

УДК 550.371.4: 551.510.535

СЕЙСМОГЕННЫЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И ТОКИ ОТ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ: СОПОСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

© 2024 г. В. В. Хегай*

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

**e-mail: hegai@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 31.07.2023 г.

После доработки 07.11.2023 г.

Принята к публикации 23.11.2023 г.

Проведен сравнительный анализ различных модельных представлений сейсмогенных квазистационарных электрических полей/токов от крупномасштабных источников на поверхности Земли. Установлено, что ранее предложенные аналитические модели сейсмогенных квазистационарных источников электрического поля/тока со значениями амплитуд поля/тока, непрерывно уменьшающимися до нуля на бесконечности, согласуются с экстремальными значениями электрического поля/тока, экспериментально наблюдавшимися в эпицентральных зонах до землетрясений. Показано также, что резко ограниченные в пространстве модели сейсмогенных источников квазистационарных электрических полей/токов в эпицентральных областях будущих землетрясений на поверхности Земли приводят к их величинам, на порядок и более превышающим реально наблюдаемые.

DOI: 10.31857/S0016794024020144, EDN: DYFOLG

1. ВВЕДЕНИЕ

Многолетние измерения показывают (см., например, [Markson, 2007; Мареев, 2010]), что в области “хорошей погоды” величина напряженности вертикального квазистатического электрического поля в атмосфере у поверхности Земли (E_z) в среднем обычно составляет ~ 100 В/м. С другой стороны, обнаруживается, что перед землетрясениями (в области их подготовки на поверхности Земли также в условиях “хорошей погоды”) систематически наблюдаются ее аномалии (ΔE_z) сейсмогенной природы, появляющиеся от часов до десятков дней до толчка, которые длятся от получаса до единиц часов, а их максимальная абсолютная величина лежит в диапазоне $\sim 0.12.0$ кВ/м (см. работы [Чернявский, 1955; Kondo, 1968; Hao, 1988; Vershinin et al., 1999; Hao et al., 2000; Choudhury et al., 2013; Смирнов, 2018; Антонова и др., 2019]). В пределах зоны подготовки землетрясения на поверхности Земли имеется тенденция увеличения абсолютной величины аномалии сейсмогенного поля по мере приближения от периферии к эпицентру, как это следует из работы [Hao et al., 2000]. При этом условия “хорошей погоды”, согласно

исследованию [Смирнов, 2018], определяются следующим образом: температура окружающего воздуха в диапазоне $+/-50$ °С; давление от 650 до 1080 гПа; облачность не более 3 баллов; скорость ветра до 6 м/с, отсутствие гроз, осадков, тумана, мглы, дымки, поземки, метели.

Крупномасштабные источники аномалий (ΔE_z) у поверхности Земли сейсмического происхождения (см. публикации [Hegai et al., 2015; 2023; Denisenko et al., 2018b; Khagai, 2020]) в ночных условиях при низкой солнечной активности могут приводить в среднеширотной ионосфере к значениям электрического поля (перпендикулярного геомагнитным силовым линиям) от ~ 0.2 до ~ 1 мВ/м. Такие величины электрического поля незначимы для области тропосферы, но они играют роль в перераспределении плазмы в ионосфере (скорость $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -дрейфа плазмы на высоте 300 км для величины электрического поля в 1 мВ/м, перпендикулярного геомагнитным силовым линиям, в средних широтах колеблется в диапазоне ~ 20 – 40 м/сек).

Здесь следует отметить, что имеются и другие работы (см., например, обзор [Conti et al., 2021]), в которых авторы выражают более скептическое отношение

к возможности проникновения квазистатического электрического поля сейсмогенной природы нужной величины от поверхности Земли в ионосферу для получения наблюдаемых эффектов (содержательный ответ на такие сомнения приведен в статье [Khegai, 2020], которая осталась вне поля зрения авторов обзора, поскольку она в нем не приводится).

В любом случае, при расчетах проникновения квазистатического электрического поля от поверхности Земли в ионосферу на нижней границе (высота $z = 0$ км) необходимо задавать горизонтальное распределение сейсмогенного источника поля (ΔE_z) или обусловленной им величины (Δj_z) — плотности вертикального тока проводимости у поверхности Земли. Эта величина, фигурирующая в различных расчетах, не измеряется непосредственно (см., например, результаты исследования [Смирнов, 2018]), а является результатом произведения величины E_z (В/м, вертикальная компонента напряженности электрического поля), непосредственно измеренного квазистатического электрического поля у поверхности Земли, и величины проводимости на этом же уровне σ_0 (См/м), также измеряемой независимо, т. е. $j_z = \sigma_0 E_z$ (А/м²). *Здесь и далее для упрощения записи будем, в большинстве случаев, опускать символ Δ , т. е. $\Delta E_z \equiv E_z$ и $\Delta j_z \equiv j_z$.* Таким образом, задание величины j_z при данном значении σ_0 однозначно определяет E_z . В свою очередь, если задается величина E_z , то при данном значении σ_0 однозначно определяется j_z . С точки зрения математического формализма, задание j_z или E_z — это вопрос удобства. Однако, с физической точки зрения, очевидно, что задание непосредственно измеряемой величины E_z часто делает рассмотрение более прозрачным для понимания.

Отметим здесь, что в работе не рассматриваются физические процессы в очаге землетрясения, приводящие к формированию аномально высоких значений величин тока/поля (j_z или E_z) в его эпицентральной зоне на поверхности Земли. Все возможные предвестники землетрясений, в том числе и аномалии в поведении электрических полей в приземном слое атмосферы, обсуждаются в монографии [Сидорин, 1992], а рассмотрение возможных физических механизмов генерации сейсмогенных электрических аномалий в твердой Земле перед землетрясениями с соответствующими их проявлениями в атмосфере приземного слоя проведено в монографиях [Pulinets and Boyarchuk, 2004; Pulinets and Ouzounov, 2018].

