

УДК 550.371: 550.348

О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ СИЛЬНЫХ УДАЛЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

© 2021 г. С. Л. Шалимов^{1,*}, С. А. Рябова^{2,1,**}

Представлено академиком РАН В.В. Адушкиным 30.04.2021 г.

Поступило 04.05.2021 г.

После доработки 04.05.2021 г.

Принято к публикации 13.05.2021 г.

Предложен механизм возникновения аномальных вариаций вертикальной компоненты напряженности электрического поля, зарегистрированных на Геофизической обсерватории Михнево ИДГ РАН и приуроченных к сильным удаленным землетрясениям. Показано, что интенсификация эманий радона в районе наблюдений, обусловленная сейсмогравитационными колебаниями с последующей модуляцией концентрации радона и аэрозоля посредством внутренних атмосферных волн, может приводить к указанным вариациям электрического поля.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, бухтообразное изменение, внутренние гравитационные волны, аэрозоль

DOI: 10.31857/S2686739721080144

Экспериментальные исследования указывают на то, что развитие сейсмических событий часто сопровождается возмущениями электрического и магнитного полей в приземном слое атмосферы [1–4].

В частности, аномалии в электрическом поле в приземном слое атмосферы хорошо выделяются во временном ходе вертикальной компоненты напряженности электрического поля, зарегистрированном на Геофизической обсерватории Михнево ИДГ РАН в период достаточно сильных ($M > 6.5$) землетрясений [5]. Регистрация вариаций вертикальной компоненты напряженности электрического поля выполняется на обс. Михнево с помощью электростатических флюксометров ИНЭП. В ходе исследований рассматривались сейсмические события, произошедшие в периоды, характеризующиеся отсутствием возмущений электрического поля, вызванных техногенными источниками, а также природными источниками, не связанными с землетрясениями. При этом сейсмические события располагались на значительных расстояниях от пункта измерения.

Было обнаружено, что землетрясения сопровождаются как повышенными локальными вариациями электрического поля в период прихода сейсмических волн в пункт наблюдений, так и вариациями, приуроченными ко времени сейсмического события (иногда даже опережая его). В последнем случае эффект проявляется в виде знакопеременных вариаций вертикальной компоненты напряженности электрического поля, а также бухтообразного понижения или повышения, как правило, осложненного знакопеременными вариациями. Примеры вариаций электрического поля приведены на рис. 1.

Учитывая значительные расстояния до эпицентральной области (заведомо превышающие область подготовки событий), вопрос о механизме возникновения подобных вариаций требует дополнительного изучения, которое предпринято в настоящей работе.

Согласно современным представлениям (см., например, [6] и ссылки в этой работе), приземная атмосфера представляет собой слабоионизованную среду. Ионизация атмосферы под влиянием внешних факторов (радиоактивность, УФ-радиация) состоит в превращении молекул воздуха, а также нейтральных аэрозольных частиц в ионы. При этом электроны практически мгновенно прилипают к молекулам, образуя отрицательные ионы. Поскольку подвижность отрицательных ионов на 30–40% выше, чем положительных, нейтральные аэрозольные частицы при взаимо-

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

² Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: pmsk7@mail.ru

**E-mail: riabovasa@mail.ru

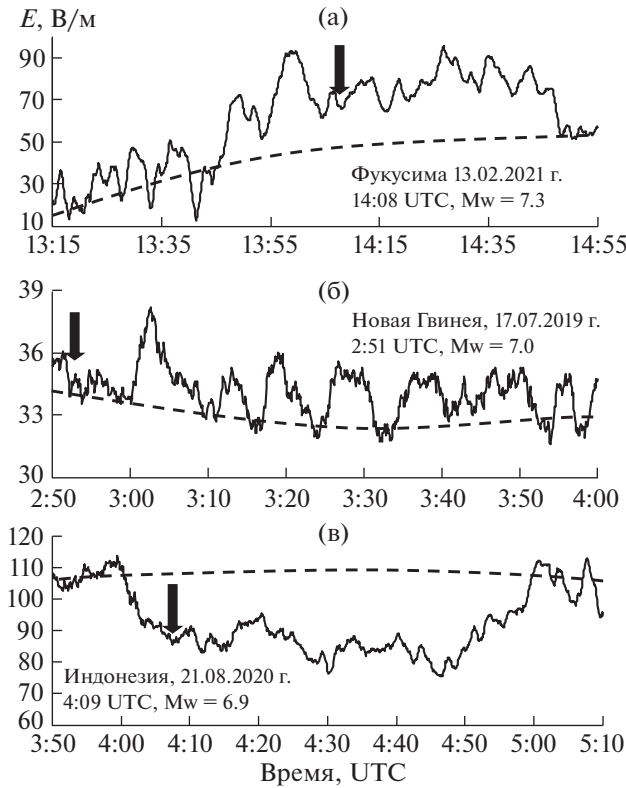


Рис. 1. Примеры вариаций вертикальной компоненты напряженности электрического поля: (а) бухтообразное повышение, (б) знакопеременная вариация и (в) бухтообразное понижение; стрелкой обозначен момент основного толчка землетрясений; параметры землетрясений приведены в поле рисунка; пунктирная линия – тренд.

