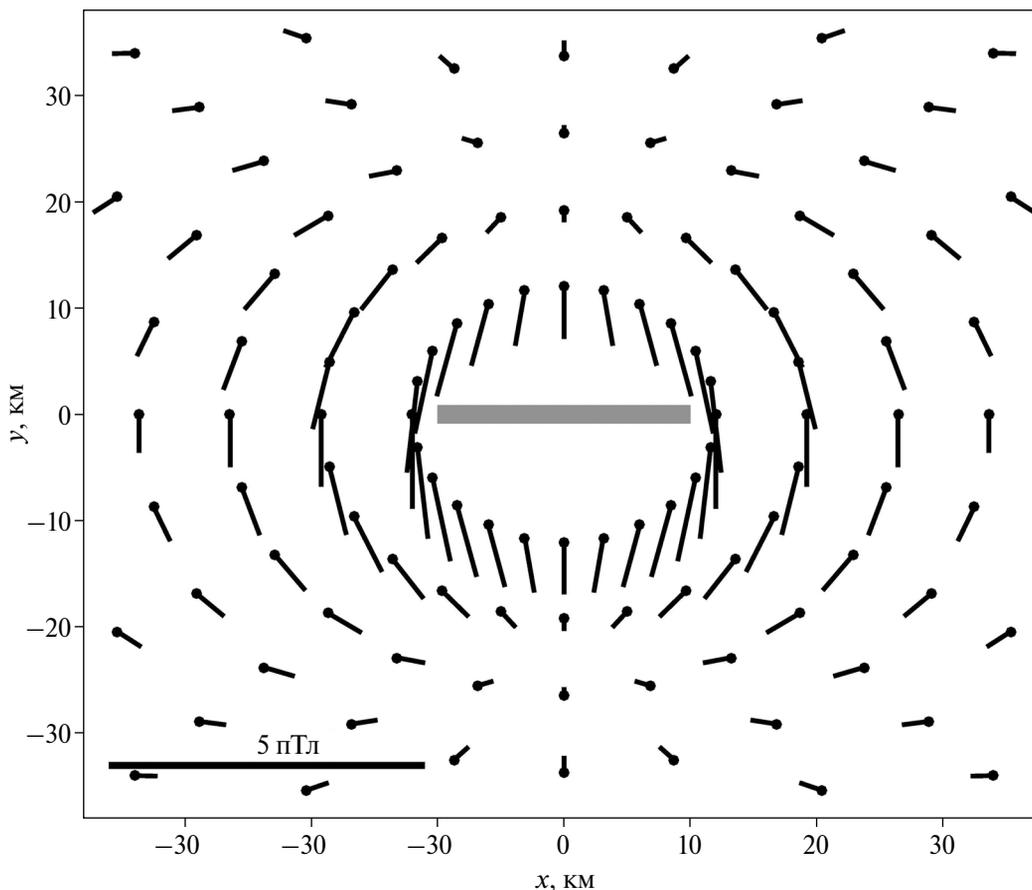


Рис. 6. Мгновенный снимок векторов горизонтального магнитного возмущения \mathbf{B}_\perp .

Рассчитанное по модели изменение локального градиента амплитуды и фазы горизонтальной компоненты $B_y(x, y)$ показано на рис. 7. Вертикальная компонента магнитных возмущений, как правило, сильно зашумлена, и по ней проводить градиентные измерения не имеет смысла. Градиент амплитуды горизонтальной составляющей меняется вдоль земной поверхности и достигает экстремального значения $|dB_y/dx| \sim 0.1$ пТл/км и $|dB_y/dy| \sim 0.25$ пТл/км на расстоянии ~ 10 – 15 км от источника с $J_0 = 1$ А, а на больших удалениях становится совсем малым (рис. 7, верхняя панель). Градиент фазы горизонтальной компоненты $\text{Arg} B_y$ увеличивается с удалением от источника и достигает экстремального значения ~ 35 град/км на расстоянии $y \sim 23$ км, а затем снова уменьшается. Вдоль оси x фазовые градиенты значительно меньше, а именно < 1 град/км (рис. 7, средняя панель). Таким образом, расчеты показывают, что заметные градиенты амплитуды и фазы могут быть зарегистрированы только в непосредственной