Целью же настоящей работы является введение сопоставительного анализа различных модельных представлений локализованных **крупномасштабных** источников сейсмогенных квазистационарных электрических полей/токов **на поверхности Земли**. Ниже будут рассмотрены: а) источники сейсмогенного квазистационарного

электрического поля/тока, амплитуды (j_z или E_z) которых убывают на бесконечности с ростом расстояния до нулевых значений с заданным характерным горизонтальным масштабом при удалении от эпицентра назревающего землетрясения (“**квазиэкспоненциальные**”) и б) резко ограниченные в пространстве (“**компактные**”), для которых вне определенной зоны с заданным горизонтальным масштабом, амплитуда j_z или E_z равна нулю.

2. МОДЕЛИ СЕЙСМОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПОЛЯ/ТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Данные многолетних измерений электрических характеристик атмосферы вблизи поверхности Земли, как уже сказано выше во Введении, указывают на постоянное существование электрического поля напряженностью порядка $E_z(z=0) \approx 100$ В/м. Этот результат, в частности, также вновь отмечен в достаточно современном исследовании [Смирнов, 2018] по конкретным наблюдениям в регионе Камчатки. Если взять теперь среднее модельное значение глобальной проводимости у поверхности Земли по модели [Baumgaertner et al., 2013] $\sigma_0(z=0) = 1 \cdot 10^{-13}$ См/м, то получим плотность тока $j_z^{\text{ST}} = j_z(z=0) = E_z(z=0) \sigma_0(z=0) = 1 \cdot 10^{-11}$ А/м² = 0.01 нА/м² для стандартных условий.

2.1. Резко ограниченные в пространстве (“компактные”) источники поля/тока

2.1.1. В работе [Namgaladze et al., 2012], посвященной моделированию ионосферных эффектов от крупномасштабных сейсмогенных источников тока, рассматривается источник со средней плотностью тока на нижней границе ионосферы $z = 80$ км ($j_z(z=80) = 2 \cdot 10^{-8}$ А/м² = 20 нА/м², занимающий площадку с размерами $a = 200$ км вдоль меридиана и $b = 2000$ км по параллели, вне которой плотность тока имеет нулевое значение. При таком выборе источника полученные авторами модельные величины возмущений полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере, время жизни, размеры, магнитное сопряжение, отклик на подход и уход освещенной ионосферы, как указывают авторы, хорошо согласуются с наблюдениями.

Если считать, что этот ток **является током проводимости**, текущим от поверхности Земли до ионосферы, то, исходя из условия непрерывности плотности вертикального тока, можно получить величину вертикального электрического поля $E_z(z=0)$ на поверхности Земли (заметим, что использованная в модельных расчетах величина плотности тока $\sim 10^{-8}$ А/м² в работе [Namgaladze et al., 2012] на три порядка превосходит ток “хорошей погоды” $j_z^{\text{ST}} \approx 0.01$ нА/м² на поверхности

Земли). Так как $\sigma_0(z=0) = 1 \cdot 10^{-13}$ См/м, то на поверхности Земли величина $E_z(z=0) = j_z/\sigma_0(z=0) = 200$ кВ/м, что вдвое больше ПРОБОЙНОГО напряжения влажного воздуха. Полный ток при этом $I = abj_z = 8000$ А. Прямоугольная площадка $S = ab = 4.0 \cdot 10^{11}$ м² при этом соответствует кругу радиусом $r_s = (S/\pi)^{1/2} \approx 357$ км.

Здесь следует отметить, что в работе [Namgaladze and Karpov, 2015] было сформулировано положение о том, что предполагаемые сейсмогенные токи Земля-ионосфера **не являются токами проводимости** и высказаны общие соображения по подходам к их моделированию. *В проводимом здесь исследовании вопрос о природе сейсмогенного тока Земля-ионосфера не обсуждается, как уже сказано во Введении (этот сложный вопрос сам является предметом отдельных исследований и дискуссий) и полагается, что этот ток является током проводимости. Соответственно, все расчеты физических параметров на поверхности Земли проводятся автором исходя именно из этого положения.*

2.1.2. В работах [Kuo et al., 2014; 2018] рассматривается (см. формулу (1) работы [Kuo et al., 2014]) другой резко ограниченный источник сейсмогенного тока. При этом, в декартовой системе координат **на поверхности Земли**, распределение плотности тока задается на резко ограниченной прямоугольной площадке (**вне которой плотность тока нулевая**) с общей площадью $S = 2a2b$, где $a = 200$ км — её полуширина вдоль направления восток — запад (вдоль параллели), $b = 450$ км — полуширина вдоль направления север — юг (вдоль меридиана) и координаты точки (x_0, y_0) совпадают с центром сейсмогенного источника тока на поверхности земли ($z = 0$):

$$J_{\text{surf}}(x, y) = (J_{\text{max}} / 4) \times \{1 + \cos[\pi(x - x_0) / a]\} \times \{1 + \cos[\pi(y - y_0) / b]\}. \quad (1)$$

Авторы рассматривают плотности тока $J_{\text{surf}}(x_0, y_0) = J_{\text{max}} = j_z^{\text{max}}(x_0, y_0; z = 0) = (1-10) \cdot 10^{-9}$ А/м² = $1 \div 10$ нА/м² для ночных условий в эпицентре назревающего землетрясения (x_0, y_0) . Это на 2 или 3 порядка превышает величину $j_z^{\text{ST}} = 0.01$ нА/м², характерную для стандартных условий. Если $\sigma_0(z=0) = 1 \cdot 10^{-13}$ См/м, то в точке (x_0, y_0) величина $E_z(z=0)_{\text{max}} = J_{\text{max}}/\sigma_0(z=0) = 10-100$ кВ/м. При этом полный ток $I = abJ_{\text{max}} = 90-900$ А. Площадка (прямоугольная!) $S = 2a \cdot 2b = 3.6 \cdot 10^{11}$ м² соответствует кругу радиусом $r_s = (S/\pi)^{1/2} \approx 339$ км. В среднем тогда плотность тока $\langle j_z \rangle = I/S = 0.25-2.5$ нА/м².

