

УДК 550.387.4;550.348

## УНИТАРНАЯ ВАРИАЦИЯ В СЕЙСМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ЗЕМЛИ: СООТВЕТСТВИЕ КРИВОЙ КАРНЕГИ

© 2020 г. С. А. Пулинец<sup>1, 2, \*</sup>, Г. Я. Хачикян<sup>3, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан

\*e-mail: pulse@rssi.ru

\*\*e-mail: galina.khachikyan@gmail.com

Поступила в редакцию 27.04.2020 г.

После доработки 15.05.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

По данным о землетрясениях с магнитудой  $M \geq 4.5$ , зарегистрированных на планете в 1973–2017 гг., выявлена УТ-вариация в количестве землетрясений с амплитудой  $\sim 10\%$  и сопоставлена с УТ-вариацией в градиенте атмосферного электрического потенциала (кривая Карнеги), амплитуда которой составляет  $\sim 20\%$ . Показано, что амплитуда УТ-вариации в количестве глубокофокусных землетрясений увеличена по сравнению с таковой для коровых землетрясений, и что она опережает УТ-вариацию в градиенте атмосферного электрического потенциала на  $\sim 2$  ч. Получено уравнение линейной регрессии между УТ-вариациями в числе глубокофокусных землетрясений и градиенте электрического потенциала с коэффициентом корреляции  $R = 0.86$ . Полученные результаты поддерживают новую идею о том, что процессы подготовки и реализации землетрясений взаимосвязаны с процессами функционирования глобальной электрической цепи и генерации атмосферного электрического поля.

DOI: 10.31857/S0016794020060115

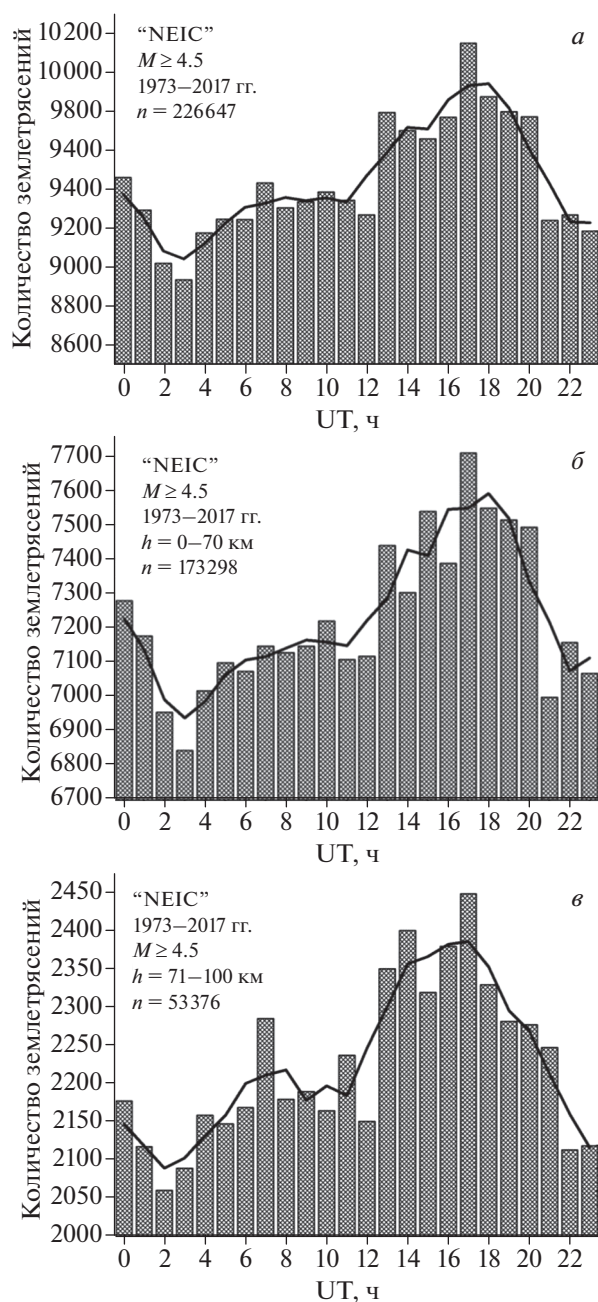
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Начиная с работы [Wilson, 1920], принято считать, что генератором атмосферного электрического поля является грозовая деятельность планеты. Грозовые модели атмосферного электричества, например, [Haas and Roble, 1979] используют в качестве главного источника электрического тока грозовые облака, в верхней части которых скапливаются положительные заряды, а в нижней – отрицательные. Поведение электрического поля в регионах “хорошей погоды” также связывают с грозами и разрядами молний [Roble and Tzur, 1986], что пока не имеет безоговорочного признания среди ученых. Как отмечено в ([https://vvkuz.ru/books/lectures\\_1/14.pdf](https://vvkuz.ru/books/lectures_1/14.pdf)), атмосферное электрическое поле может формироваться “за счет разделения электрических зарядов в атмосфере “хорошей погоды”, а не за счет грозовых разрядов, как это обычно принято в литературе”. Такая ситуация свидетельствует о том, что поиск механизмов генерации атмосферного электрического поля еще не закончен и требует дальнейшего развития.