близости от источника, не более чем на удалении 25 км, и структура поля градиентов сильно анизотропна относительно направления тока источника. Локальные значения кажущейся фазовой скорости (рис. 7, нижняя панель) только по мере удаления от источника (> 40 км) падают от величины $\sim 10^3$ км/с до величины $U_g = 32$ км/с.

ОБСУЖДЕНИЕ: РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В данной статье описаны результаты расчета наземных электромагнитных полей, создаваемых подземным током конечной длины. Для выделения таких возмущений представляются перспективными методы, основанные на следующих особенностях поля от литосферного источника:

- импеданс $\mu_0 |E_{\perp}| / |B_{\perp}|$, превышающий на порядок импеданс магнитосферно-ионосферных возмущений;
- конечное значение отношения $|B_z| / |B_{\perp}|$;

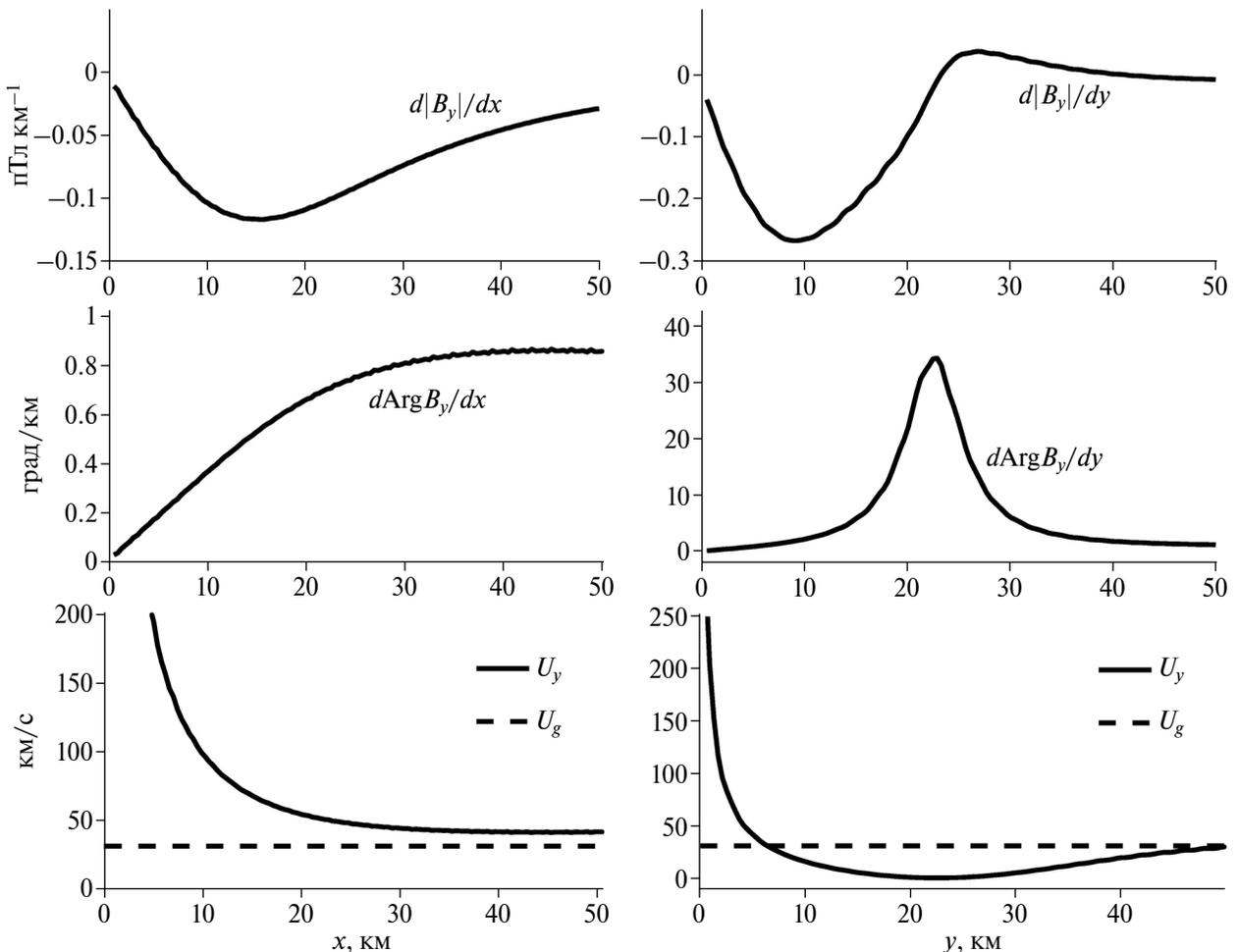


Рис. 7. Изменение локального градиента амплитуды и фазы горизонтальной компоненты $B_y(x, y)$ и кажущейся фазовой скорости в направлении вдоль тока (слева) и поперек него (справа).

– фазовые градиенты в частотной области вне резонансной частоты магнитосферного резонатора.

Однако методы, основанные на этих пространственно-поляризационных особенностях, могут быть эффективными только в непосредственной близости к эпицентру (удаление не более нескольких десятков километров). На более значительных расстояниях эти величины становятся такими же, как и для поля ионосферных источников.