Характерный масштаб области подготовки землетрясения на поверхности Земли определяется как радиальное расстояние от эпицентра землетрясения до границы зоны его подготовки и зависит от

его магнитуды M . В литературе фигурируют различные (эмпирические и теоретические) оценки этого масштаба (в км), приведенные в работах [Dobrovolsky et al., 1979; Bowman et al., 1998; Hao et al., 1998; 2000]), или

$$R_{\text{Dobrovolsky}} = R_D = 10^{0.43M} \cong \exp(0.990M), \quad (2)$$

$$R_{\text{Bowman}} = R_B = 10^{0.44M} \cong \exp(1.013M), \quad (3)$$

$$R_{\text{Hao}} = R_H = \exp(M). \quad (4)$$

Как видно, оценка (4) дает промежуточное по величине значение радиуса зоны подготовки землетрясения на поверхности Земли. Именно она будет использоваться в дальнейшем для количественных оценок.

В таком случае, если $r_s = R_H \cong 339$ км, то $\ln(R_H) = M \cong 5.8$, и это означает, что для землетрясения с такой магнитудой средняя плотность тока на площадке радиуса $R_H \cong 339$ км составляет $\langle j_z \rangle = 0.25-2.5$ нА/м². Итак, получается, что резко ограниченный источник сейсмогенного тока, определяемый соотношением (1), имеет в эпицентре назревающего землетрясения с $M \cong 5.8$ максимальную нижнюю границу плотности тока $j_z^{\text{max}}(x_0, y_0; z = 0) = 1 \cdot 10^{-9}$ А/м² = 1 нА/м², среднюю плотность тока $\langle j_z(R_H) \rangle = 0.25$ нА/м² на площадке с радиусом $R_H \cong 339$ км и дает полный ток $I = 90$ А при $E_z(x_0, y_0; z = 0)_{\text{max}} = 1 \cdot 10^4$ В/м = 10 кВ/м. Тем не менее, при этом отношение $j_z^{\text{max}}(x_0, y_0; z = 0)/j_z^{\text{ST}} = 1$ нА/м²/0.01 нА/м² = 100 остается очень большим. Если же в качестве исходного значения выбрать $j_z^{\text{max}}(x_0, y_0; z = 0) = 10 \cdot 10^{-9}$ А/м² = 10 нА/м², т.е. верхнюю границу максимальной плотности вертикального тока согласно работе [Kuo et al., 2014], то величина вертикального электрического поля у поверхности земли при $\sigma_0(z=0) = 1 \cdot 10^{-13}$ См/м окажется равной $E_z(x_0, y_0; z = 0)_{\text{max}} = 1 \cdot 10^5$ В/м = 100 кВ/м.

Следует указать, что проблемы этой модели ранее неоднократно обсуждались в работах [Denisenko et al., 2018ab; Prokhorov and Zolotov, 2017; Prokhorov et al., 2019]. Так, в работе [Prokhorov et al., 2019], было рассчитано значение вертикального электрического поля у поверхности Земли, требуемое для модели, описанной в работе [Kuo and Lee, 2017], и это значение составило ~ 50 кВ/м при значении $\sigma_0(z=0) = 2 \cdot 10^{-14}$ См/м.

2.2. Квазиэкспоненциальные источники поля/тока

Источники сейсмогенного квазистационарного электрического поля/тока, амплитуды (j_z или E_z) которых убывают на бесконечности с ростом расстояния до нулевых значений с заданным характерным горизонтальным масштабом

при удалении от эпицентра назревающего землетрясения были определены во Введении как “квазиэкспоненциальные”.

2.2.1. Впервые источник сейсмогенного поля/тока такого типа был задан в работе [Kim et al., 1988]. В работе [Hegai et al., 2015] распределение возмущения вертикальной компоненты сейсмогенного квазистатического поля (ΔE_z) на поверхности Земли, связанного с приближающимся землетрясением, вблизи поверхности Земли задавалось именно в *таком же виде* в цилиндрической системе координат (r, φ, z), начало которой находилось на горизонтальной плоскости, расположенной на высоте $z = 0$ км (ось z направлена вертикально вверх и проходит через начало источника $r = 0$). Это распределение имело следующий вид (см. формулу (1) работы [Hegai et al., 2015]):

$$\Delta E_z \equiv E_z = E_0 \exp\left[-(r/R_0)^2 \ln 10\right], \quad (5)$$

где E_0 и R_0 — соответственно максимальное значение E_z и радиус области возмущения поля, на котором исходное поле падает в 10 раз. При этом величина $R_0 = R_D$, т.е. характерный масштаб изменения поля для различных магнитуд сейсмических событий (землетрясений), полагался равным характерному радиусу зоны подготовки землетрясения на поверхности Земли R_D , т.е. по Добровольскому (см. формулу (2) настоящей работы). Для того, чтобы сравнить характеристики такого *квазиэкспоненциального* источника с предложенным в работе [Kuo et al., 2014] *компактного* источника, зададим $R_0 = R_H \approx 339$ км, а $E_0 = 1000$ В/м = 1 кВ/м (величина наблюдаемого перед землетрясением возмущения вертикальной компоненты квазистатического поля у поверхности Земли ΔE_z может даже существенно превышать 1 кВ/м [Verzhinin et al., 1999; Choudhury et al., 2013; Антонова и др., 2019]).

