

УДК 550.348;550.386;551.21;523;539.17;539.125;539.122

О ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ И ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ В СВЯЗИ С ЧИЛИЙСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 27 ФЕВРАЛЯ И ВУЛКАНИЧЕСКИМ ИЗВЕРЖЕНИЕМ В ИСЛАНДИИ В МАРТЕ–АПРЕЛЕ 2010 г.

© 2013 г. И. П. Шестопапов¹, С. В. Белов², А. А. Соловьев¹, Ю. Д. Кузьмин³

¹ ФГБУ науки Геофизический центр РАН, г. Москва

² ОАО “Зарубежгеология”, г. Москва

³ Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
e-mail: shest@wpcb.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011 г.

После доработки 18.06.2012 г.

Исследована связь солнечной и геомагнитной активности с сейсмичностью и вулканическими извержениями на земном шаре за 1680–2010 гг. Обнаружены вековые циклы эндогенной активности Земли, связанные с солнечной и геомагнитной активностью, в начале которых наблюдались солнечные циклы с небольшим числом пятен, характерных для начала вековых циклов, и сильная сейсмическая и вулканическая активность, которая сохранилась на протяжении нескольких десятков лет. Установлена значимая отрицательная корреляция сейсмичности и вулканизма с солнечной и геомагнитной активностью. В экспериментах, проводимых в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Пушкова РАН, г. Троицк Московской обл., и одновременно в Камчатском филиале Геофизической службы РАН, получено подтверждение того, что во время подготовки сильных землетрясений происходит возмущение геомагнитного поля и генерация нейтронов. Предполагается, что механизм первичной генерации нейтронов земного происхождения связан с ядерными реакциями в недрах Земли.

DOI: 10.7868/S0016794013010185

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что изменение солнечной активности вызывает цепочку взаимосвязанных явлений в межпланетном пространстве, магнитосфере, ионосфере, нейтральной атмосфере и биосфере. Влияние солнечной активности на живую и неживую природу Земли можно представить следующим образом: возмущение на Солнце (мощная вспышка), далее – в межпланетной среде (увеличение концентрации и скорости солнечного ветра, изменение параметров магнитного поля), затем – возмущение магнитосферы и плазмосферы (магнитная буря), и наконец – изменения потоков космических лучей в окрестности Земли, циркуляции в атмосфере, за которыми следуют изменения погоды и другие природные явления, вариации напряженности и спектра электромагнитных полей Земли, приводящие к сдвигам в психо-физиологических показателях организма [Шестопапов и Харин, 2006].

Анализ публикаций о взаимосвязи солнечной активности с сейсмичностью показывает, что в зависимости от качества и полноты используемых каталогов и длительности рядов наблюдений диапазон выводов изменяется от утверждений о

существовании корреляции между энергией землетрясений с числами Вольфа до обнаружения антикорреляции между ними [Сытинский, 1989; Georgieva et al., 2002; Лоцинская, 1999]. Поэтому одной из задач явилось создание наиболее полного и однородного каталога землетрясений за длительный период, что позволило бы на его основе оценить взаимосвязь энергии землетрясений с солнечной активностью.

Наряду с сейсмичностью одним из главных проявлений эндогенной активности Земли является вулканизм. Изучению различных его аспектов посвящена обширная литература, осуществляется международная программа “Global Volcanism program” [<http://www.volcano.si.edu/world/>]. Пространственное распределение землетрясений и вулканических извержений рассматривалось в работах [Левин и Чирков, 1999; Булатова, 2005; Фёдоров, 2002; Хаин и Халилов, 2009].

Внутригодовая синхронность проявлений сейсмичности и вулканизма с максимумом в июне-июле выявлена в работе [Белов, 1986].

В наших исследованиях на основе статистики за длительный период изучалась взаимосвязь эндогенной активности Земли (землетрясений и

вулканизма) с солнечной и геомагнитной активностью [Соболев и др., 1998; Шестопалов и Рогожин, 2005; Шестопалов и Харин, 2006; Белов и др., 2009; Харин и др., 2010; Белов и др., 2010].

В основе этих исследований лежали следующие положения:

а) Солнце, межпланетная среда, магнитосфера, ионосфера, атмосфера Земли, другие геосферы и сама Земля с происходящими в ней процессами, приводящими к землетрясениям и другим природным явлениям, представляют собой единую физическую систему, т.е. сейсмические и вулканические явления – часть единого физического процесса в системе “Солнце–Земля”;

б) процессы в системе “Солнце–Земля” взаимосвязаны, от состояния каждого из составляющих этой системы зависят физические и другие процессы;

в) сейсмические и вулканические явления определяются процессами как земного, так и солнечного происхождения. Из экспериментов [Hanel et al., 1981, 1983; Pollack et al., 1993, 1986], проводимых в космосе и на Земле, известно, что Земля и другие крупные планеты, так же, как и Солнце, имеют собственный, внутренний тепловой источник энергии. Это свидетельствует о наличии собственной эндогенной активности Земли, главным проявлением которой являются тектонические и сейсмические процессы.

В настоящей работе продолжены эти исследования. Основной ее целью является получение подтверждения о регистрации на поверхности Земли нейтронов, связанных с землетрясениями и вулканическими извержениями.

2. ВЕКОВЫЕ ЦИКЛЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ, СЕЙСМИЧНОСТИ И ВУЛКАНИЗМА ЗЕМЛИ

Для изучения связи между солнечной активностью, сейсмичностью и вулканизмом Земли проанализированы данные о сейсмической и вулканической энергии, выделившейся из очагов землетрясений и вулканических извержений на всем земном шаре за период с 1680 по 2010 г., и сопоставлены с циклами солнечной активности.

Для данной работы был создан каталог землетрясений с магнитудами $M_s \geq 6$ и $m_b \geq 5.5$, в котором использовались базы данных: Национального Центра информации о землетрясениях Геологической службы США, (NEIC, USGS) [<http://neic.usgs.gov>] и Международного сейсмологического центра, (ISC) [<http://www.isc.uk>]. Энергия землетрясений в эрг вычислялась по формуле: $\lg E = 11.8 + 1.5 M_s$ для землетрясений, эпицентры которых находились на глубине меньше 100 км, и по формуле: $\lg E = 5.8 + 2.4 m_b$ для землетрясе-

ний, эпицентры которых – на глубине больше 100 км.

Для анализа вулканизма нами использованы данные о вулканических извержениях каталога Смитсоновского института (The Smithsonian Institution's Global Volcanism Program, [<http://www.volcano.si.edu/world/>]). На основе этого была создана общая мировая информационная база данных, включающая объемы излившейся лавы и извергнутого пепла в км³. Так как последний каталог не содержит данных об энергии извержений, оценка ее выполнена на основе установленного авторами на материале каталога И.И. Гущенко [Гущенко, 1979], уравнения корреляционной связи между объемом выброшенного пепла и энергией извержений. На основании этих данных выявлены вековые циклы солнечной активности, сейсмичности, а также эндогенной активности Земли в целом продолжительностью ~100 лет, т.е. включая вулканическую активность. В начале каждого из циклов XVIII, XIX и XX веков сейсмическая и вулканическая активность имели максимальное значение, значения же чисел Вольфа, характеризующие солнечную активность, были минимальны. Таким образом, наблюдалась существенная отрицательная корреляция сейсмичности и вулканизма Земли с солнечной активностью. Другими словами, наибольшая сейсмическая и вулканическая активность имела место при небольшой солнечной активности, и наоборот.

Учитывая наличие наиболее полных и достоверных данных за 1888–2010 г., целесообразно детали вековых вариаций сейсмической и вулканической составляющих эндогенной активности Земли рассмотреть подробнее на примере цикла XX века (рис. 1).