В то же время предложенный подход к выделению сейсмогенных сигналов по большой величине вертикальной компоненты E_z нам представляется неперспективным. Численное моделирование показало, что подземный источник создает возмущение электрического поля, в котором $|E_z| \sim |E_{\perp}|$. Безусловно, мониторинг атмосферного электрического поля является важным направлением поиска предвестников землетрясений, поскольку оно служит индикатором выхода радиоактивных эманаций и образования аэрозолей в ходе развития сейсмического процесса. Однако рассчитывать на обнаружение интенсивных всплесков E_z от подземных источников не приходится.

В качестве первого шага мы рассматривали источник как гармонический генератор. В действительности сейсмогенный источник может быть импульсным, например, сопровождающим скачкообразное движение по разлому. Этот процесс должен описываться нестационарной пространственно-временной моделью, которую мы надеемся изучить в дальнейшем. Возмущение магнитного поля должно распространяться диффузионным образом и расширяться со временем t как $\Delta\rho \approx \sqrt{Dt}$, где $D = (\mu_0\sigma_g)^{-1}$ – коэффициент магнитной диффузии [Losseva, Nemchinov, 2005]. Результаты расчетов для гармонического источника с частотой f можно качественно перенести для импульсного источника с характерной длительностью порядка $1/f$.

Задача о поле протяженного подземного источника рассматривается в ряде монографий. Книга [King et al., 1992] посвящена аналитическому вычислению электромагнитного поля точечного электрического диполя, расположенного под поверхностью, в рамках модели двух однородных полупространств. К системе уравнений Максвелла применяется преобразование Фурье по горизонтальным координатам, после чего явно решается (в виде комбинации экспонент) система обыкновенных дифференциальных уравнений с кусочно-постоянными