Проводящие слои земной коры и нижней ионосферы, районы облачно-грозовой активно-

сти и регионы “хорошей погоды” формируют глобальную электрическую цепь (ГЭЦ) [Roble and Tzur, 1986; Bering et al., 1998; Мареєв, 2010], традиционными элементами которой считаются грозовые токи, ионосферные токи, токи хорошей погоды и земные токи. В работе [Намгаладзе, 2013] было предложено включить дополнительно в элементы ГЭЦ сейсмогенные токи, которые предположительно возникают в процессе подготовки и реализации землетрясений и текут между тектоническими разломами и ионосферой. Ранее уже высказывалась идея [Pulinets, 2009], что процессы подготовки землетрясений связаны с процессами в ГЭЦ. Однако Slyunyaev et al. [2015] считают, что локальные неоднородности проводимости атмосферы и дополнительные токи не оказывают существенного воздействия на поведение ГЭЦ.

Одной из уникальных особенностей ГЭЦ и атмосферного электрического поля является унитарная вариация [Whipple, 1929; Liu et al., 2010], демонстрирующая устойчивое увеличение напряженности поля в регионах хорошей погоды в  $\sim 19$  УТ (кривая Карнеги). Если сейсмические процессы действительно вовлечены в процесс ге-



**Рис. 1.** Гистограммы распределения внутри 1-часовых UT-интервалов количества землетрясений с магнитудой  $M \geq 4.5$ , зарегистрированных на планете в 1973–2017 гг., где черные кривые – скользящее среднее по 3 ч: (а) – для землетрясений всех глубин (226674 события), (б) – для землетрясений с глубиной гипоцентров до 70 км (173298 событий), (в) – для землетрясений с глубиной гипоцентров 71–700 км (53376 событий).

нерации атмосферного электрического поля и функционирования ГЭС, представляется целесообразным проверить наличие UT-вариации и в сейсмическом режиме Земли, и если такая существует, то определить степень соответствия ха-

рактерных для нее особенностей с особенностями кривой Карнеги, этому и посвящена настоящая работа.

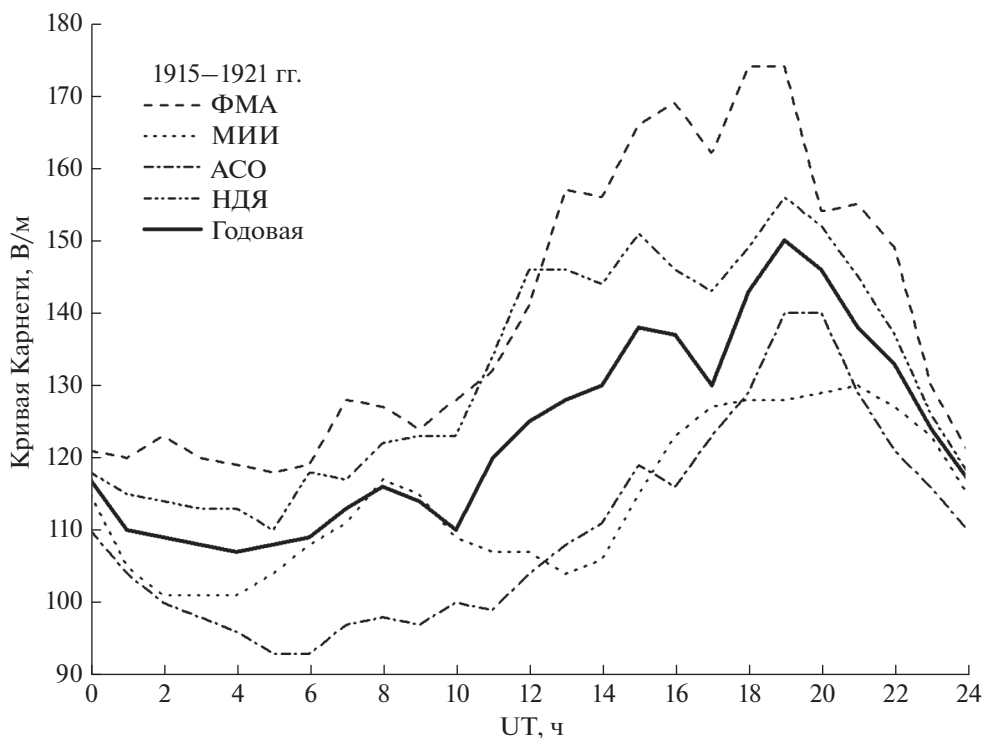
## 2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