Как можно видеть, в конце XIX века происходило быстрое увеличение сейсмической активности. Максимального значения она достигла в начале XX столетия, затем происходило постепенное ее понижение (см. рис. 1б, в). Отметим, что вид кривой вариаций числа землетрясений с магнитудой $M \geq 8$ близок к кривой энерговыделений при землетрясениях. Это обусловлено тем, что суммарная сейсмическая энергия определяется в большей части крупными землетрясениями. Минимальные значения сейсмической активности наблюдались перед 1990-м годом, т.е. примерно через 100 лет от начала возрастания. Солнечная активность в период максимума энерговыделений при землетрясениях (в начале XX столетия) имела минимальные в течение всего XX столетия значения (см. рис. 1а). На протяжении столетия солнечная активность постепенно нарастала. Наиболее высокие ее сглаженные значения имели место в пятидесятые и восьмидесятые годы. Этим максимумам солнечной активности соответствует относительно низкая сейсмическая

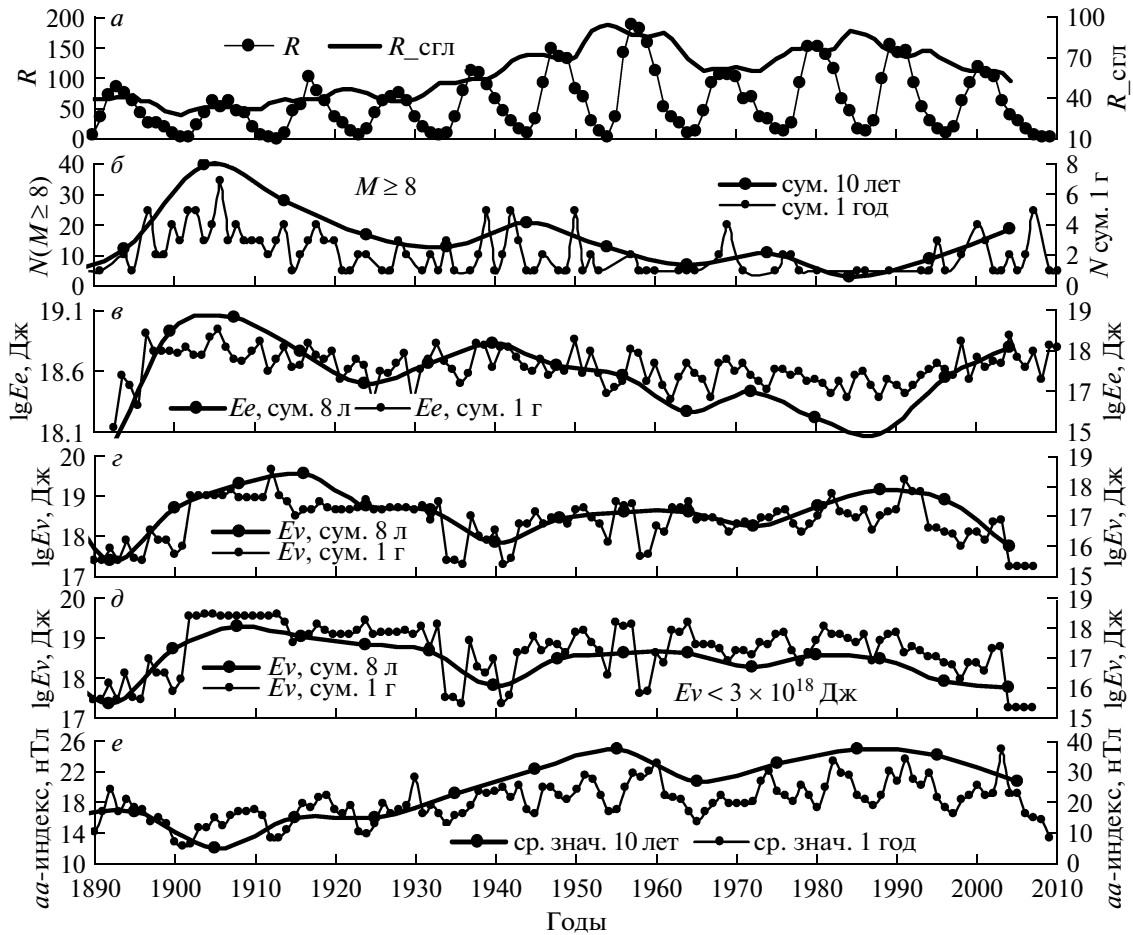


Рис. 1. Временные вариации за период с 1890 по 2010 гг: *a* – среднегодовых значений чисел Вольфа (R , шкала слева) и сглаженных по одиннадцати значениям ($R_{\text{сгл}}$, шкала справа); *b* – количества землетрясений (N) с магнитудой $M \geq 8$ в год (шкала справа) и за 10 лет (шкала слева); *c* – суммарных годовых значений (шкала справа) и за 8 лет (шкала слева) сейсмической энергии землетрясений на земном шаре; *d* – суммарных годовых значений (шкала справа) и за 8 лет (шкала слева) энергии вулканических извержений на земном шаре; *e* – энергии вулканических извержений на земном шаре с энергией $E < 3 \times 10^{18}$ Дж; *e* – aa -индекса, среднегодовых значений (шкала справа) и средних значений за 10 лет (шкала слева).

энергия. В целом установлена отрицательная корреляция между этими параметрами. Коэффициент корреляции (r) = -0.8 . Это позволяет утверждать, что, как правило, наибольшая сейсмическая активность имеет место при минимальной солнечной активности, и наоборот.

В работе, на основе созданной базы данных, проводилось сопоставление максимального энерговыделения при вулканических и сейсмических событиях. Из их сравнения следует, что максимальная энергия вулканического извержения превышает почти на порядок максимальное энерговыделение во время землетрясения. Учитывая это, можно полагать, что магматические очаги вулканов являются наиболее мощными накопителями энергии, своеобразной “тяжелой артиллерией” тектоно-магматического процесса, проявляющейся на более поздних его стадиях, что подтверждается и геологической практикой.

При сравнении графиков по сейсмичности и вулканизму обращает на себя внимание запаздывание в проявлении максимумов вулканизма по отношению к максимумам сейсмичности на несколько лет, наблюдаемое в целом ряде случаев. В целом вековой вулканический цикл оказывается несколько (примерно на один солнечный цикл) сдвинут по времени. Такое небольшое запаздывание проявлений вулканизма по отношению к сейсмичности, по-видимому, указывает на то, что сейсмический процесс по сравнению с вулканизмом, является более “оперативным откликом” геологической среды на процессы в глубинных оболочках Земли.

Из рисунка 1 видно, что в целом между солнечной активностью и энергией вулканических извержений также существует отрицательная корреляция. Однако имеется к этому дополнение. Из рисунка видно, что наиболее высокая отрица-

тельная корреляция ($r = -0.87$) между ними наблюдается для таких вулканических извержений, для которых энергия извержений сопоставима с энерговыделением во время землетрясений (см. рис. 1д). Для всех вулканических извержений такая корреляция значительно ниже.

Кроме того, устанавливается положительная корреляция ($r = 0.71$) между энерговыделениями при землетрясениях и энергией вулканических извержений, что является прямым свидетельством внутреннего единства тектонического и магматического процессов.

Ранее в статье [Шестопапов и Харин, 2006] было показано, что столетний цикл солнечной и сейсмической активности разбивается на три периода по ~33 года, длительность каждого из которых примерно кратна трем 11-летним циклам солнечной активности. Интересно, что особенности выделения вулканической энергии дают основание говорить, не только о наличии векового цикла вулканизма, но также и о разделении его на три аналогичных периода (см. рис. 1г–д).

В работах [Шестопапов и Харин, 2006; Белов и др., 2009, 2010] отмечалось, что наиболее сильные землетрясения происходят в начале каждого векового цикла. По нашим данным третий (начиная с 1680 г.) вековой цикл, начавшийся в 1890 г., закончился в конце XX в. Это позволяет считать, что в 90-х годах прошлого века начался новый вековой цикл, в начале которого (по аналогии с предшествующими) должны будут наблюдаться относительно пониженная солнечная активность и, наоборот, сильная сейсмическая и вулканическая активность, которая сохранится на протяжении примерно первой трети столетнего цикла. Землетрясения 26.12.2004 г. с магнитудой $M = 9$, 28.03.2005 г. с $M = 8.6$ в районе Индонезии, землетрясения в 2006 и 2007 гг. с $M > 8$, а также последние данные по сейсмичности за 2008–2011 гг. подтверждают этот вывод. Землетрясение в Чили с $M = 8.8$, которое произошло 27 февраля 2010 г., и землетрясение в Японии с $M = 9$ 11 марта 2011 г. продолжило список мощных землетрясений, которые, как прогнозировалось, будут происходить в начале наступившего векового цикла. Данные о вулканическом извержении в апреле 2010 г. также подтверждают этот вывод. Заметим, что похожий тренд графика энергии землетрясений (аналогичный высокому нарастанию сейсмической энергии от минимальной в 1990 г. к весьма высокой в 2004–2011 г.) наблюдался приблизительно в 1890 г.