В таком случае плотность тока у поверхности Земли $j_z(r, \varphi, z = 0)$ определится выражением (для осесимметричного источника нет зависимости от угла φ):

$$j_z(r, z = 0) = \sigma_0(z = 0) E_z = \sigma_0(z = 0) E_0 \exp\left[-(r/R_H)^2 \ln 10\right], \quad (6)$$

и

$$\begin{aligned} j_z^{\max}(r = 0; z = 0) &= \sigma_0(z = 0) E_0 = \\ &= 1 \cdot 10^{-13} (! / <) 1000 (! / <) = \\ &= 0.1 \cdot 10^{-9} / <^2 = 0.1 = / <^2. \end{aligned}$$

Ток от такого источника, текущий от поверхности земли в ионосферу, в зависимости от радиуса R площадки (центрированной началом источника), определится интегрированием выражения (6) в цилиндрической системе координат, что дает

$$I(R) = [\pi / \ln 10] \sigma_0(z = 0) E_0 R_H^2 \times \left(1 - \exp\left\{-(R/R_H)^2 \ln 10\right\}\right), \quad (7)$$

и, при $R \rightarrow \infty$, полный ток $I(\infty) = [\pi / \ln 10] \sigma_0(z = 0) E_0 R_H^2 \approx 1.364 \sigma_0(z = 0) E_0 R_H^2$. При выбранных значениях параметров, получим $I(\infty) \approx 15.7$ А, а $I(R_H) = 14.13$ А. На площадке радиуса $r_S = R_H \approx 339$ км при этом средняя плотность тока $\langle j_z(R_H) \rangle = I(R_H) / [\pi R_H^2] = 14.13 / (3.61 \cdot 10^{11}) \approx 3.91 \cdot 10^{-11}$ А/м² = 0.0391 нА/м². Получается, что $\langle j_z(R_H) \rangle_{[Kuo et al., 2014]} / \langle j_z(R_H) \rangle_{[Hegai et al., 2015]} = 0.25 / 0.0391 = 6.39$, т.е. средняя плотность тока на одной и той же площадке для резко ограниченного источника тока более чем в 6 раз выше. Величина максимального значения E_z в эпицентре одновременно с этим получается на порядок величины больше и составляет 10 кВ/м против 1 кВ/м для квази-гауссовского распределения, задаваемого в работе [Hegai et al., 2015].

2.2.2. В работе [Khegai, 2020] распределение возмущения вертикальной компоненты электрического поля ΔE_z на поверхности Земли в зависимости от эпицентрального расстояния r (в предположении цилиндрической симметрии источника поля относительно вертикальной оси, проходящей через эпицентр землетрясения) берется в виде (см. формулу (4) работы [Khegai, 2020]):

$$\begin{aligned} \Delta E_z \equiv E_z &= \\ &= E_0 \exp\left\{-\left[\left(1 + (r/R_0)^2\right)^{1/2} - 1\right] / (R_E/R_0)\right\} / \\ &/ \left[1 + (r/R_0)^2\right]^{1/2}, \end{aligned} \quad (8)$$

где E_0 и R_0 — соответственно **максимальное значение возмущения ΔE_z** в будущем эпицентре надвигающегося землетрясения и **радиус зоны** подготовки землетрясения на поверхности Земли, а R_E определяет **масштаб уменьшения** поля по мере удаления от эпицентра. Такое распределение хорошо согласуется с данными многолетних измерений сейсмогенных аномалий ΔE_z перед землетрясениями, проведенных в их эпицентральных областях согласно измерениям, представленным в работе [Hao et al., 2000]. Из проведенного в исследовании [Khegai, 2020] рассмотрения следует, что величина $E_0 \approx 1$ кВ/м у поверхности Земли, согласно измерениям Hao et al. [2000], достигается уже перед землетрясениями с $M \in [4.1; 4.7]$, а перед землетрясением с $M = 6.0$ величина $E_0 \approx 1.3 \div 2.4$ кВ/м, при этом величина отношения R_E/R_0 лежит в интервале [0.6; 1.75]. Оценим теперь плотность тока $j_z^{\max}(r = 0; z = 0)_{[Khegai, 2020]}$, среднюю плотность тока $\langle j_z(R_H) \rangle_{[Khegai, 2020]}$ и $I(\infty)_{[Khegai, 2020]}$ для такого источника, полагая $R_0 = R_E = R_H = 339$ км,

а $E_0 = 1000 \text{ В/м} = 1 \text{ кВ/м}$. Тогда, проведя расчеты (аналогично пункту 2.2.1.), получим

$$\begin{aligned} j_z^{\max}(r = 0; z = 0)_{[\text{Khegai}, 2020]} &= 0.1 \text{ нА / м}^2, \\ I(R)_{[\text{Khegai}, 2020]} &= 2\pi\sigma_0(z = 0)E_0R_0R_E \times \\ &\times (1 - \exp\left\{-\left(R_0 / R_E\right)^2 \cdot \left[1 + R^2 / R_0^2\right]^{1/2} - 1\right\}\right), \quad (9) \\ I(\infty)_{[\text{Khegai}, 2020]} &= 2\pi\sigma_0(z = 0)E_0R_0R_E = \\ &= 2\pi\sigma_0(z = 0)E_0R_H^2 \cong 72.2 \text{ А}, \\ I(R_H)_{[\text{Khegai}, 2020]} &\cong 24.5 \text{ А}, \\ \langle j_z(R_H) \rangle_{[\text{Khegai}, 2020]} &\cong 0.0679 \text{ нА / м}^2 \end{aligned}$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты всех оценок, проведенных в разделе 2, представлены в табл. 1.