коэффициентами по переменной z для пространственных спектров. При обратном преобразовании Фурье, после перехода к полярным координатам и интегрирования по углу, возникают интегралы, содержащие функции Бесселя (интегралы Зоммерфельда), формально представляющие точное решение задачи. Далее эти интегралы приближенно вычисляются в предположении достаточной удаленности точки наблюдения поля от источника $\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \geq 5|h|$. Однако полученные приближенные решения чрезвычайно громоздки, в связи с чем их применение никак не облегчает расчет по сравнению с численными моделями. Их использование оправдано только для выяснения асимптотического поведения решений на больших расстояниях, в то время как для рассматриваемой задачи наиболее важна оценка поля именно вблизи источника. Мы сравнили приближенные явные выражения из книги [King et al., 1992] с результатами нашей численной модели. Численные расчеты идеально согласуются с точными интегральными формулами, но громоздкие приближенные формулы, как и следовало ожидать, дают удовлетворительную точность только для больших расстояний (>50 км). Это же относится и к более поздним исследованиям, описанным в монографии [Pan, Li, 2014], где рассмотрена трехслойная модель системы Земля–атмосфера–ионосфера и получены аналитические формулы для всех компонент поля, генерируемого горизонтальным токовым диполем. Точные формулы имеют вид очень сложных интегралов Зоммерфельда (еще более громоздких, чем в книге [King et al., 1992]), а получаемые из них приближенные выражения справедливы лишь на достаточно большом расстоянии от источника.

Мы же предпочитаем количественные результаты получать путем численного решения дифференциальных уравнений и интегральное преобразование Ганкеля выполнять численно. Этот подход намного менее трудоемок и более надежен, т.к. при выводе столь громоздких формул трудно избежать ошибок в выкладках и программировании. Численный способ решения легко обобщается на случай произвольного вертикального распределения параметров как в атмосфере и ионосфере, так и в земной коре, когда о явных аналитических формулах говорить не приходится. В частности, разработанная численная схема позволяет провести расчеты для неоднородного по глубине строения земной коры, например, учесть наличие проводящего

осадочного слоя и высокоомной мантии. Вероятно, изменения вертикального профиля проводимости земной коры могут изменить амплитуду наземного электромагнитного отклика, но не его пространственную и поляризационную структуру.

Разумеется, предположение об источнике сейсмогенных возмущений как горизонтальном крупномасштабном токе является весьма спекулятивным. Например, процесс разделения зарядов, который может происходить на границах деформируемых блоков земной коры, в работе [Лосева и др., 2012] моделируется как система электрических диполей, распределенных по поверхности блока. При этом момент электрического диполя определяется скоростью деформации поверхности блока, а суммарное излучаемое поле растет с увеличением размера блока. В дальнейшем только лабораторные и полевые исследования смогут определить возможные типы механо-электромагнитных преобразователей в земной коре. Тем не менее, качественные особенности поля подземного источника, описанные в данной работе, могут сохраниться и для других возможных типов литосферных источников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана численная модель расчета электромагнитных полей в связанной системе Земля–атмосфера, создаваемых подземным горизонтальным током конечной длины. Эта численная модель используется для расчета пространственной структуры поля на земной поверхности. Моделирование демонстрирует характерные особенности УНЧ излучения в окрестности подземного источника в амплитудно-фазовых градиентах, кажущихся импедансах и в величинах отношения $|B_z|/|B_\perp|$. Эти особенности могут быть использованы для обнаружения слабых сейсмогенных возмущений при поисках электромагнитных УНЧ предвестников землетрясений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем признательность рецензентам за конструктивные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзаданий ИФЗ и ГЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.С., Аксенов В.В.* Об электрическом поле в эпицентральной зоне землетрясений // Докл. РАН. 2003. Т. 392. №1. С. 106–110.
- Богданов Ю.А., Павлович В.Н.* Неравновесное излучение земной коры – индикатор геодинамических процессов // Геофизический журнал. 2008. Т. 30. №4. С. 12–24.
- Бурсиан В.Р.* Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. Л.: Недра. 1972. 368 с.
- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Гершензон Н.И., Пилипенко В.А.* Эффекты электромагнитной природы при разрушении земной коры // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1985. № 1. С. 72–87.
- Гульельми А.В., Левшенко В.Т.* Электромагнитные сигналы от землетрясений // Физика Земли. 1994. № 5. С. 65–70.
- Исмагилов В.С., Копытенко Ю.А., Хаттори К. и др.* Использование градиентов и фазовых скоростей УНЧ геомагнитных возмущений для определения местоположения очага будущего сильного землетрясения // Геомагнетизм и аэрномия. 2006. Т. 46. № 3. С. 423–430.
- Крылов С.М., Левшенко В.Т.* О сверхнизкочастотном электромагнитном излучении литосферного происхождения // Докл. АН СССР. 1990. Т. 311. № 3. С. 579–582.
- Лосева Т.В., Спивак А.А., Кузьмичева М.Ю.* Дипольная модель генерации электрических импульсов при релаксационных процессах в земной коре // Докл. РАН. 2012. Т. 442. № 3. С. 401–404.
- Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., Боровлева К.Е.* Электромагнитные УНЧ поля на земной поверхности и в ионосфере от подземного сейсмического источника // Физика Земли. 2024. № 2. С. 3–15.
- Мастов Ш.Р., Ласуков В.В.* Теоретическая модель генерации электромагнитного сигнала в процессе хрупкого разрушения // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1989. № 6. С. 38–48.
- Наумов А.П.* Импульсные низкочастотные сейсмомагнитные сигналы в геомагнитных вариациях как метод прогноза землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1999. Т. 20. С. 743–752.
- Попов А.М., Найдич В.И., Храмов А.А., Лепина С.В.* Электромагнитные предвестники и физика очага землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4-5. С. 134–143.
- Сурков В.В.* О природе электромагнитных предвестников землетрясений // Докл. РАН. 1997. Т. 355. № 6. С. 945–947.
- Фёдоров Е.Н., Мазур Н.Г., Пилипенко В.А.* Электромагнитные поля в верхней ионосфере от горизонтального крайне низкочастотного наземного излучателя конечной длины // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2022. Т. 65 № 9. С. 697–712. DOI:10.52452/00213462_2022_65_09_697