действию с ними приобретают в основном отрицательный заряд. В результате седиментации заряженных аэрозолей происходит смещение отрицательного заряда относительно положительного, что приводит к возникновению электрического поля в первоначально квазинейтральной атмосфере.

В квазигидродинамическом приближении, зависящие только от вертикальной координаты z (выберем направление оси z вдоль фонового электрического поля) и времени, уравнения непрерывности для ионов и аэрозольных частиц, уравнения движения и уравнение Пуассона рассматриваемой модели имеют вид:

$$\frac{\partial n_{\pm}}{\partial t} = q - \alpha n_{+} n_{-} - \beta_{\pm} n_{\pm} n_a - \frac{\partial}{\partial z} (n_{\pm} V_{\pm}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_a}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} (n_a V_a), \quad (2)$$

$$V_{\pm} = \pm \mu_{\pm} E - \frac{D_{\pm}}{n_{\pm}} \frac{\partial n_{\pm}}{\partial z}, \quad (3)$$

$$V_a = -\mu_a E + \frac{g}{v_a}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{4\pi e}{\epsilon_0} (n_{+} - n_{-} - Z_a n_a). \quad (5)$$

Здесь n_{\pm} , n_a , V_{\pm} , V_a – концентрации ионов, частиц аэрозоля и их скорости, q , α , β_{\pm} – скорость ионообразования, коэффициенты рекомбинации и осаждения ионов на аэрозольную частицу соответственно, причем $\beta_{-} = \beta_{+} (1 + Z_a n_{0a} / n_{0-})$ по условию квазинейтральности, μ_{\pm} , μ_a , E , D_{\pm} – подвижности и коэффициенты диффузии ионов (в дальнейшем диффузией ионов пренебрегаем), подвижность частиц аэрозоля и электрическое поле, Z_a – заряд аэрозольной частицы, нормированный на абсолютную величину заряда электрона e (далее заряд считаем неизменным), $v_a = 9\eta / 2R_a^2 \rho_a$ – эффективная частота соударений для аэрозольных частиц, η , R_a , ρ_a – вязкость воздуха, радиус и плотность аэрозольной частицы.

Из системы уравнений (1)–(5) при условии, что характерное время разделения заряда меньше, чем время осаждения ионов на аэрозольную частицу, а также, что $\mu_{\pm} \gg \mu_a$, можно получить уравнение, описывающее вариации электрического поля в приземном слое атмосферы:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{4\pi e Z_a n_a g}{\epsilon_0 v_a} - \frac{4\pi}{\epsilon_0} (\lambda_{+} + \lambda_{-}) E, \quad (6)$$

где $\lambda_{\pm} = en_{\pm} \mu_{\pm}$ – проводимость воздуха. В дальнейшем для оценок полагаем $\lambda_{+} \approx \lambda_{-} = \lambda$.

Нетрудно получить аналитическое решение (6) и оценить амплитуду вариаций электрического поля:

$$E = \frac{e Z_a n_a g}{2\lambda v_a}. \quad (7)$$

Рассмотрим теперь вопрос о возможной причине вариаций электрического поля на примере наблюдений в obs. Михнево. Прежде всего отметим практически постоянное присутствие аэрозоля в приземной атмосфере [6]. Условно можно разделить частицы аэрозоля по величине радиуса на мелкие и крупные. В дальнейшем будем считать крупными присутствующие в приземной атмосфере частицы с радиусом $R_a \geq 1-2$ мкм (частицы большего радиуса могут попасть в атмосферу в результате сальтации под действием ветра [6]). Кроме этого отметим, что основным естественным ионизатором воздуха приземной атмосферы является поступающий в атмосферу природный радон [6, 7], максимальная концентрация которого сосредоточена в основном в приземном слое высотой несколько метров. Учтем также, что радон является индикатором геодинамического состояния среды: изменение поля радоновых эманаций

всегда (хотя и с некоторой задержкой порядка нескольких часов) сопровождается изменения геодинамического режима среды (в частности, изменение структуры исследуемого участка земной коры, проницаемости каналов миграции газа и т.д.) [7]. Поскольку обс. Михнево расположена в районе Нелидово-Рязанской тектонической структуры, можно ожидать высокую чувствительность земной коры в этом районе к изменениям геодинамического режима.