При этом среднее модельное значение глобальной проводимости у поверхности Земли по модели [Baumgaertner et al., 2013] $\sigma_0(z = 0) = 1 \cdot 10^{-13} \text{ См/м}$, и для стандартных условий $E_z(z = 0) = 100 \text{ В/м}$, а плотность тока $j_z^{\text{ST}} = j_z(z = 0) = 0.01 \text{ нА/м}^2$.

Как хорошо видно из последнего столбца табл. 1, **только** квазиэкспоненциальные источники, моделирующие сейсмогенное поле/ток хорошо согласуются с максимальными значениями сейсмогенных аномалий ΔE_z перед землетрясениями, наблюдающимися в реальных измерениях на поверхности Земли, и эти максимальные значения только на **один порядок выше** величины стандартного поля “хорошей погоды” ($E_z^{\text{ST}} \cong 100 \text{ В/м} = 0.1 \text{ кВ/м}$).

В качестве иллюстрации проведем теперь моделирование квазиэкспоненциального сейсмогенного источника поля в соответствии с работой [Khegai, 2020] для конкретного сейсмического события — землетрясения с магнитудой $M = 6.1$, случившегося 28.01.2013 в 16:38:53 UT (22:38:53 LT), эпицентр которого лежал в 60 км на юго-восток от села Кеген (Казахстан). Географические координаты эпицентра: $\varphi_e = 42.61^\circ \text{ N}$, $\lambda_e = 79.71^\circ \text{ E}$, а глубина гипоцентра $h_G = 15.0 \text{ км}$. Согласно работе [Антонова и др. 2019] (см. рис. 4. этой работы), на геофизической обсерватории Алма-Ата (географические координаты $\varphi = 43.1^\circ \text{ N}$; $\lambda = 76.57^\circ \text{ E}$), расположенной на расстоянии по дуге большого круга $R_e = 225 \text{ км}$ от эпицентра этого землетрясения примерно за 20 часов до толчка с 20:15 до 20:45 UT 27 января 2013 (в день, предшествующий землетрясению в условиях хорошей погоды) в течение получаса наблюдалось обращение знака квазистатического поля в приземной атмосфере E_z при аномально высокой его величине, которая достигла значения ($E_z^{\max}$) $\cong -2 \text{ кВ/м}$. Напомним, что при рассмотрении квазистатического поля приземной атмосферы положительная величина E_z соответствует направлению “вниз”, т.е. совпадает с направлением вектора силы тяжести **g**. Далее, в интервале 22:15 до 23:15 UT (в течение часа) 27 января 2013, наблюдалось усиление поля до величины 1 кВ/м (уже примерно за 18 часов до подземного толчка). Описанные выше в работе [Антонова и др., 2019] предвестники землетрясения — аномалии в поведении E_z — позволяют оценить характеристики сейсмогенного источника поля/тока, используя приведенное выше аналитическое представление (8), полученное в работе [Khegai, 2020].

В таком случае $R_H = \exp(M) = \exp(6.1) \cong 446 \text{ км}$ и $R_0 = R_E = R_H = 446 \text{ км}$. Подставляя в выражение (8) $r = R_e = 225 \text{ км}$ и учитывая, что

Таблица 1. Параметры сейсмогенных источников квазистатического электрического поля/тока рассмотренных модельных представлений различного типа у поверхности Земли, рассчитанные автором на основании данных соответствующих публикаций

Пространственный тип сейсмогенного источника поля/тока	R_H , км	$j_z^{\max}(z = 0)$, нА/м ²	$\langle j_z(R_H) \rangle$, нА/м ²	$I(R_H)$, А	I , А	$E_z(z = 0)_{\max}$, кВ/м
Компактный [Namgaladze et al., 2012]	357	20	20	8000	8000	200
Компактный [Kuo et al., 2014]	339	1*	0.25	90	90	10
Квазиэкспоненциальный [Hegai et al., 2015]	339	0.1	0.039	14.13	15.7	1*
Квазиэкспоненциальный [Khegai, 2020]	339	0.1	0.068	24.5	72.2	1*

Примечание: символом * отмечены величины, непосредственно приведенные авторами соответствующих статей.

$E_z(R_e = 225 \text{ км}) = 1000 \text{ В/м}$ получаем, что величина $E_0 = 1262.9 \text{ В/м} \approx 1260 \text{ В/м} = 1.26 \text{ кВ/м}$. Это модельное распределение вертикальной компоненты поля E_z от сейсмогенного источника на поверхности земли в зависимости от расстояния r (сплошная линия), в соответствии с данными измерений работы [Антонова и др., 2019], приведено на рис. 1. Штриховые линии со стрелками на концах отмечают эпицентральное расстояние до пункта наблюдения (вертикальная) и величину поля (горизонтальная) на этом расстоянии. Штрихпунктирная вертикальная линия, заканчивающаяся стрелкой, отмечает характерное расстояние $R_H = 446 \text{ км}$, соответствующее размеру зоны подготовки землетрясения с $M = 6.1$, а горизонтальная линия (дана точками) — уровень стандартного значения величины поля $E_z^{ST} \approx 100 \text{ В/м}$.