В действительности, как уже отмечалось, вековой вулканический и солнечный цикл оказывается сдвинут по времени по отношению к сейсмическому на несколько лет. Поэтому начало нового векового солнечного цикла начинается после завершения 23-го цикла солнечной активности.

3. ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ

Наиболее представимым индексом геомагнитной активности является A_p -индекс — планетарная среднесуточная эквивалентная амплитуда возмущения магнитного поля Земли, определяемая по специальной сети среднеширотных обсерваторий. Однако он стал рассчитываться с 1932 г. Поэтому для наших исследований использовался aa -индекс — среднесуточная эквивалентная амплитуда, определяемая по двум антиподальным обсерваториям (Гринвич и Мельбурн) с 1867 г. (см. рис. 1е).

Из рисунка видно, что на протяжении указанного периода происходит увеличение значений aa -индекса и чисел Вольфа. Сейсмическая активность на протяжении всего этого времени понижается. То есть на протяжении указанного периода наблюдалась отрицательная корреляция aa -индекса с сейсмической активностью ($r = -0.8$, см. рис. 1б, в) и положительная — с числами Вольфа ($r = 0.8$). Высокая отрицательная корреляция aa -индекса с вулканической активностью наблюдается только для таких извержений, максимальная энергия которых сравнима с энергией землетрясений (см. рис. 1д, е.).

Таким образом, на протяжении исследуемого периода наблюдается существенная отрицательная корреляция сейсмической энергии с солнечной и геомагнитной активностью. Отрицательная корреляция вулканической энергии с солнечной и геомагнитной активностью наблюдается не для всех извержений.

4. О НЕЙТРОНАХ ЗЕМНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Известно, что при взаимодействии космического излучения с ядрами атомов воздуха в атмосфере образуются нейтроны в широком диапазоне энергий: от тепловых до энергий первичных космических частиц. Другой источник генерации нейтронов — Солнце. Образование нейтронов может происходить во время солнечных вспышек при взаимодействии ускоренных частиц с различными ядрами солнечной атмосферы. Для регистрации космического излучения, а также потоков протонов, генерируемых во время крупных вспышек, в 50-х г. XX столетия на поверхности Земли была создана сеть нейтронных мониторов [Дорман, 1963]. Ряд экспериментальных наблюдений последних лет показали, что сейсмическая активность может приводить к образованию нейтронов [Кужевский и др., 1993; Соболев и др., 1998; Шестопапов и Харин, 2006; Шестопапов и др., 2011]. По наблюдениями, проводившимся одновременно на искусственных спутниках и на Земле, обнаружено, что вариации космических лу-

чей, регистрируемые нейтронными мониторами на Земле во время возмущений в межпланетной среде, определяются не только процессами на Солнце, но и явлениями, происходящими в геосреде во время землетрясений. То есть нейтронные мониторы, установленные на Земле, регистрируют частицы не только космического, солнечного, но также и земного происхождения. Энергетический спектр этих нейтронов охватывает диапазон от тепловых до быстрых. Вывод о нейтронах земного происхождения подтверждается в работе японского исследователя [Yasunaga, 1993], показавшего, что перед землетрясениями и вулканическими извержениями происходит возрастание потоков нейтронов в несколько раз по сравнению с контрольными измерениями, проводимыми в относительно геодинамически спокойной области. В исследованиях, проводившихся в течение ряда лет на шарах-зондах в атмосфере Земли в НИИЯФ МГУ, была обнаружена анизотропия потоков тепловых нейтронов [Кужевский и др., 1995]. Оказалось, что на высотах до 3–5 км поток нейтронов, направленный от Земли, существенно превышал поток к Земле (среднее значение анизотропии для этих высот составляло 0.6 ± 0.2). Данные факты позволяли считать, что вблизи земной коры существует поле тепловых нейтронов, параметры которого, по-видимому, определяются эндогенной активностью Земли.

4.1. Результаты наблюдений потоков нейтронов и гамма-излучения в связи с мощным Чилийским землетрясением магнитудой $M_w = 8.8$ 27 февраля и с извержением вулкана Эйяфьятлайокудль в Исландии в марте–апреле 2010 г.

В экспериментах, проводимых в 2010 г. одновременно в Московской обл. и на Камчатке, получено подтверждение регистрации на поверхности Земли нейтронов, связанных с землетрясениями и вулканическими извержениями [Белов и Шестопапов, 2010; Шестопапов и др., 2011].

а) Измерения тепловых и быстрых нейтронов, а также гамма-излучения проводились приборами, установленными в экспериментальном павильоне отдела космических лучей Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), в г. Троицк. Московской обл.

- Установка для регистрации тепловых нейтронов состояла из 15-ти газоразрядных счетчиков типа СИ-19Н, диаметром 3 см и длиной 22 см, наполненных газом гелий-3 с добавкой аргона при давлении 405.3 кПа, и регистрировала тепловые нейтроны с энергией 0.025 эВ с эффективностью 0.8.

- Установка для регистрации быстрых нейтронов состояла из двух блоков. Каждый из них

включал 23 гелиевых пропорциональных счетчика тепловых нейтронов типа ПД 631 (длина ~ 1 м), расположенных в два ряда и окруженных полиэтиленовыми плитами, толщиной 15 см. Эффективность регистрации тепловых нейтронов – 80%.

- Детектор гамма излучения $\varnothing 63 \times 63$ GD состоял из сцинтилляционного детектора на основе кристаллического сцинтиллятора NaJ(Tl) размером $\varnothing 63 \times 63$ мм³.

- Все эти приборы работали в непрерывном режиме с 2006 г.

б) Измерения тепловых нейтронов также проводились прибором, установленным на пункте комплексных наблюдений Камчатского филиала Геофизической службы РАН. Пункт расположен в межгорной долине реки Карымшина в 50 км от г. Петропавловска-Камчатского.

- Нейтронный детектор изготовлен в НИИЯФ МГУ. Он состоит из 6-ти стандартных нейтронных счетчиков СИ-19Н.

4.1.1 Вариации потоков нейтронов и гамма излучения в феврале 2010 г.; анализ результатов измерений

Ниже дан анализ вариаций потоков нейтронов и гамма излучения за 24–28 февраля 2010 г. Исследование проводилось в связи с мощным землетрясением магнитудой $M_w = 8.8$, которое произошло 27 февраля 2010 г. в 6:34 UT у берегов Чили в 90 км от г. Консепсьон на глубине 35 км (координаты землетрясения: $\varphi = 35.93^\circ$ S, $\lambda = 72.78^\circ$ W) [<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/>]. Его цель – подтверждение предположения о том, что сейсмическая активность Земли может быть источником нейтронов и других частиц, а возрастание этих потоков перед землетрясением может наблюдаться на значительном расстоянии от места событий. В работе также представлены данные о геомагнитных возмущениях, которые наблюдались в рассматриваемый период. Для этого использовались значения магнитного поля Земли с мировой сети станций Интермагнет (всего ~100 станций) [<http://intermagnet.org/>]. Необходимо отметить, что после продолжительного минимума солнечной активности, который наблюдался в 2008–2009 гг., 2010 г. – это начало нового 24-го солнечного цикла.

На рисунке 2 представлены значения K_p -индекса, характеризующего магнитную активность в планетарном масштабе. Из рисунка видно, что все значения этого индекса незначительны. За указанный период магнитные бури не наблюдались.