Изменения геодинамического режима могут быть обусловлены так называемыми сейсмогравитационными колебаниями Земли [8, 9]. Устойчивый спектр этих колебаний (приблизительно из 40 линий) в диапазоне 0.5–4 ч регистрируется (вертикальная и горизонтальная компоненты) при сейсмологических измерениях [10]. В указанный диапазон попадают наиболее длиннопериодные собственные колебания Земли – линии мультиплета сфероидального колебания ${}_0S_2$, имеющие период около 54 мин. Совпадение выводов теории и эксперимента на высокочастотной границе служит основанием для предположения о том, что колебания более низких периодов также представляют собой собственные колебания Земли [11] (теория которых, однако, отсутствует из-за недостаточной изученности глубинных слоев Земли и особенно ее внутреннего ядра).

Особенностью сейсмогравитационных колебаний является их глобальность, о чем свидетельствует идентичность спектрального состава колебаний в удаленных на 2200 км пунктах – Санкт-Петербурге и Тбилиси при синхронных наблюдениях в этих городах [11]. Другая важная для нас особенность – установленная экспериментально глобальная интенсификация колебаний перед сильными землетрясениями [12] (при том, что сейсмогравитационные колебания наблюдаются и в отсутствие землетрясений).

Основываясь на этих представлениях, можно предложить следующий сценарий возникновения вариаций электрического поля, наблюдаемых на значительных (порядка 10000 км) расстояниях от эпицентров сильных землетрясений и иногда предшествующих этим событиям. Глобальные сейсмогравитационные колебания, которые интенсифицируются перед сильными событиями, приводят к изменениям геодинамического режима, особенно заметным в тектонически сложно построенных регионах (к которым можно отнести район наблюдений в обс. Михнево). В результате растет интенсивность эманацій радона в приземный слой атмосферы, где радон, а также аэрозоль, подхватываются и выносятся в более высокие слои посредством внутренних атмосферных волн (ВГВ), которые присутствуют в атмосфере практически всегда. Периоды этих волн, согласно на-

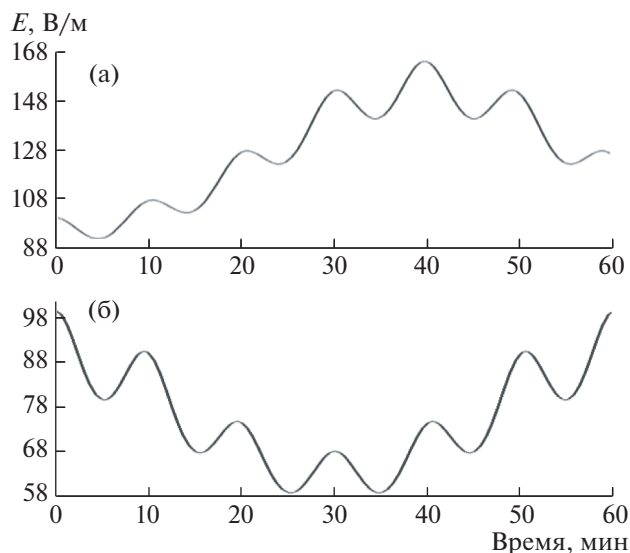


Рис. 2. Примеры решения модельного уравнения (6) для случая, когда ВГВ в противофазе (а) и в фазе (б).

блюдениям, проявляются в вариациях приземного электрического поля.

Сделаем некоторые оценки, полагая, что вязкость воздуха $\eta = 1.8 \times 10^{-5}$ кг/м с, плотность вещества аэрозолей $\rho_a = 2.5 \times 10^3$ кг/м³, $R_a = 1.2$ мкм, $\lambda = 10^{-14}$ См/м, $n_a = 10^9$ л/м³. Для крупных аэрозолей примем $Z_a = 10$ [6]. Тогда из формулы (7) следует, что амплитуда вариаций поля $E = 25$ –100 В/м (именно такие амплитуды вариаций поля и наблюдаются [5]). Сами вариации, как было отмечено, обусловлены модулирующим воздействием ВГВ на приземный слой, где в основном сконцентрированы радон и аэрозоль. В результате концентрация аэрозоля и проводимость воздуха в приземном слое будут квазипериодически меняться со временем, и генерация электрического поля будет поддерживаться.