Из рис. 1 видно, что до фонового (стандартного) уровня поле спадает на расстоянии $\approx 2.9R_H$ от эпицентра. Расчетные параметры этого модельного квазиэкспоненциального источника для землетрясения с $M = 6.1$, по данным измерений работы [Антонова и др. 2019] получаются следующими:

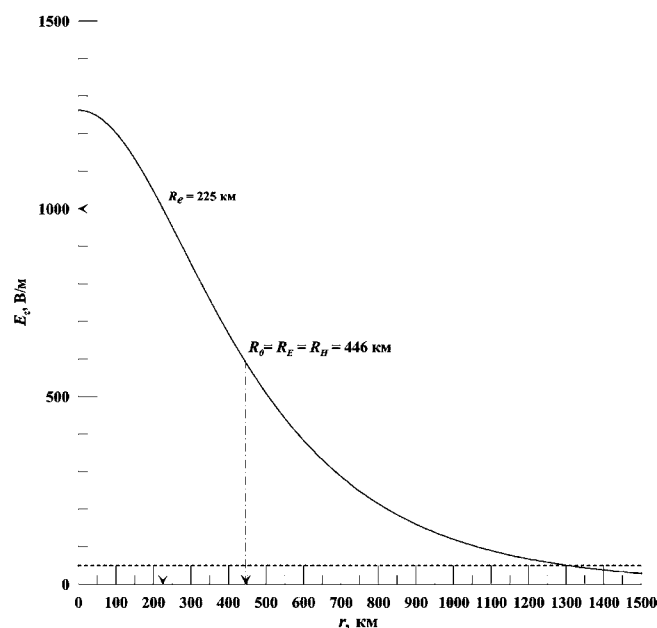


Рис. 1. Модельное распределение вертикальной компоненты поля E_z от сейсмогенного источника на поверхности Земли в зависимости от радиального расстояния r (сплошная линия), полученное с помощью аппроксимации (8) в соответствии с данными измерений из работы [Антонова и др., 2019]. Штриховые линии со стрелками на концах отмечают эпицентральное расстояние до пункта наблюдения (вертикальная) и величину поля (горизонтальная) на этом расстоянии. Штрихпунктирная вертикальная линия, заканчивающаяся стрелкой, отмечает характерное расстояние $R_H = 446 \text{ км}$, соответствующее размеру зоны подготовки землетрясения с $M = 6.1$, а горизонтальная линия (дана точками) — уровень стандартного значения величины поля $E_z^{ST} \approx 100 \text{ В/м}$.

если $R_0 = R_E = R_H = 446 \text{ км}$ и $E_z(R_e = 225 \text{ км}) = 1000 \text{ В/м} = 1 \text{ кВ/м}$, то $j_z^{\max}(z = 0) = 0.126 \text{ нА/м}^2$; $\langle j_z(R_H) \rangle \approx 0.086 \text{ нА/м}^2$; $I(R_H) \approx 53.5 \text{ А}$; $I \approx 157.8 \text{ А}$; $E_z(z = 0)_{\max} \approx 1.26 \text{ кВ/м}$.

Как уже было сказано выше, согласно расчетам, проведенным в работе [Khegai, 2020], основывающихся на данных измерений исследования НАО et al. [2000], величина отношения R_E/R_0 лежит в интервале $[0.6; 1.75]$.

В табл. 2 приведено сравнение параметров квазиэкспоненциальных источников сейсмогенного поля/тока, соответствующих соотношению (8), для разных величин отношения R_E/R_0 .

Из табл. 2 хорошо видно, что величина $E_z(z = 0)_{\max}$ остается в пределах единиц кВ/м, при этом $j_z^{\max}(z = 0) < 0.14 \text{ нА/м}^2$, ток $I(R_H)$, текущий в пределах зоны подготовки землетрясения с $M = 6.1$ не превосходит 71 А , а полный ток I будет иметь значение не более 263 А .

Преимущество аппроксимации источника поля/тока, полученное в [Khegai, 2020] по данным измерений НАО et al. [2000], перед предложенной ранее из общих соображений в работах [Kim et al., 1988; Negaï et al., 2015] состоит в том, что характерный масштаб зоны подготовки землетрясения $R_0 = R_H$ и характерный масштаб уменьшения E_z по мере удаления от эпицентра будущего землетрясения — R_E , могут отличаться друг от друга.

На рис. 2, аналогично рис. 1, показаны распределения E_z для разных величин отношения R_E/R_0 при $R_0 = R_H$ для источника сейсмогенного поля,

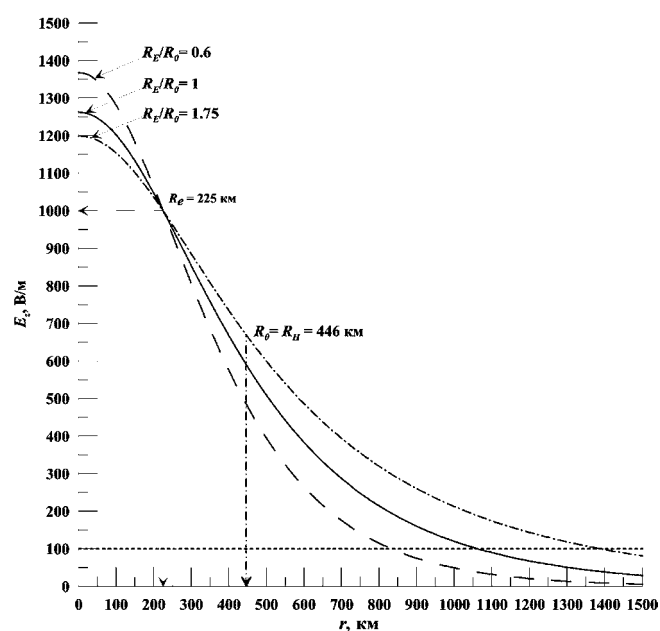


Рис. 2. То же, что и рис. 1, но для разной величины отношения R_E/R_0 . Штрихпунктирная линия — $R_E/R_0 = 0.6$, сплошная — $R_E/R_0 = 1$, штриховая — $R_E/R_0 = 1.75$.