На этом же рисунке приведены минутные значения интенсивности потоков тепловых и быстрых нейтронов, гамма излучения, зарегистрированных в Москве, и интенсивности потоков тепловых нейтронов на Камчатке, а также магнитуда землетрясений 24–28 февраля 2010 г. Интенсив-

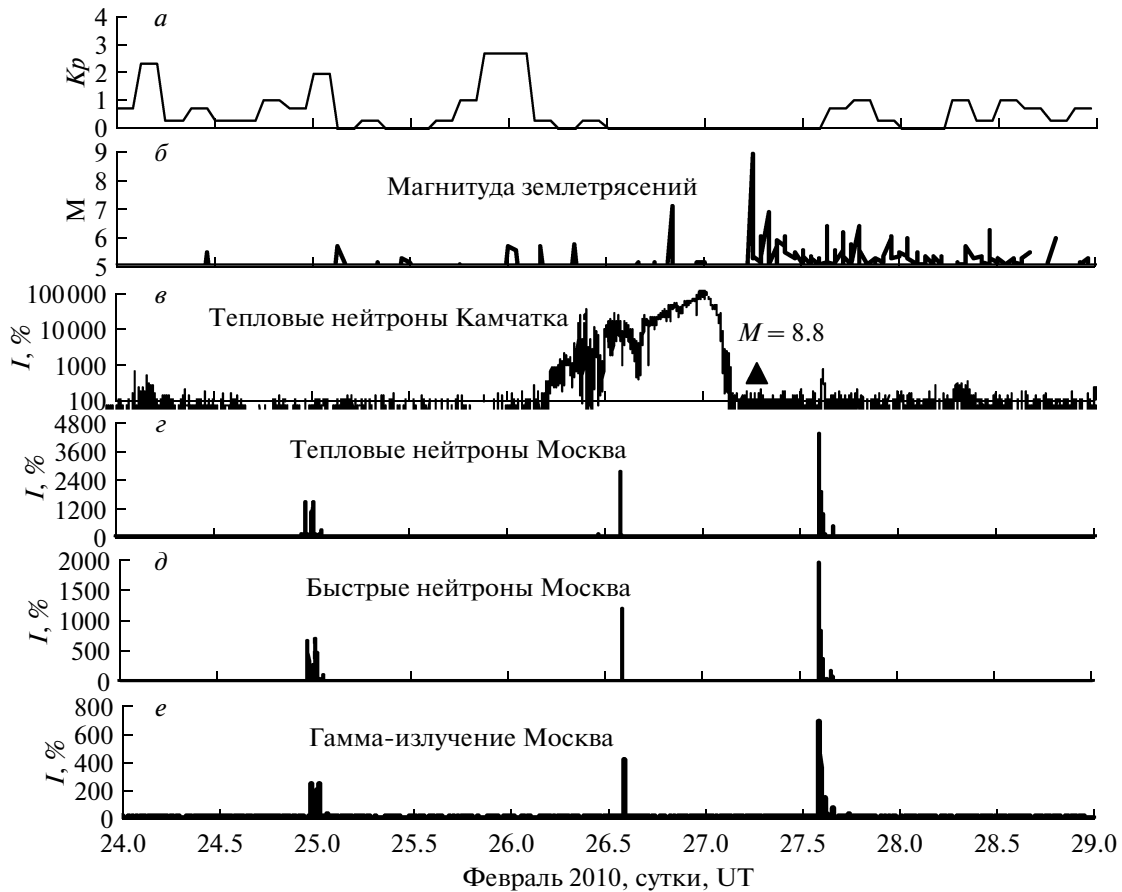


Рис. 2. Временные вариации 24–29 февраля: *a* – *Kp*-индекса; *б* – магнитуды землетрясений (*M*); *в* – интенсивности тепловых нейтронов, зарегистрированных на Камчатке; *г–е* – интенсивности нейтронов, тепловых и быстрых; гамма-излучения, зарегистрированных в ИЗМИРАН.

ность потоков частиц I , выраженная в процентах, определялась следующим выражением: $I = (Ni - Nф)/Nф \times 100\%$, где Ni – минутные значения потоков частиц, $Nф$ – фоновые значения потоков частиц, наблюдаемые 24 февраля.

Из рисунка 2 видно, что примерно за двое с половиной суток до землетрясения 27 февраля, т.е. в конце 24–начале 25 февраля, стали происходить значительные всплески интенсивности тепловых и быстрых нейтронов, и гамма-излучения, зарегистрированных в Москве (см. рис. 2*г–е*). На рисунке 2 приведены минутные значения их потоков. Максимальная амплитуда тепловых нейтронов за этот период по минутным данным достигала $\sim 5000\%$, быстрых нейтронов – $\sim 2000\%$, гамма-излучения – $\sim 800\%$. Из рисунка видно, что интенсивные всплески частиц наблюдались не только перед землетрясением 27 февраля, но и позже. Из рисунка 2 также видно, что характер вариаций интенсивности тепловых нейтронов, зарегистрированных в Москве и на Камчатке, различный. Основной особенностью характера вариаций тепловых нейтронов, зарегистрированных на Кам-

чатке, является то, что примерно за сутки до землетрясения интенсивность нейтронов стала увеличиваться от нескольких десятков процентов, и за шесть часов до землетрясения возрастание достигло максимума и составляло величину $\sim 100000\%$. То есть от начала возрастания до максимума интенсивность увеличилась на несколько порядков (см. рис. 2*в*). Затем после максимума наблюдалось быстрое уменьшение интенсивности частиц, и во время землетрясения она достигла фоновых значений.

Покажем, что период, предшествующий Чилийскому землетрясению, также характеризуется возмущением магнитного поля Земли.

На рисунке 3 представлены данные о вариациях магнитного поля, которые наблюдались 24 февраля. Здесь же представлены вариации интенсивности тепловых нейтронов, зарегистрированных на Камчатке. Из рисунка видно, что 24 февраля, в первой половине суток прибором, установленным на Камчатке, были зарегистрированы всплески интенсивности тепловых нейтронов. В Москве воз-

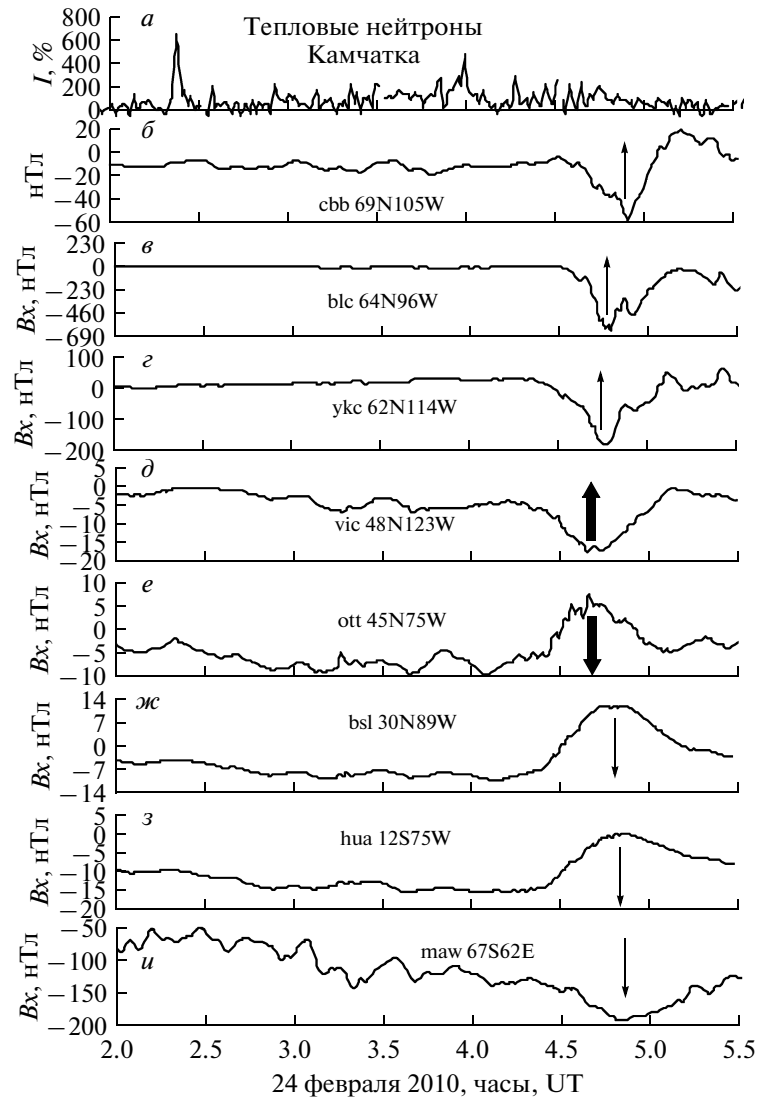


Рис. 3. Временные вариации: *a* – интенсивности нейтронов на Камчатке, *б–u* – амплитуды напряженности магнитного поля Земли, *B_x*-компонента, 24 февраля 2010г.

растание потоков нейтронов в это время не наблюдалось.