Согласно экспериментальным наблюдениям за электрическим полем на обс. Михнево, выделяются два основных диапазона вариаций: около 10 мин и около 60 мин (бухты), что соответствует периодам ВГВ в атмосфере. Учитывая, что амплитуды этих волн могут быть сопоставимы или отличаться в несколько раз, а волны могут быть в фазе или противофазными, на рис. 2 приведены два примера решения уравнения (6) с начальным условием $E(0) = 100$ В/м для случаев, когда амплитуда высокочастотной волны в 3 раза больше амплитуды низкочастотной, причем на рис. 2а волны в противофазе (“бухтообразное повышение”, осложненное высокочастотными вариациями), а на рис. 2б – в фазе (“бухтообразное понижение”). Видно, что модель способна воспроизводить наблюдаемые амплитуды и формы вариаций поля.

Таким образом, предложенная в работе модель генерации вариаций вертикальной компоненты напряженности электрического поля в приземной атмосфере может описывать аномальное поведение напряженности поля, обусловленное развитием крупных удаленных сейсмических событий на примере наблюдений в Геофизической обсерватории Михнево.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Экспериментальные исследования выполнены в рамках государственного задания (тема АААА-А-19-119021890067-0), разработка модели и вычисления на ее основе выполнены в рамках государственного задания (тема АААА-А-19-119110690110-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Канониди К.Х.* Результаты анализа инструментальных наблюдений аномальных геомагнитных возмущений, наведенных землетрясениями в геосферах // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2013. С. 329–341.
2. *Спивак А.А., Рябова С.А.* Геомагнитные вариации при сильных землетрясениях // Физика Земли. 2019. № 6. С. 3–12.
3. *Руленко О.П., Маранулец Ю.В., Кузьмин Ю.Д., Солодчук А.А.* Совместное возмущение геоакустического, эманационного и атмосферного электрического полей у границы земная кора – атмосфера перед землетрясением // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. Науки. 2016. № 3 (14). С. 72–78.
4. *Черногор Л.Ф.* Геомагнитные возмущения, сопровождавшие Великое Японское землетрясение 11 марта 2011 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 1. С. 69–82.
5. *Рябова С.А., Спивак А.А.* Удаленный отклик электрического поля и атмосферного тока на сильные землетрясения // ДАН. 2020. Т. 495. № 1. С. 42–47.
6. *Смирнов В.В.* Ионизация в тропосфере. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 312 с.
7. *Адушкин В.В., Спивак А.А.* Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 2014, 360 с.
8. *Шалимов С.Л.* О влиянии длиннопериодных колебаний Земли на верхнюю атмосферу // Изв. РАН. Физика Земли. 1992. № 7. С. 89–95.
9. *Vallée M., Ampuero J.P., Juhel K., Bernard P., Montagner J.P., Barsuglia M.* Observations and Modeling of the Elastogravity Signals Preceding Direct Seismic Waves // Science. 2017. V. 358. № 6367. P. 1164–1168.
10. *Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Савина Н.Г., Яновская Т.Б.* Сверхдлиннопериодные колебания Земли // Доклады АН СССР. 1982. Т. 262. № 2. С. 321–324.
11. *Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Зуришвили Д.Д.* Сейсмогравитационные колебания Земли и связанные с ними возмущения атмосферы // Доклады АН СССР. 1989. Т. 306. № 2. С. 314–317.
12. *Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Осипов К.С.* Сейсмогравитационные пульсации Земли и возмущения атмосферы как возможные предвестники сильных землетрясений // Доклады АН СССР. 1990. Т. 313. № 5. С. 1095–1098.

ABOUT A POSSIBLE MECHANISM OF VARIATIONS OF THE ELECTRIC FIELD OF THE SURFACE ATMOSPHERE DURING STRONG REMOTE EARTHQUAKES

S. L. Shalimov^{a, #} and S. A. Riabova^{b, a, ##}

^a *Schmidt United Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b *Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: pmsk7@mail.ru*

^{##} *E-mail: riabovasa@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin April 30, 2021

The mechanism of the anomalous vertical electric field strength variations recorded at the Mikhnevo Geophysical Observatory of IDG RAS during strong remote earthquakes is suggested. It was shown that intensification of radon emanations in the observational area stimulated by the seismogravitational oscillations and subsequent modulation by atmospheric internal gravity waves result in the electric field variations, which are similar in amplitude and shape to observations.

Keywords: electric field strength, bay-like change, internal gravitational waves, aerosol