Таблица 2. Параметры сейсмогенных источников поля/тока квазиэкспоненциального типа, соответствующих соотношению (8), для различных величин отношения R_E/R_0 , рассчитанные автором на основании данных соответствующих публикаций

Пространственный тип сейсмогенного источника поля/тока	R_H , км	$j_z^{\max}(z = 0)$, нА/м ²	$\langle j_z(R_H) \rangle$, нА/м ²	$I(R_H)$, А	I , А	$E_z(z = 0)_{\max}$, кВ/м
Квазиэкспоненциальный [Khegai, 2020] $R_0 = R_H, R_E/R_0 = 1$	339	0.1	0.068	24.5	72.2	1*
Квазиэкспоненциальный [Антонова и др., 2019] $R_0 = R_H, R_E/R_0 = 0.6$	446	0.137	0.112	70.1	102.6	1.37
Квазиэкспоненциальный [Антонова и др., 2019] $R_0 = R_H, R_E/R_0 = 1$	446	0.126	0.086	53.5	157.8	1.26
Квазиэкспоненциальный [Антонова и др., 2019] $R_0 = R_H, R_E/R_0 = 1.75$	446	0.120	0.053	33.2	262.4	1.20

Примечание: символом * отмечена величина, непосредственно приведенная автором соответствующей статьи.

приведенного в работе [Антонова и др. 2019], данные для которого приведены в табл. 2.

Видно, что при увеличении R_E при фиксированном R_0 наблюдается замедление уменьшения величины E_z по мере удаления от центра источника сейсмогенного поля и при этом одновременно происходит и уменьшение $E_z(z = 0)_{\max}$. Наличие двух одновременных измерений сейсмогенного поля на разных расстояниях от эпицентра будущего землетрясения позволяет определить характерный масштаб R_E и $E_z(z = 0)_{\max} = E_0$ однозначно, если известно $R_0 = R_H$, с помощью соотношения (8).

4. ВЫВОДЫ

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Показано, что модели резко ограниченных в пространстве (“компактных”) источников квазистатического сейсмогенного электрического поля/тока приводят к таким высоким значениям величин квазистационарных полей/токов в эпицентральных областях назревающих землетрясений на поверхности Земли, которые на порядок и более превосходят те, которые действительно наблюдаются.

2. Получено, что предложенные ранее в работах [Kim et al., 1988; Negai et al., 2015; Khegai, 2020] аналитические модельные представления источников сейсмогенного квазистационарного электрического поля/тока с непрерывным убыванием амплитуд поля/тока на бесконечности до нулевых значений (с заданными характерными пространственными масштабами при удалении от

эпицентра назревающего землетрясения), позволяют согласовать наблюдаемые в эксперименте значения по экстремальным величинам наблюдаемых перед подземным толчком электрических полей/токов в эпицентральной области последовавшего землетрясения.

3. Показано преимущество модельного представления источника сейсмогенного электрического поля/тока, полученного в работе [Khegai, 2020], перед более ранними работами [Kim et al., 1988; Negai et al., 2015]. Оно состоит в том, что характерный масштаб зоны подготовки землетрясения $R_0 = R_H$ и характерный масштаб уменьшения E_z по мере удаления от эпицентра будущего землетрясения — R_E , могут отличаться друг от друга.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственной академии наук по теме: “Исследование солнечной активности и физических процессов в системе “Солнце — Земля” (№ 1021100714181-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Антонова В.П., Крюков С.В., Луценко В.Ю. Вариации атмосферного электрического поля на высокогорной станции Тянь-Шаня, обусловленные регулярными и спорадическими источниками // VIII Всероссийская конф. по атмосферному электричеству [с международным участием]: сб. трудов. Отв. ред. Г.Г. Шукин. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. С. 12—14.