В работе использованы данные о землетрясениях с магнитудой  $M \geq 4.5$ , которые были зарегистрированы на планете в 1973–2017 гг. (226 674 события) согласно глобальному сейсмологическому каталогу (NEIC) Национальной геологической службы США, представленному на сайте (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>). На рисунке 1а–1в приведены гистограммы распределения как зависимость от мирового времени количества всех зарегистрированных землетрясений (рис. 1а) и отдельно: мелкофокусных с глубиной гипоцентров до 70 км (рис. 1б) и глубокофокусных с глубиной гипоцентров от 71 км до 700 км (рис. 1в).

Для сопоставления наблюдаемых UT-вариаций в количестве землетрясений с UT-вариациями электричества хорошей погоды, мы привлекли к анализу данные по измерениям электрического поля над океанами в 1915–1921 гг. на корабле “Carnegie”, систематизированные в работе [Mauchly, 1926]. В настоящее время эти данные доступны на сайте (<https://malagabay.files.wordpress.com/2014/06/carnegie-iv-v-vi-table.jpg?w=640>). На рисунке 2 тонкие кривые представляют UT-вариации электрического поля хорошей погоды отдельно для четырех сезонов: (февраль–март–апрель – FMA), (май–июнь–июль – MJJ), (август–сентябрь–октябрь – ASO), (ноябрь–декабрь–январь – NDJ), а толстая кривая показывает UT-вариацию, усредненную за весь период измерений 1915–1921 гг. (кривая Карнеги).

## 3. АНАЛИЗ ДАННЫХ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рисунок 1 показывает, что UT-вариация в количестве всех зарегистрированных на планете землетрясений (рис. 1а) и отдельно, коровых – с глубиной гипоцентров до 70 км (рис. 1б), а также глубокофокусных – с глубиной гипоцентров 71 км и более (рис. 1в) имеет идентичный характер, что говорит в пользу неслучайности обнаруженной унитарной вариации в сейсмическом режиме Земли. Сопоставляя рис. 1 и 2, можно заключить, что визуально, характер UT-вариации в сейсмическом режиме имеет довольно близкое соответствие с характером UT-вариации в градиенте атмосферного электрического потенциала. У обоих параметров максимальные значения приходятся на интервал времени ~13–20 UT, а минимальные – вокруг ~03–04 UT. У кривой Карнеги пиковое значение градиента потенциала наблюдается около ~19–20 UT (рис. 2), а пиковое значение в количестве землетрясений, как для