Рассмотрим некоторые особенности характера вариаций напряженности магнитного поля Земли в это время. На рисунке 3 представлены вариации магнитного поля Земли (*B_x*-компонента), зарегистрированные на тех станциях, на которых было обнаружено значительное возмущение в период, предшествующий Чилийскому землетрясению 27 февраля, т.е. примерно за трое суток до землетрясения. Все эти станции находятся в западном полушарии Земли, на рисунке указаны коды станций и их географические координаты (см. рис. 3*б–u*). Стрелками на них указаны экстремумы возмущения. Максимальная амплитуда возмущения $B_x = -690$ нТл наблюдалась на станции VLC, Baker Lake, Canada (64.3° N, 96° W). Длитель-

ность этого возмущения приблизительно один час. Значительные возмущения наблюдались также на следующих станциях: YKC, Yellowknife, Canada (62.5° N, 114.5° W), $B_x = -178$ нТл; NARS, Narsarsuaq, Denmark (61.2° N, 45.4° W), $B_x = -160$ нТл; FCC, Fort Churchill, Canada, (58.8° N, 94° W), $B_x = -267$ нТл. В южном полушарии максимальная амплитуда возмущения $B_x = -200$ нТл наблюдалась на станции MAW, Mawson, Australia (67.5° S, 62.9° E). Как уже отмечалось, за указанный период обстановка в магнитосфере и ионосфере была спокойной, магнитные бури не наблюдались. Тем не менее, амплитуда возмущения в этот период достигла примерно таких же значений, которые обычно наблюдаются во время средней магнитной бури. Предполагается, что причина этих процессов имеет эндогенную природу, не исключено также и внешнее воздействие.

Укажем еще некоторые особенности характера вариаций магнитного поля Земли во время этого возмущения. Стрелками на рис. 3 указаны экстремумы возмущения. Жирные стрелки на кривых рис. 3д и рис. 3е, на которых представлены данные со станций VIC, Victoria, Canada (48.52° N, 123.42° W), и OTT, Ottawa, Canada (45.40° N, 75.55° W), указывают на то, что экстремумы этих кривых наблюдались раньше, чем на более высоких широтах, как в северном полушарии, так и в южном. Время запаздывания возмущений от средних широт до высоких как в северном полушарии, так и в южном составляет ~15 мин. Можно также отметить, что возмущение магнитного поля в данном случае наблюдалось в узком слое. Ось этого слоя по грубой оценке проходит примерно от 100° W в северном полушарии, и от центрального меридиана в южном полушарии, т.е. она наклонена относительно вертикальной оси в сторону, противоположную наклону оси вращения Земли. Можно оценить скорость распространения возмущения в данном слое. Она может составить величину 5–20 км/с.

4.1.2. Вариации потоков нейтронов и гамма-излучения в марте–апреле 2010 г.; анализ результатов измерений

Проводились исследования в связи с извержением вулкана Эйяфьятлайокудль в Исландии в апреле 2010 г. (координаты вулкана: φ – 63.38° N, λ – 19.37° W). Вулкан покрыт ледниковой шапкой. Высота вулкана составляет 1666 м. Диаметр кратера вулкана равен 3–4 км, ледниковое покрытие – ~100 кв. км. Последнее извержение Эйяфьятлайокудль было зарегистрировано в 1821 году. 21 марта 2010 г. вулкан проснулся после 200-летней спячки, а основная фаза началась 14 апреля. Извержение было настолько мощным, что в Исландии был введен режим чрезвычайного положения. Объем выброшенного пепла по предварительным данным за 14–18 апреля составил не менее 0.25 км³ [http://en.wikipedia.org/wiki/2010_eruptions_of_Eyjafjallaj]. Это – одно из крупных извержений после 1993 г. [<http://www.volcano.si.edu/world/>].

Временные вариации Kp -индекса, потоков нейтронов и гамма-излучения в марте–апреле 2010 г. представлены на рис. 4.

Из рисунка видно, что как на Камчатке, так и в Московской обл. возрастание потоков частиц на несколько порядков наблюдалось за несколько суток до начала извержения. По данным ИЗМИРАН всплески интенсивности тепловых, быстрых нейтронов и гамма-излучения были зарегистрированы в самом начале марта. По данным на Камчатке возрастание интенсивности тепловых нейтронов стало наблюдаться 14 марта. 17 марта там поток частиц достиг значения 3200 имп/мин. В начале мар-

та он составлял несколько имп/мин. То есть интенсивность потоков тепловых нейтронов за трое суток до начала извержения увеличилась на ~80000%. По данным ИЗМИРАН в начале марта максимальная интенсивность всплесков тепловых нейтронов достигла ~5000%, быстрых нейтронов – ~2000%, гамма-излучения – ~800%.

Основная фаза извержения (взрывная) наблюдалась 14–18 апреля. Более подробно потоки нейтронов и гамма-излучения за этот период представлены на рис. 5. Поток тепловых нейтронов на Камчатке 14 апреля начал увеличиваться от нескольких имп/мин и в конце суток достиг значения 10000–14000 имп/мин. То есть интенсивность потоков тепловых нейтронов на Камчатке в течение суток увеличилась почти на 300000%. (см. рис. 5б). По данным ИЗМИРАН в Московской обл. наибольший поток нейтронов наблюдался 18 апреля, т.е. не в начале взрывной фазы, как это наблюдалось на Камчатке, а в конце. Покажем, что во время вулканического извержения, также как и в период Чилийского землетрясения, происходили геомагнитные возмущения. На рисунке 6 представлены данные о вариациях магнитного поля, которые наблюдались 11–16 апреля. Здесь же представлены вариации интенсивности тепловых нейтронов, зарегистрированных на Камчатке и в ИЗМИРАН. Из рисунка видно, что геомагнитные возмущения наблюдались до начала и во время взрывной фазы извержения в северном и южном полушариях. На рисунке 6 представлены вариации магнитного поля Земли (B_x -компонента), зарегистрированные на тех станциях, на которых было обнаружено значительное возмущение в период взрывной фазы извержения. Максимальная амплитуда возмущения B_x ~ –1500 нТл наблюдалась на станции SOD_X, Sodankyla, Finland (67° N, 26° E). Длительность этого возмущения – приблизительно один час. Как видно из рис. 5е, в южном полушарии также происходили значительные возмущения магнитного поля.

Таким образом, во время подготовки крупных землетрясений и вулканических извержений происходит возмущение геомагнитного поля и генерация нейтронов, фиксируемых в районах, отдаленных от эпицентра будущих событий.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изложенные факты позволяют считать, что сейсмическая и вулканическая активность Земли и генерация потоков нейтронов и других частиц могут быть взаимосвязанными процессами. Возрастание этих потоков перед землетрясением наблюдается даже на весьма значительном расстоянии от места событий. Для объяснения возможных механизмов генерации нейтронов необходимо обратить внимание на следующие факты.