- Шуман В.Н. Электромагнитные сигналы литосферного происхождения в современных наземных и дистанционных зондирующих системах // Геофизический журнал. 2007. Т. 29. № 2. С. 3–16.
- Fedorov E., Pilipenko V., Uyeda S. Electric and magnetic fields generated by electrokinetic processes in a conductive crust // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2001. V. 26. № 10-12. P. 793–799.
- Finkelstein D., Powell J. Earthquake lightning // *Nature*. 1970. V. 21. 228(5273) P. 759–760. DOI: 10.1038/228759a0
- Hobara Y., Koons H.C., Roeder J.L., Yumoto K., Hayakawa M. Characteristics of ULF magnetic anomaly before earthquakes // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2004. V. 29. P. 437–444.
- Honkura Y., Kuwata Y. Estimation of electric-fields in the conducting earth's crust for oscillating electric-current dipole sources and implications for anomalous electric-fields associated with earthquakes // *Tectonophysics*. 1993. V. 224. P. 257–263.
- King R.W.P., Owens M., Wu T.T. *Lateral Electromagnetic Waves. Theory and Applications to Communications, Geophysical Exploration, and Remote Sensing*. Springer-Verlag. 1992.
- Kanata B., Zubaidah T., Ramadhani C., Irmawati B. Changes of the geomagnetic signals linked to Tohoku earthquake on March 11th 2011 // *International Journal of Technology*. 2014. V. 3. P. 251–258, <http://dx.doi.org/10.14716/ijtech.v5i3.611>
- Kopytenko Yu.A., Ismaguilov V.S., Hattori K., Hayakawa M. Determination of hearth position of a forthcoming strong EQ using gradients and phase velocities of ULF geomagnetic disturbances // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2006. V. 31. P. 292–298.
- Li Q., Zhu P., Mamatemin A., Xu X. Detection of ULF electromagnetic emissions as a precursor to two earthquakes in China // *Earthquake Science*. 2011. V. 24. P. 601–607. DOI:10.1007/s11589-011-0822-2
- Losseva T.V., Nemchinov I.V. Earthquake lights and rupture processes // *Natural Hazards and Earth System Science*. 2005. V. 5. P. 649–656.
- Masci F., Thomas J.N. Are there new findings in the search for ULF magnetic precursors to earthquakes? // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. P. 10289–10304. DOI:10.1002/2015JA021336
- Pan W., Li K. *Propagation of SLF-ELF Electromagnetic Waves, Advanced Topics in Science and Technology in China*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2014.
- Pilipenko V., Vellante M., Anisimov S., De Lauretis M., Fedorov E., Villante U. Multi-component ground-based observation of ULF waves: goals and methods // *Annali di Geofisica*. 1998. V. 41. № 1. P. 63–77.
- Pilipenko V., Nenovski P., Tanaka H. Detection and discrimination of VLF/ULF seismic-related electromagnetic emissions // *Bulgarian Geophys. Journal*. 2005. V. 29. P. 13–30.
- Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Martines-Bedenko V.A., Bering E.A. Electric mode excitation in the atmosphere by magnetospheric impulses and ULF waves // *Frontiers in Earth Science*. 2021. V. 8. P. 687. DOI: 10.3389/feart.2020.619227
- Schekotov A. Yu., Molchanov O.A., Hayakawa M. et al. About possibility to locate an EQ epicenter using parameters of ELF/ULF preseismic emission // *Nat Hazards Earth System Science*. 2008. V. 8. P. 1237–1242.
- Surkov V.V., Hayakawa M. ULF geomagnetic perturbations due to seismic noise produced by rock fracture and crack formation treated as a stochastic process // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2006. V. 31. P. 273–280.
- Thomas J.N., Love J.J., Johnston M.J.S., Yumoto K. On the reported magnetic precursor of the 1993 Guam earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L16301. DOI:10.1029/2009GL039020