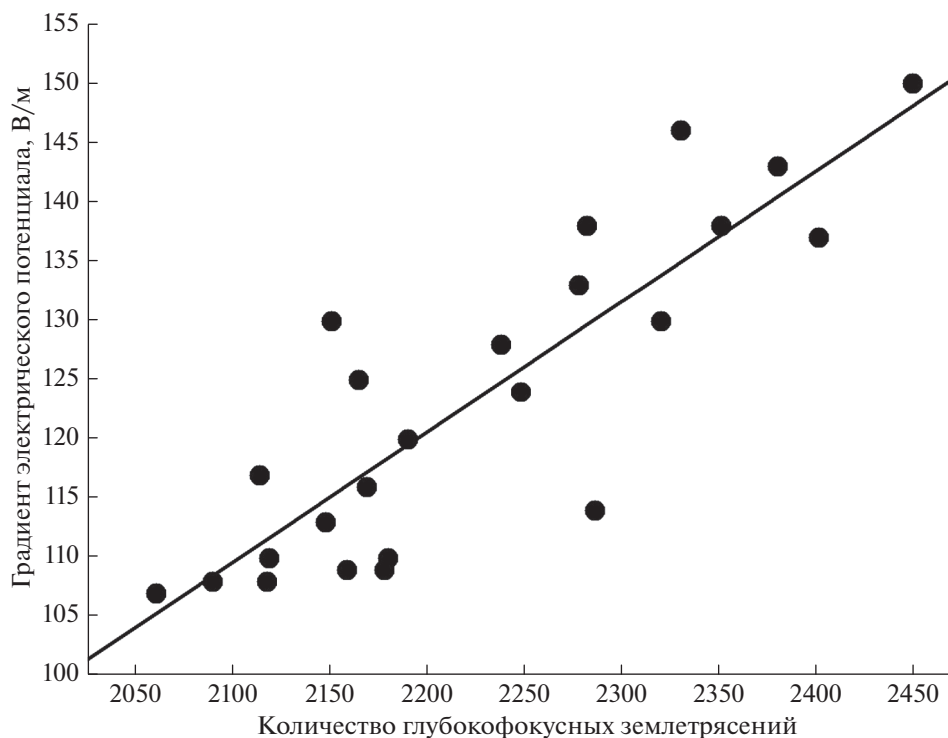
**Рис. 2.** Усредненная UT-вариация электрического поля хорошей погоды по данным измерений на корабле “Carnegie” в 1915–1921 гг. (жирная кривая); тонкие кривые представляют UT-вариации, усредненные отдельно за февраль–март–апрель – FMA, май–июнь–июль – MJJ, август–сентябрь–октябрь – ASO, и ноябрь–декабрь–январь – NDJ (Mauchly, 1926).

коровых, так и для глубокофокусных событий наблюдается в ~17–18 UT (рис. 2), т.е., на 2 ч раньше. Для кривой Карнеги (рис. 2) перепад градиента потенциала между минимальным значением в 04 UT и пиковым значением в 19 UT составляет ~38%, а в сейсмических данных такое отношение меньше. По несглаженным данным на рис. 1 (столбики) разность между максимальным и минимальным количеством всех произошедших землетрясений (рис. 1а) составляет ~13.6%, для коровых землетрясений (рис. 1б) перепад составляет ~12.6%, но достигает ~19% для глубокофокусных землетрясений (рис. 1в). Этот результат говорит в пользу того, что амплитуда унитарной вариации в сейсмическом режиме Земли усиливается с увеличением глубины гипоцентров. Учитывая этот эффект, а также то, что наблюдается (как отмечалось выше) примерно 2-х часовое запаздывание пика в кривой Карнеги относительно пика в количестве землетрясений, мы показали на рис. 3 зависимость градиента электрического потенциала (жирная кривая на рис. 2) от количества глубокофокусных землетрясений (столбики на рис. 1в) с учетом запаздывания первого параметра относительно второго на 2 ч. Линия на рис. 3 представляет линейную регрессию между градиентом электрического потенциала и количеством глубокофокусных землетрясений с коэф-

фициентом корреляции  $R = 0.86$ , среднеквадратическим отклонением  $SD = 7.0$ , с вероятностью  $P = 95\%$ .

Возвращаясь вновь к рис. 1 и рис. 2, следует заметить, что в UT-вариациях обоих параметров помимо основного максимума, приходящегося на интервал времени ~13–20 UT, наблюдается еще один максимум, хотя и менее развитый, центрированный на ~07–08 UT. Вновь видим, что для глубокофокусных землетрясений пик вокруг 07–08 UT (рис. 1в) выражен более четко по сравнению с таковым для коровых землетрясений (рис. 1б), и именно пик в глубокофокусных землетрясениях вокруг 07–08 UT обуславливает появление аналогичного пика в UT-вариации для всех зарегистрированных событий (рис. 1а).