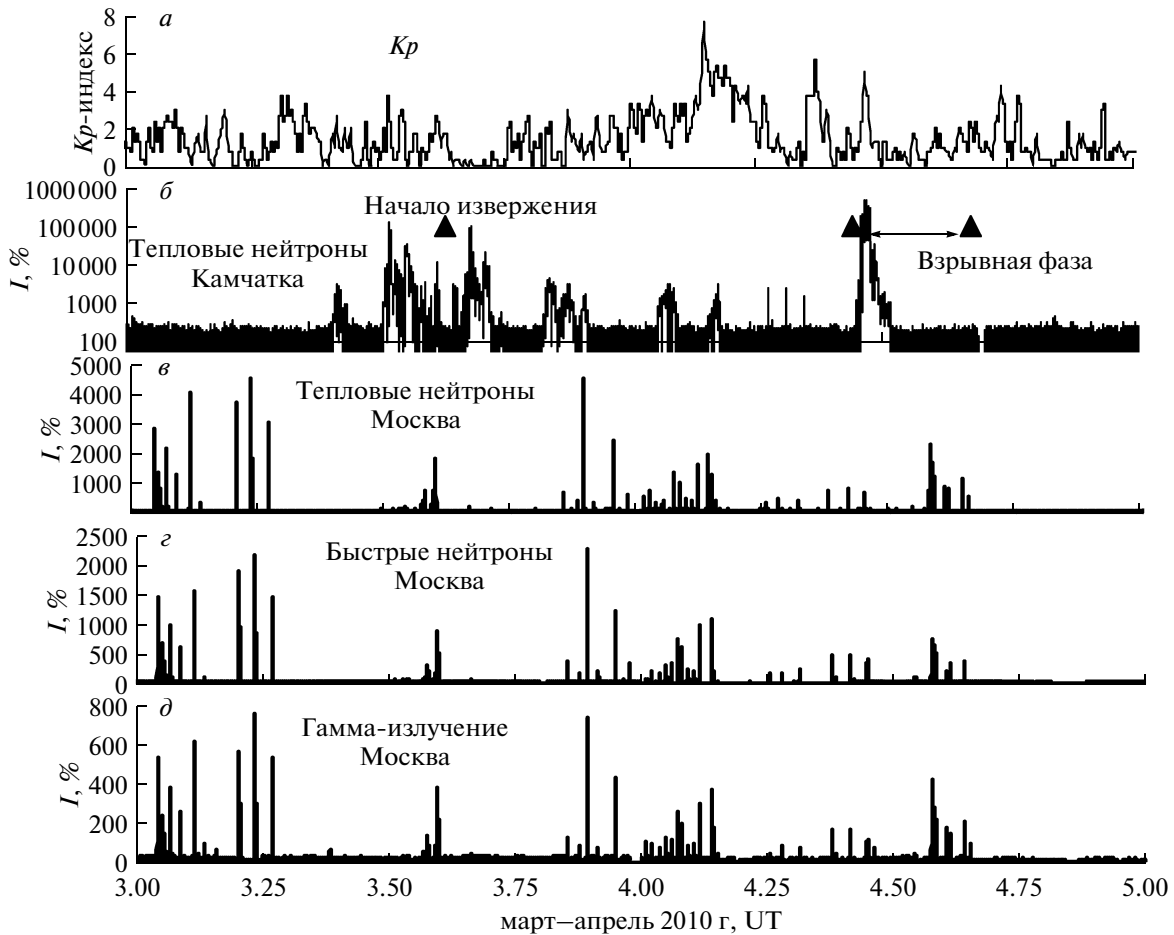


Рис. 4. Временные вариации в марте–апреле 2010 г. (на оси абсцисс – дата, выраженная в десятичных долях месяца): *a* – *Kp*-индекса; *б* – интенсивности тепловых нейтронов, зарегистрированных на Камчатке; *в–д* – интенсивности нейтронов, тепловых и быстрых, гамма-излучения, зарегистрированных в ИЗМИРАН. Интенсивность потоков частиц *I* определялась следующим выражением: $I = (Ni - Nф) / Nф \times 100\%$, где *Ni* – минутные значения потоков частиц, *Nф* – фоновые значения потоков частиц.

Известно, что крупные землетрясения, такие как в Чили 27 февраля 2010 г. и 28 декабря 2004 г. на Суматре, вызывали изменение длительности суток и изменение ориентации земной оси [http://www.jpl.nasa.gov/news/index.cfm]. То есть очевидно, что в случае сильных землетрясений возмущения охватывают все геосферы Земли. Возможно, подобные возмущения отражают дрейф ядра и его вынужденные колебания с широким спектром частот относительно вязко-упругой мантии Земли [Подобед и Нестеров, 1982; Баркин, 2008]. В настоящее время многие ученые считают, что объяснения флуктуаций скорости вращения Земли следует искать в эффектах взаимодействия мантии и ядра. В геофизике считается установленным, что ядро вращается относительно мантии со скоростью $\sim 0.2^\circ$ в год. Дрейф ядра и интенсификация его циклических смещений сопровождаются упругими деформациями мантии и соответствующими резкими изменениями напряженного и термодинамического состо-

яния всех ее слоев. Установлено [Ениколопов и др., 1986; Шаров, 1990], что при деформациях внутренняя энергия тела возрастает, и вещество переходит в качественно новое активированное состояние, в котором возможно протекание реакций и процессов, невозможных при обычных условиях. Таким образом, в процессе механического воздействия, реализуемого в пластичной области, возможен переход вещества горных пород в активированно-ионизированное состояние. Наблюдаемые всплески нейтронов и других частиц, длительность которых составляет несколько минут, позволяют сделать вывод, что процессы внутри Земли, которые приводят к генерации частиц, протекают очень быстро. Это означает, что в гипоцентре землетрясения и очаге вулканического извержения могут происходить кратковременные увеличение давления и температуры, причина которых – ядерные реакции в недрах. Исследования изотопного состава гелия из алмазных месторождений в метаморфических комплексах Север-

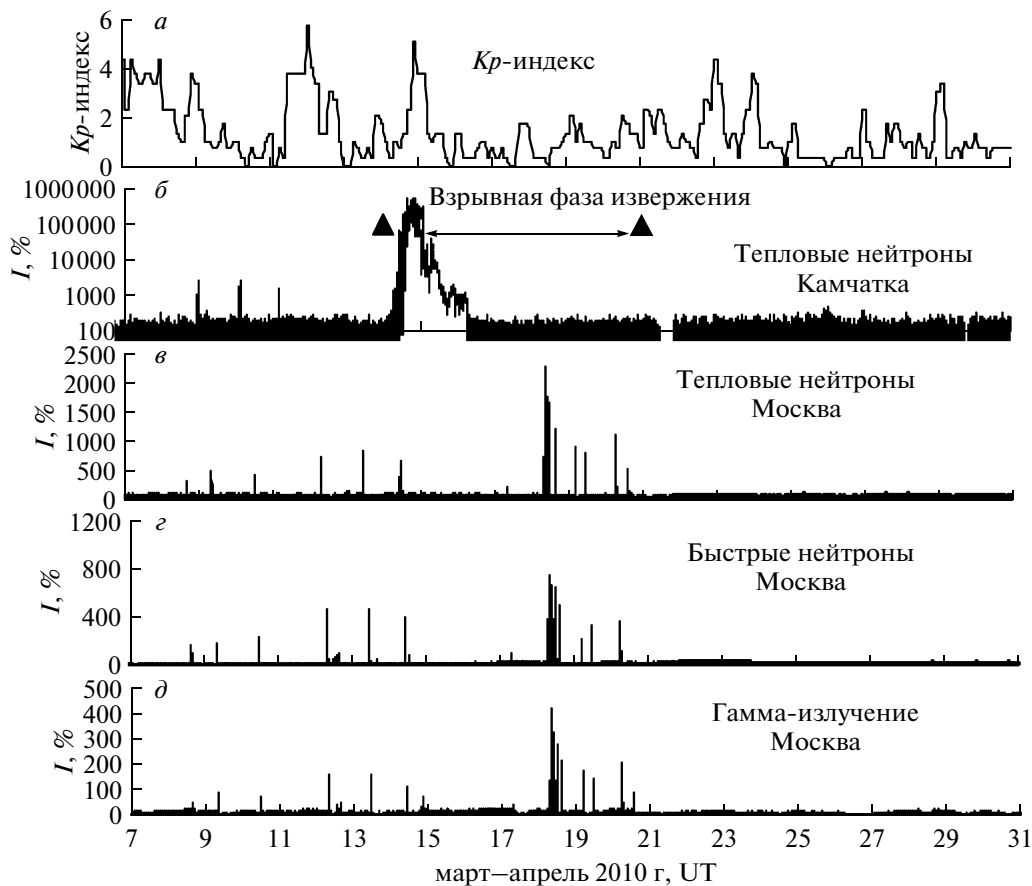


Рис. 5. Временные вариации в апреле 2010 г.: *a* – *Kp*-индекса; *б* – интенсивности тепловых нейтронов, зарегистрированных на Камчатке, треугольники – начало и конец взрывной фазы извержения вулкана; *в–д* – интенсивности нейтронов, тепловых и быстрых, гамма-излучения, зарегистрированных в ИЗМИРАН. Данные нейтронов и гамма-излучения имеют минутные значения.

ного Казахстана, возникших по этим данным вследствие палеоземлетрясений, показали, что соотношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ достигает в них беспрецедентно больших значений, вплоть до 7×10^{-1} [Шуколюков и др., 1996]. Аномально высокими для алмазов являются также и концентрации изотопов гелия – $^3\text{He} \sim 2.8 \times 10^{-7} \text{ см}^3/\text{г}$, $^4\text{He} \sim 9.2 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{г}$. Величины гелиевого изотопного отношения в 27-ми южно-африканских алмазных кимберлитовых месторождениях достигают 3.2×10^{-4} [Блюман, 2003], что значительно выше, чем планетарное (1.42×10^{-4}), и близко к солнечному гелию (4×10^{-4}).