Features of the Electromagnetic Field of Lithospheric Sources

N. G. Mazur^a, V. A. Pilipenko^{a,b,*}, and E. N. Fedorov^a

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^b*Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia*

*e-mail: pilipenko_va@mail.ru

Received October 17, 2023

revised March 26, 2024

accepted March 27, 2024

Abstract – One of the key problems in the search for electromagnetic precursors of earthquakes is the possibility of separating magnetospheric and seismogenic disturbances. This paper presents the results of using a model that enables us to calculate the ultra-low-frequency (ULF) fields on the Earth's surface created by a linear horizontal current of finite length. This model simulates the occurrence of mechano-electric transformers during a shift along a fault zone at the final stage of the earthquake preparation. The calculations show several characteristics of the field of the underground source in comparison with the field of ionospheric disturbances. If the vertical component B_z of the magnetic field of an ionospheric disturbance is small

compared to the horizontal component \mathbf{B}_\perp , then for an underground source $|B_z| > |\mathbf{B}_\perp|$ in the vicinity of the source. For ionospheric sources, this apparent impedance (i.e., the $\mu_0|\mathbf{E}_\perp|/|\mathbf{B}_\perp|$ ratio) coincides with the impedance of the Earth's surface Z_g , while the impedance of disturbances created by the lithospheric source may exceed Z_g , up to order of magnitude in the source vicinity. An underground current source can create a vertical electric field E_z of significant magnitude. This is due to the vertical current continuity at the Earth–atmosphere interface, which acts as a powerful “amplifier” with a coefficient determined by the ratio of the complex conductivities of the Earth's crust and air. Calculations have shown that these ideas are incorrect. The vertical component E_z on the Earth's surface is of the same order of magnitude as the transverse component \mathbf{E}_\perp . There have been suggestions to use short-baseline gradient measurements to reduce the contribution of large-scale ionospheric disturbances. The calculation of the field structure has revealed that amplitude–phase gradients in the vicinity of an underground source are highly variable and may provide ambiguous results.

Keywords: electromagnetic precursors of earthquakes, ULF emissions, underground seismogenic source