Существование устойчивых максимумов в сейсмическом режиме Земли в ~07–08 UT и ~17–18 UT (рис. 1), которые практически одновременно (с небольшим запаздыванием) присутствуют и в градиенте электрического потенциала в регионах хорошей погоды (рис. 2), а также наличие практически одновременного минимума в этих параметрах: около ~02 UT для глубокофокусных землетрясений (рис. 1в), около ~03 UT для коровых землетрясений (рис. 1б), и вокруг ~03–04 UT для градиента электрического потенциала (рис. 2)



**Рис. 3.** Распределение часовых значений градиента потенциала в электрическом поле хорошей погоды (Кривая Карнеги по данным 1915–1921 гг.) в зависимости от часовых значений количества глубокофокусных  $h \geq 71$  км землетрясений с магнитудой  $M \geq 4.5$  по данным глобального сейсмологического каталога NEIC за 1973–2017 гг. (см. текст).

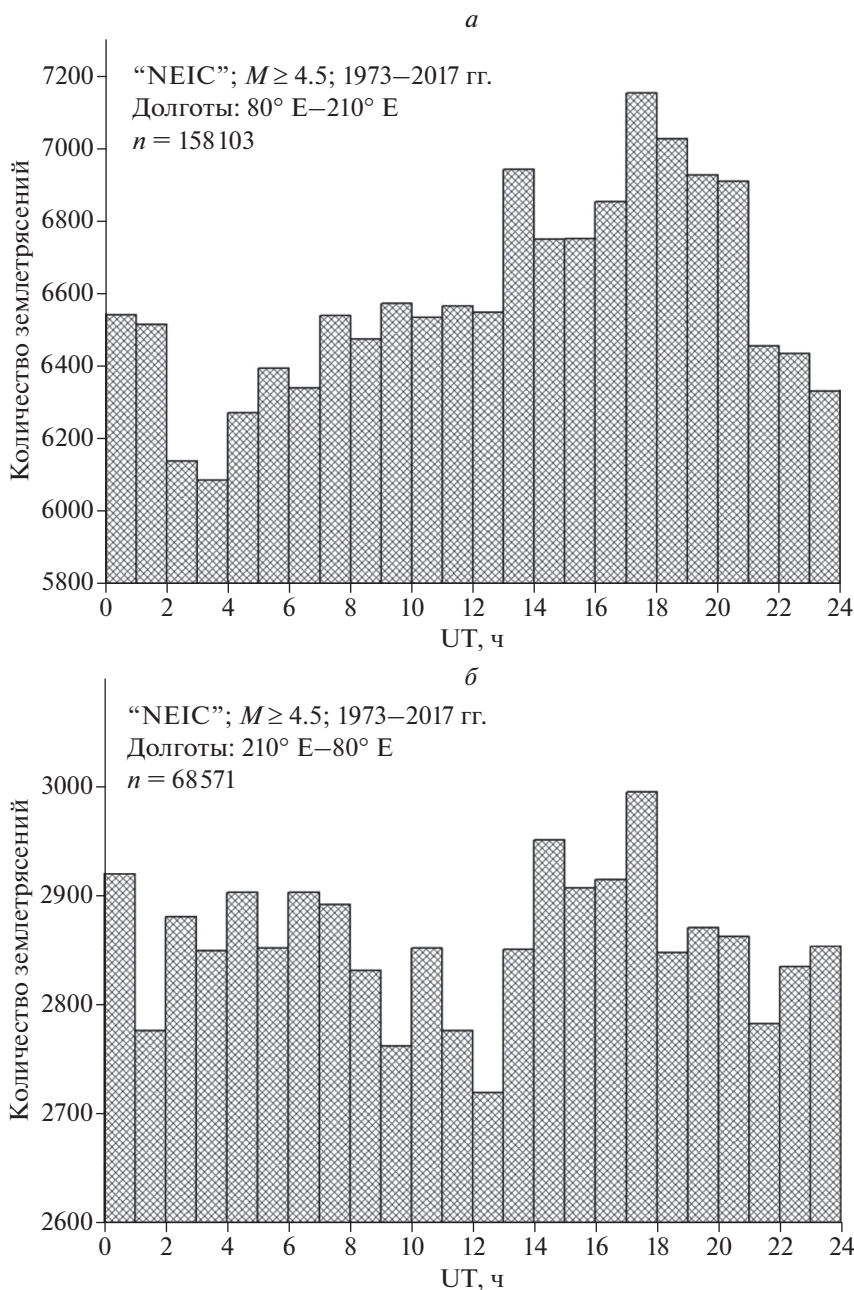
поддерживает новую идею [Pulinets, 2009; Намгладзе, 2013], что процессы подготовки и реализации землетрясений взаимосвязаны с функционированием ГЭЦ и процессом генерации атмосферного электрического поля.