Таким образом, как это ни кажется парадоксально, во время землетрясений и вулканических извержений, вероятно, могут выполняться условия, необходимые для протекания ядерных реакций, в том числе и присутствие таких элементов, как дейтерий и ^3He [Perez et al., 1996]. О потоках водорода, идущих из ядра Земли, говорится в работе [Ларин, 1980]. Также известно, что перед землетрясениями и извержениями в составе газов подземных вод и термальных источников резко,

примерно на порядок, возрастает содержание радона, водорода, гелия, несколько увеличивается общая радиоактивность и содержание радиоактивных элементов. Гелий в ионизированном состоянии представляет собой альфа-частицы, которые при взаимодействии с веществом верхней мантии образуют нейтроны [Колясников, 1984].

Однако возникает вопрос, как генерированные подобным образом нейтроны доходят до земной поверхности, не затухая? По современным представлениям геофизическая среда состоит из блоков различных размеров: от очень крупных до весьма небольших [Садовский и др., 1987], т.е. она является не сплошной, а иерархически дискретной. Система эта открыта для энергообмена с окружающей средой и обладает способностью связывать в себе упругую энергию, что позволяет рассматривать ее как динамичную энергосодержащую среду. Активность – основное свойство такой среды. Временные изменения свойств пород связаны не с перемещениями вещества, а главным образом с изменением напряженно-деформированного состояния геосреды. В результате происходит

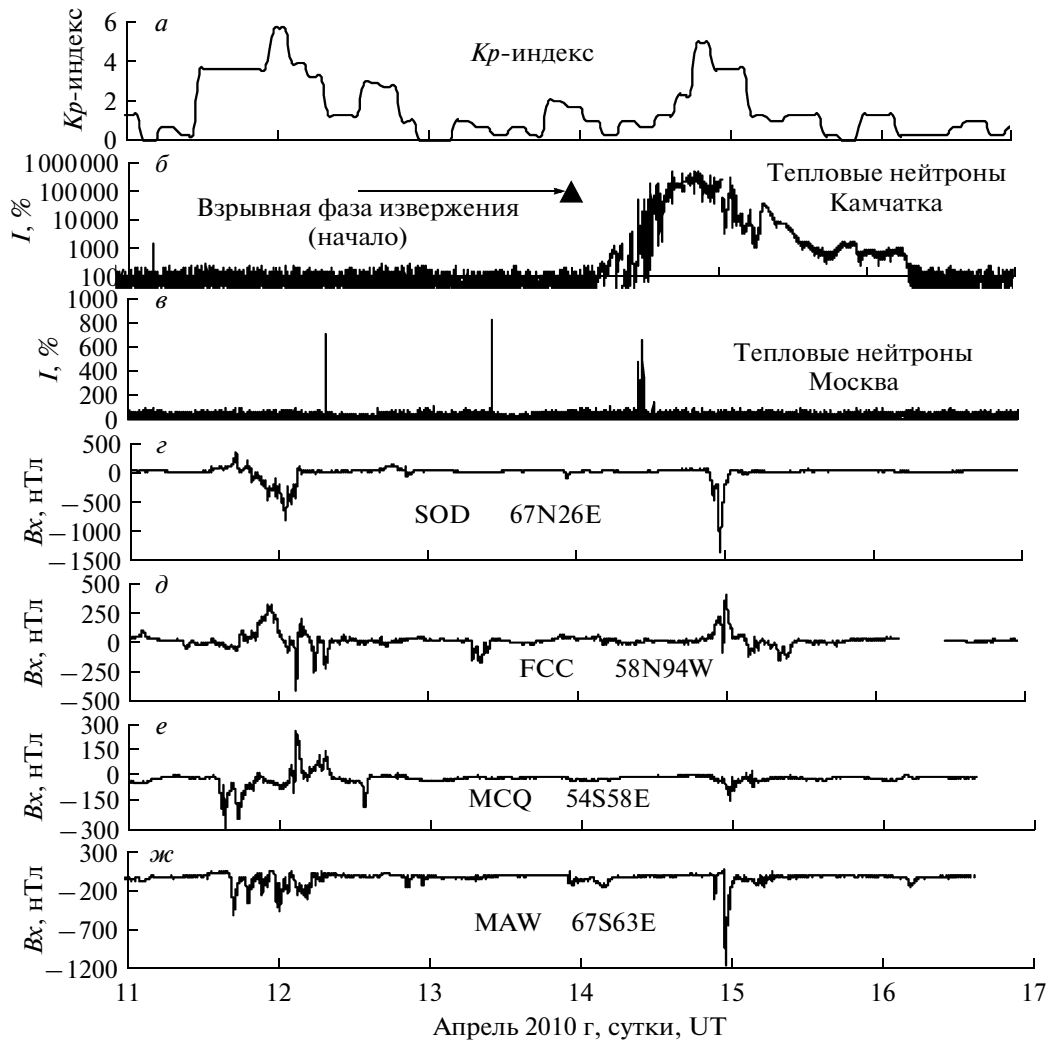


Рис. 6. Временные вариации 11–16 апреля 2010 г.: *a* – *Kp*-индекса; *б*, *в* – интенсивности тепловых нейтронов, зарегистрированных на Камчатке и в ИЗМИРАН – минутные значения; *г*–*ж* – амплитуды напряженности магнитного поля Земли, *Bx*-компонента. Указаны коды станций и их географические координаты.

передача энергии от одного структурного элемента к другому в различных направлениях. В случае сильных событий этот процесс может охватить всю Землю. При распространении фронта возмущения, вызывающего перераспределение напряжений, он в определенный момент достигает поверхности Земли. О возникновении фронта деформации, распространяющемся в земной коре в различных направлениях, сказано в работе [Соболев, 1993]. Наблюдаемое распространение фронта деформации в геосреде может быть понято как процесс последовательной передачи с конечной скоростью тектонической перегрузки от одного структурного элемента геофизической среды к другому [Садовский и др., 1987]. Природа деформационной волны не известна. Можно предположить, что в случае возникновения возмущенного состояния отдельных структурных элементов в геофизической среде возникают гравитационные вол-

ны, которые при распространении каким-то образом последовательно генерируют нейтроны и другие частицы, обеспечивая их трансляцию, продвижение и появление у земной поверхности.

Тот факт, что как сейсмическая, так и вулканическая активность Земли является источником нейтронов и других частиц, прямо свидетельствует о внутреннем единстве тектоно-магматического процесса. Возрастание потоков этих частиц перед землетрясением и извержением может наблюдаться на значительном расстоянии от событий, его можно использовать для их прогнозирования. Для этого необходимо расположить в нескольких активных зонах в северном и южном полушариях Земли приборы для регистрации тепловых и быстрых нейтронов. В результате можно будет заранее оценивать сейсмическую и вулканическую активность на планете, и в случае достаточного количе-

ства приборов, возможно получить представление о районе их возникновения.

6. ВЫВОДЫ

1. Особенности вариаций сейсмичности и вулканизма позволяют предполагать существование общего векового цикла эндогенной активности Земли, делящегося на три периода продолжительностью ~33 (30–40) лет, и связанного с солнечной и геомагнитной активностью.

2. Установлена значимая отрицательная корреляция сейсмической энергии с солнечной и геомагнитной активностью. Отрицательная корреляция вулканической энергии с солнечной и геомагнитной активностью наблюдается не для всех извержений.

3. Очередной сейсмический вековой цикл, начавшийся в 1890 г., закончился в конце XX в. Это позволяет считать, что в 90-х годах прошлого века начался новый вековой цикл, в начале которого должна будет наблюдаться сильная сейсмическая активность. Вековой вулканический и солнечный цикл сдвинуты по времени по отношению к сейсмическому на несколько лет. В начале этого цикла вулканическая активность, также как и сейсмическая, — высокая, а солнечная — низкая.

4. Землетрясение в Чили с магнитудой $M = 8.8$, произошедшее 27 февраля 2010 г., продолжило список мощных землетрясений, которые должны происходить в начале нового векового цикла эндогенной активности, в который ныне вступила Земля. Последние данные по сейсмичности и вулканизму подтверждают рост эндогенной активности Земли. Особенно показательны в этом смысле последние катастрофические землетрясения в Японии.