- Мареев Е.А.* Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. 2010. Т. 180. № 5. С. 527—534.
- Сидорин А.Я.* Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.
- Смирнов С.Э.* Вариации электрического поля земли в сейсмоактивном регионе как индикаторы сильных землетрясений и эруптивных явлений на Солнце: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. 25.00.29 — Физика атмосферы и гидросферы. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2018.
<https://www.ikir.ru/export/sites/ikir/ru/Publications/Dissertations/downloads/synopsisSmirnovSE.pdf>
- Чернявский Е.А.* Атмосферно-электрические предвестники землетрясений // Метеорология и гидрология в Узбекистане. Ташкент: АН УзССР, 1955. С. 317—327.
- Baumgaertner A.J.G., Thayer J.P., Neely III R.R., Lucas G.* Toward a comprehensive global electric circuit model: Atmospheric conductivity and its variability in CESM1(WACCM) model simulations // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118. № 16. P. 9221—9232.
<https://doi.org/10.1002/jgrd.50725>
- Bowman D.D., Ouillon G., Sammis C.G., Sornette A., Sornette D.* An observational test of the critical earthquake concept // J. Geophys. Res.-Sol. Ea. 1998. V. 103. № 10. P. 24359—24372.
<https://doi.org/10.1029/98jb0079228>
- Conti L., Picozza P., Sotgiu A.* A critical review of ground based observations of earthquake precursors // Front. Earth Sci., Sec. Geohazards and Georisks. 2021. V. 9. ID676766.
<https://doi.org/10.3389/feart.2021.676766>
- Choudhury A., Guha A., De B.K., Roy R.* A statistical study on precursory effects of earthquakes observed through the atmospheric vertical electric field in northeast India // Ann. Geophys. Italy. 2013. V. 56. № 3. ID R0331.
- Denisenko V.V., Boudjada M.Y., Lammer H.* Propagation of seismogenic electric currents through the Earth's atmosphere // J. Geophys. Res. Space. 2018a. V. 123. № 5. P. 4290—4297.
- Denisenko V.V., Nesterov S.A., Boudjada M.Y., Lammere H.* A mathematical model of quasistationary electric field penetration from ground to the ionosphere with inclined magnetic field // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2018b. V. 179. P. 527—537.
- Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure Appl. Geophys. 1979. V. 117. № 5. P. 1025—1044.
<https://doi.org/10.1007/BF00876083>
- Hao J.* The anomalous of atmospheric electric field at the ground level and earthquakes // Acta Seismologica Sinica. 1988. V. 10. № 2. P. 207—212.
- Hao J.G., Tang T.M., Li D.R.* A kind of information on short-term and imminent earthquake precursors — research on atmospheric electric field anomalies before earthquakes // Acta Seismologica Sinica. 1998. V. 11. № 1. P. 121—131.
- Hao J., Tang T.M., Li D.R.* Progress in the research of atmospheric electric field anomaly as an index for short-impending prediction of earthquakes // Journal of Earthquake Prediction Research. 2000. V. 8. № 3. P. 241—255.
- Hegai V.V., Kim V.P., Liu J.Y.* On a possible seismo-magnetic effect in the topside ionosphere // Adv. Space Res. 2015. V. 56. № 8. P. 1707—1713.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.07.034>
- Hegai V., Zeren Z., Pulinets S.* Seismogenic field in the ionosphere before two powerful earthquakes: possible magnitude and observed ionospheric effects (Case study) // Atmosphere. 2023. V. 14. № 5. ID819.
- Khegai V.V.* Analytical model of a seismogenic electric field according to data of measurements in the surface layer of the midlatitude atmosphere and calculation of its magnitude at the ionospheric level // Geomagn. Aeron. 2020. V. 60. № 4. P. 507—520.
<https://doi.org/10.1134/S0016793220030081>
- Kim V.P., Hegai V.V., Illich-Svitych P.V.* On a possible ionospheric presage of earthquakes // Preprint № 29a (783). Moscow: IZMIRAN, 1988. 12 p.
- Kondo G.* The variation of the atmosphere electric field at the time of earthquake // Memoirs of the Kakioka magnetic observatory. 1968. V. 13. № 1. P. 11—23.
- Kuo C.-L., Lee L.-C., Huba J.D.* An improved coupling model for the lithosphere-atmosphere-ionosphere system // J. Geophys. Res.—Space. 2014. V. 119. № 4. P. 3189—3205.
<https://doi.org/10.1002/2013JA019392>
- Kuo C.-L., Ho Y.-Y., Lee L.-C.* Electrical coupling between the ionosphere and surface charges in the earthquake fault zone // Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies. Eds. D. Ouzounov, S. Pulinets, K. Hattori, P. Taylor. Geophysical Monograph Series. V. 234. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2018. P. 99—124.
<https://doi.org/10.1002/9781119156949.ch7>
- Kuo C.-L., Lee L.-C.* Reply to comment by B.E. Prokhorov and O.V. Zolotov on “An improved coupling model for the lithosphere-atmosphere-ionosphere system” // J. Geophys. Res. Space. 2017. V. 122. № 4. P. 4869—4874.
<https://doi.org/10.1002/2016JA023579>
- Markson R.* The global circuit intensity: Its measurement and variation over the last 50 years // B. Am. Meteorol. Soc. 2007. V. 88. № 2. P. 223—242.
<https://doi.org/10.1175/bams-88-2-223>
- Namgaladze A., Zolotov O., Karpov M., Romanovskaya Y.* Manifestations of the earthquake preparations in the ionosphere total electron content variations // Natural Science. 2012. V. 4. № 11. P. 848—855.
<https://doi.org/10.4236/ns.2012.41113>
- Namgaladze A.A., Karpov M.I.* Conduction current and extraneous electric current in the global

- electric circuit // *Russ. J. Phys. Chem. B*. 2015. V. 9. № 5. P. 754—757.
<https://doi.org/10.1134/S1990793115050231>
- Prokhorov B.E., Zolotov O.V.* Comments on “An improved coupling model for the lithosphere-atmosphere-ionosphere system” by Kuo et al. [2014] // *J. Geophys. Res. Space*. 2017. V. 122. № 4. P. 4865—4868.
<https://doi.org/10.1002/2016JA023441>
- Prokhorov B.E., Zolotov O.V., Knyazeva M.A., Romanovskaya Yu.V.* Simulated vertical electric field data: an estimation from an improved coupling model for the lithosphere-atmosphere-ionosphere system // *Data In Brief*. 2019. V. 26. ID104513.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104513>
- Pulinets S.A., Boyarchuk K.A.* Ionospheric Precursors of Earthquakes. Berlin: Springer, 2004. 315 p.
<https://doi.org/10.1007/b137616>
- Pulinets S., Ouzounov D.* The Possibility of Earthquake Forecasting: Learning from nature. Bristol, UK: IOP Publishing Ltd, 2018. 167 p.
<https://doi.org/10.1088/978-0-7503-1248-6>
- Vershinin E.F., Buzevich A.V., Yumoto K., Saita K., Tanaka Y.* Correlations of seismic activity with electromagnetic emissions and variations in Kamchatka region // *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Ed. M. Hayakawa. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1999. P. 513—517.

Seismogenic Quasi-Stationary Electric Fields and Currents from Large-Scale Sources on the Earth's Surface: Comparison of Model Representations

V. V. Hegai*

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Moscow, Troitsk, Russia
**e-mail: hegai@izmiran.ru*

A comparative analysis of various model representations of seismogenic quasi-stationary electric fields/currents from large-scale sources on the Earth's surface was carried out. It has been established that previously proposed analytical models of seismogenic quasi-stationary sources of electric field/current with field/current amplitudes continuously decreasing to zero at infinity are consistent with extreme values of electric field/current experimentally observed in epicentral zones before earthquakes. It is also shown that sharply spatially limited models of seismogenic sources of quasi-stationary electric fields/currents in the epicentral zones of future earthquakes on the Earth's surface lead to their values being an order of magnitude or more greater than those actually observed.