Возникает вопрос о физическом механизме такой связи, на который пока нет ответа. По нашему мнению, приведенные выше результаты дают намек, что к возникновению унитарной вариации в градиенте электрического потенциала (рис. 2), сейсмической активности, особенно глубокофокусной (рис. 1), а также к существованию достаточно тесной корреляции между УТ-вариациями в градиенте электрического потенциала и глубокофокусной сейсмичности (рис. 3), может быть причастен некоторый более глобальный механизм, чем облачно-грозовая деятельность планеты, протекающая в различных географических регионах разрозненно по сезонам и мировому времени.

В число кандидатов на возможные источники глобального воздействия можно включить космические лучи, усиление естественной радиоактивности земли (интенсификация эманиций радона в областях повышенной сейсмической активности), а также взаимодействие солнечного ветра с геомагнитным полем, как было предположено еще в работе [Park, 1976] и затем обсужда-

лось в [Tinsley and Heelis, 1993]. Поступление корпускулярной космической энергии в околоземное пространство регулирует магнитосфера, в том числе, через процессы в ее хвостовой части, где возможно быстрое пересоединение противоположно направленных силовых линий (аннигиляция магнитного поля) с выделением большой энергии на ускорение заряженных частиц. В этой связи представляет интерес УТ-время возникновения синхронных пиков в сейсмической активности и в электрическом поле вокруг 17–19 UT и 07–08 UT. Не трудно понять, что в 17–19 UT на ночной стороне находится долготный регион, в котором расположен магнитный полюс южного полушария с координатами:  $79.5^\circ$  S,  $108.6^\circ$  E – для варианта несмещенного диполя,  $64.9^\circ$  S,  $138.4^\circ$  E – для смещенного, и  $74.18^\circ$  S,  $126.19^\circ$  E – для варианта исправленного геомагнитного полюса (координаты усреднены для магнитных эпох 1975–2015 гг.). В 07–08 UT в аналогичной ситуации находится долготный регион, в котором расположен магнитный полюс северного полушария с координатами:  $79.5^\circ$  N,  $288.6^\circ$  E – для варианта несмещенного диполя,  $80.3^\circ$  N,  $245.1^\circ$  E – для смещенного, и  $81.46^\circ$  N,  $277.67^\circ$  E – для варианта исправленного геомагнитного полюса. Возможно, что влияние солнечного ветра на земные процессы бывает более эффективным, когда магнитные полюса “смотрят” непосредственно в





**Рис. 4.** Гистограммы распределения в 1-часовых UT–интервалах количества землетрясений с  $M \geq 4.5$ , зарегистрированных в 1973–2017 гг. в долготном секторе  $80^\circ - 210^\circ \text{ E}$  (158103) и в долготном секторе  $210^\circ - 80^\circ \text{ E}$  (68571), (а) и (б) соответственно.

хвост магнитосферы откуда идет инжекция ускоренных заряженных частиц. При этом, для магнитного полюса южного полушария, который расположен на более низкой широте по сравнению с полюсом северного полушария, и тем самым “ближе” к центральной части хвоста, эффект выражен более ярко. Конечно, эти спекулятивные предположения требуют детального научного анализа.

На рисунке 4 мы сравниваем UT-вариацию в количестве землетрясений отдельно для долготного сектора  $80^\circ - 210^\circ \text{ E}$  (рис. 4а), куда входит долгота магнитного полюса южного полушария, и для долготного сектора  $210^\circ - 80^\circ \text{ E}$  (рис. 4б), куда входит долгота магнитного полюса северного полушария. Из рисунка 4а следует, что практически 70% землетрясений (158103 из общего числа 226674) произошло на той половине долгот, где находится магнитный полюс южного полушария,