5. В результате наземных измерений: а) тепловых и быстрых нейтронов, а также гамма-излучения, проводившихся в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), в г. Троицк Московской обл.; и б) тепловых нейтронов, проводившихся на пункте комплексных наблюдений Камчатского филиала Геофизической службы РАН вблизи г. Петропавловск-Камчатский, были зарегистрированы потоки частиц, связанные с произошедшим 27 февраля крупным землетрясением в Чили с магнитудой $M_w = 8.8$ и извержением вулкана Эйяфьятлайокудль в Исландии в марте–апреле 2010 г.

6. Во время подготовки сильных землетрясений и вулканических извержений происходит возмущение геомагнитного поля и генерация нейтронов, фиксируемых в районах, отдаленных от эпицентра будущих событий.

7. Сделано предположение, что механизм первичной генерации нейтронов связан с ядерными

реакциями в недрах при переходе вещества горных пород в активировано-ионизированное состояние. Причиной их регистрации на поверхности на удаленном расстоянии от эпицентра землетрясения вероятно является их трансляция элементами активной иерархически-структурированной геосреды, имеющей волновую природу.

8. Факт, что сейсмическая и вулканическая активность Земли является источником нейтронов и других частиц, и возрастание этих потоков может наблюдаться на значительном расстоянии от событий, можно использовать как новый предвестник для прогнозирования их времени. Для этого целесообразно в нескольких активных зонах в северном и южном полушариях расположить приборы для регистрации тепловых и быстрых нейтронов. Вместе с тем, вопрос уточнения места проявления таких катастрофических событий остается открытым.

В заключение авторы выражают благодарность за проведение эксперимента по регистрации нейтронов и гамма-излучения В.Г. Янке и другим сотрудникам отдела космических лучей Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Пушкова РАН, г. Троицк Московской обл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баркин Ю.В. Вековой полярный дрейф ядра в современную эпоху: геодинамические и геофизические следствия и подтверждения. Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики // Материалы ХLI Тектонического совещания. Т. 1. С. 55–59. 2008.
- Белов С.В. О периодичности современного и древнего вулканизма Земли // ДАН СССР. Т. 291. № 2. С. 421–425. 1986.
- Белов С.В., Шестопалов И.П., Харин Е.П. О взаимосвязях эндогенной активности Земли с солнечной и геомагнитной активностью // ДАН. Т. 428. № 1. С. 104–108. 2009.
- Белов С.В., Шестопалов И.П., Харин Е.П., Соловьев А.А., Баркин Ю.В. Вулканическая и сейсмическая активность Земли: пространственно-временные закономерности и связь с солнечной и геомагнитной активностью // МГОУ-XXI. Новые технологии. № 2. С. 3–12. 2010.
- Белов С.В., Шестопалов И.П. Потоки нейтронов и гамма-излучения как предвестники вулканических и сейсмических катастроф // Вестн. Московского государственного открытого университета. Сер. Техника и технология. № 2. С. 62–70. 2010.
- Блюман Б.А. Солнечный гелий и неон в алмазах, базальтах плюмов и горячих точек: возможное время и происхождение гетерогенности нижней и верхней мантии // Геохимия. № 3. С. 340–344. 2003.
- Булатова Н.П. Широтное распределение сейсмичности Земли в зависимости от положения Солнца и

- Луны // Вулканология и сейсмология. № 2. С. 57–78. 2005.
- *Гущенко И.И.* Извержения вулканов мира (каталог). М.: Наука, 476 с. 1979.
- *Дорман Л.И.* Вариации космических лучей и исследование космоса. М.: изд-во АН СССР, 1026 с. 1963.
- *Ениколопов Н.С., Мхитарян А.Н., Карагезян А.С.* Сверхбыстрые реакции разложения в твердых телах под давлением // ДАН СССР. Т. 288. № 3. С. 657–660. 1986.
- *Колясников Ю.А.* О возможности естественных ядерных реакций и геологических процессах // Вулканология и сейсмология. № 1. С. 59–70. 1984.
- *Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю., Шаврин П.И.* Анизотропия тепловых нейтронов в атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 32. № 2. С. 166–170. 1995.
- *Кужевский Б.М., Шестопалов И.П., Петров В.М.* О прогнозировании радиационной обстановки в межпланетном пространстве. // Космич. исслед. Т. 31. № 6. С. 89–103. 1993.
- *Ларин В.Н.* Гипотеза изначально гидридной Земли. М.: Недра, 210 с. 1980.
- *Левин Б.В., Чирков Е.Б.* Особенности широтного распределения сейсмичности и вращение Земли // Вулканология и сейсмология. № 6. С. 65–69. 1999.
- *Лоцинская Н.И.* Связь глобальной энергии землетрясений с солнечной активностью // Вестн. Киевского ун-та. Сер. астрономия. Вып. 35. С. 45–50. 1999.
- *Подобед В.В., Нестеров В.В.* Общая астрометрия. М.: Наука, 576 с. 1982.
- *Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 100 с. 1987.
- *Соболев Г.А., Шестопалов И.П., Харин Е.П.* Геоэффективные солнечные вспышки и сейсмическая активность Земли // Физика Земли. №7. С. 85–89. 1998.
- *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 314 с. 1993.
- *Сытинский А.Д.* О связи землетрясений с солнечной активностью // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 2. С. 13–30. 1989.
- *Фёдоров В.М.* Особенности широтного распределения вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. № 4. С. 39–43. 2002.
- *Хаин В.Е., Халилов Э.Н.* Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа // М.: Научный мир. 520 с. 2009.
- *Харин Е.П., Белов С.В., Шестопалов И.П.* Пространственно-временные изменения сейсмичности Земли и солнечная активность // Сб. докл. V Межд. конф. “Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений”, с. Паратунка, Камчатский край. 2–7 авг. 2010 г., Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. С. 470–473. 2010.
- *Шаров В.И.* Очаг тектонического землетрясения с позиций кинетической теории прочности твердых тел // Современная геодинамика и глубинное строение территории СССР. М. Наука. С. 79–85. 1990.
- *Шестопалов И.П., Харин Е.П.* Изменчивость во времени связей сейсмичности Земли с циклами солнечной активности различной длительности // Геофизический журнал. Т. 28. № 4. С. 59–70. 2006.
- *Шестопалов И.П., Рогожин Ю.А.* Корреляция между микробиологической и сейсмической активностью с учетом взаимосвязей “Солнце–Земля” и генерации нейтронных потоков // Авиакосмическая и экологическая медицина. Т. 39. № 3. С. 20–26. 2005.
- *Шестопалов И.П., Белов С.В., Соловьев А.А., Харин Е.П., Кузьмин Ю.Д.* О генерации нейтронов и возмущениях геомагнитного поля накануне катастрофического чилийского землетрясения 27 февраля 2010 г. // Вестн. Московского государственного открытого ун-та. Сер. Техника и технология. № 1. С. 66–75. 2011.
- *Шуколюков Ю.А., Плешаков А.М., Семенова Л.Ф.* Изотопный состав гелия в алмазоносных метаморфических породах северного Казахстана // Геохимия. № 1. С. 22–35. 1996.
- *Georgieva K., Kirov B., Atanasov D.* On the relation between solar activity and seismicity on different time scales // J. Atmos. Electricity. V. 22. № 3. P. 291–300. 2002.
- *Hanel R.A., Conrath B.J., Herath L.* Albedo, internal heat and energy balance of Jupiter: preliminary results of the Voyager infrared investigation // J. Geophys. Res. V. 86. P. 8705–8712. 1981.
- *Hanel R.A., Conrath B.J., Kunde V.G.* Albedo, internal heat flux, and energy balance of Saturn // Icarus. V. 53. P. 262–285. 1983.
- *Perez N.M., Nakai S., Wakita H.* Helium-3 emission in and around Teide volcano, Tenerife, Canary Islands, Spain // Geophys. Res. Letters. V. 23. № 24. P. 3531–3538. 1996.
- *Pollac J.B., Rages K., Baines K.H.* Estimates of the bolometric albedos and radiation balance of Uranus and Neptune // Icarus. V. 65. P. 442–466. 1986.
- *Pollack H.N., Hurter S.J., Johnson J.R.* Heat flow from the Earth’s interior: Analysis of the global data set // Rev. Geophys. V. 31. № 3. P. 267–280. 1993.
- *Yasunaga S.* Method and equipment for prediction of volcanic eruption and earthquake. Pat. № 5241175. USA. 8 p. 1993.