и нет сомнений, что сейсмическая активность именно этого долготного региона отвечает за минимум в количестве землетрясений вокруг 03 UT (рис. 1 и рис. 4а). Не трудно понять, что в 03 UT магнитный полюс южного полушария находится на дневной стороне и как бы “отвернут” от потока ускоренных заряженных частиц из хвостовой части магнитосферы. В регионе 210°–80° Е включающем долготу расположения магнитного полюса северного полушария, произошло только 30% из рассмотренных сейсмических событий (рис. 4б), но при этом, максимум в числе землетрясений вокруг 07–08 UT, когда магнитный полюс северного полушария “смотрит” в хвост магнитосферы, проявляется очень четко.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, результаты проведенного исследования поддерживают новую идею [Pulinets, 2009; Намгаладзе, 2013], что процессы подготовки и реализации землетрясений взаимосвязаны с процессами функционирования глобальной электрической цепи и генерации атмосферного электрического поля. Что касается физического механизма такой взаимосвязи, то можно предположить, что за возникновение унитарной вариации в градиенте электрического потенциала, а также в частоте возникновения землетрясений отвечает некий глобальный механизм, возможно связанный с ускорением в хвосте магнитосферы заряженных частиц. Это предположение основано на том факте, что главные максимумы в UT-вариациях сейсмического режима и электрического поля приурочены к ~07–08 UT и ~17–19 UT, когда магнитные полюса северного и южного полушарий, соответственно, “смотрят” непосредственно в хвост магнитосферы, откуда идет инъекция ускоренных заряженных частиц, а главный минимум приурочен к ~03 UT, когда магнитный полюс южного полушария, расположенный в долготном регионе самой высокой сейсмичности (Юго-Восточная Азия, Австралия) оказывается на дневной стороне и “отвернут” от потока ускоренных заряженных частиц из хвостовой части магнитосферы.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-12-00441).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Mareev E.A.* Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. Т. 180. № 5. С. 527–534. 2010.
- *Намгаладзе А.А.* Землетрясения и глобальная электрическая цепь // Химическая физика. Т. 32. № 9. С. 9–13. 2013.
- *Bering E.A., Few A.A., Benbrook J.R.* The global electric circuit // Physics Today. October. P. 24–30. 1998.
- *Hays P.B., Roble R.G.* A quasi-static model of global atmospheric electricity. I. Lower Atmosphere // J. Geophys. Res. V. 84(A7). № 3. P. 291–305. 1979.
- *Liu C., Williams E.R., Zipser E.J., Burns G.* Diurnal variations of global thunderstorms and electrified shower clouds and their contribution to the global electric circuit // J. Atmos. Sci. V. 67. P. 309–323. 2010. <https://doi.org/10.1175/2009JAS3248.1>
- *Mauchly S.J.* Studies in atmospheric electricity based on observations made on the Carnegie, 1915–1921 // Carnegie Inst. Wash. Publ. № 175(5). P. 385–424. 1926.
- *Park C.G.* Downward mapping of high-latitude ionospheric electric fields to the Ground // J. Geophys. Res. V. 81. P. 168–174. 1976.
- *Pulinets S.A., Boyarchuk K.A.* Ionospheric Precursors of Earthquakes. Springer, Berlin. 2004.
- *Pulinets S., Davidenko D.* Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit // Adv.Space Res. V. 53. P. 709–723. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.035>
- *Pulinets S.A.* Physical mechanism of the vertical electric field generation over active tectonic faults // Adv. Space Res. V. 44(6). P. 767–773. 2009.
- *Roble R.G., Tzur I.* The global atmospheric electrical circuit // Study in Geophysics. The Earth’s electrical Environment. National Academy Press. Washington D.C. P. 206–231. 1986.
- *Slyunyaev N.N., Mareev E.A., Zhidkov A.A.* On the variation of the ionospheric potential due to large-scale radioactivity enhancement and solar activity // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 120. P. 7060–7082. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015JA021039>
- *Tinsley B.A., Heelis R.A.* Correlations of atmospheric dynamics with solar activity evidence for a connection via the solar wind, atmospheric electricity, and cloud 8 microphysics // J. Geophys. Res. V. 98. P. 10375–10384. 1993.
- *Whipple F.J.W.* On the association of the diurnal variation of electric potential gradient in fine weather with the distribution of thunderstorms over the globe // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. V. 55. P. 1–17. 1929.
- *Wilson C.T.R.* Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms // Philos. Trans. Roy. Soc. London. V. 221A. P. 73–115. 1920.