

УДК 550.344.385 550.385.37; DOI 10.21455/gr2016.2-5

## ВЛИЯНИЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ КОЛЕБАНИЙ $Pc1$

© 2016 г. О.Д. Зотов

*Геофизическая обсерватория Борок ИФЗ РАН, пос. Борок, Ярославская обл., Россия*

Экспериментально исследован один из аспектов проблемы литосферно-магнитосферных связей, а именно – связь геомагнитных пульсаций  $Pc1$  (электромагнитные волны в диапазоне 0.2–5 Гц) с сильными землетрясениями. Для исследования использованы длинные ряды наблюдений, содержащиеся в каталогах  $Pc1$  и землетрясений.

Показано, что после сильных землетрясений меняется режим генерации колебаний  $Pc1$ , что проявляется в квазипериодической (период около часа) модуляции их активности. Аналогичный эффект наблюдается и после ядерных взрывов. Схожесть реакции магнитосферы на сильные землетрясения и ядерные взрывы предполагает единую природу обнаруженного эффекта.

**Ключевые слова:** магнитосфера, литосфера, землетрясение, геомагнетизм.

### Введение

В работе [Гульельми, Зотов, 2013а] выдвинуто предположение о том, что колебания Земли как целого приводят к слабой, но вполне обнаружимой модуляции сейсмической активности, и приведены подтверждающие это предположение результаты анализа землетрясений. При спектральном анализе динамики сейсмической активности в спектре глобальной сейсмичности наблюдается пик на периоде 54 мин, совпадающем, как хорошо известно, с периодом фундаментальной моды  ${}_0S_2$  собственных колебаний Земли (см., например, [Жарков, 1983; Кузнецов, 1997]).

Укажем на два дополнительных свидетельства существования скрытой околической периодичности землетрясений, предположительно индуцированных сфероидальными колебаниями Земли. Во-первых, при исследовании сейсмичности в антиподных зонах был замечен не только слабый антиподный эффект, стимулированный сильными землетрясениями, но и следующий за ним цуг затухающих колебаний с периодом около 50 мин [Гульельми, Зотов, 2013б]. Во-вторых, период около 54 мин обнаружен в последовательности афтершоков в эпицентральных зонах сильных землетрясений [Гульельми, Зотов, 2013а]. Другими словами, идея о модуляции активности афтершоков сфероидальными колебаниями Земли, которые возбуждаются главным сейсмическим толчком, обоснована достаточно убедительно.

Возникает естественный вопрос, нельзя ли по аналогии предположить, что динамика возбуждения коротковолновых колебаний  $Pc1$  (электромагнитные волны в диапазоне 0.2–5 Гц) подобным же образом испытывает модуляцию с периодами длинноволновых колебаний магнитосферы как целого? (О сфероидальных и тороидальных колебаниях магнитосферы см., например, в монографии [Гульельми, Троицкая, 1973].) Такое предположение не лишено оснований. Однако в данном случае существенная трудность заключается в том, что в отличие от весьма стабильных периодов колебаний твердой

Земли, периоды колебаний магнитосферы сильно изменчивы. Это делает неэффективным использование длинных рядов наблюдений для исследования модуляционных явлений в магнитосфере спектральным методом и методом синхронного накопления.

Как уже отмечалось, собственные колебания твердой Земли весьма стабильны, что отличает их от собственных колебаний магнитосферы. С учетом этого естественно возникает другой вопрос: возможна ли модуляция возбуждения волн  $Pc1$  собственными колебаниями твердой Земли?

Волны  $Pc1$  спорадически возбуждаются в магнитосфере Земли в результате неустойчивости внешнего радиационного пояса [Гульельми, 1968, 1979]. Они распространяются вдоль геомагнитных силовых линий и, проникая через ионосферу, наблюдаются повсеместно в виде серий колебаний продолжительностью 0.5–1 ч. Понятие о возникновении волн  $Pc1$  как о глобальном пространственном явлении развилось в середине прошлого столетия. Глобальность их распространения принято объяснять тем, что волны Альвена ( $Pc1$ ), падающие на ионосферу сверху, частично трансформируются в магнитозвуковые волны, которые распространяются вдоль земной поверхности на большие (до нескольких тысяч километров) расстояния в ионосферном МГД волноводе (см., например, [Greifinger, Greifinger, 1968; Гульельми, 1979]). Магнитосферное происхождение волн  $Pc1$  не вызывает сомнения [Troitskaya, Guglielmi, 1967; Гульельми, 1968, 1979; Гульельми, Троицкая, 1973; Нишида, 1980], и именно поэтому их удобно использовать в качестве индикатора волновой магнитосферной активности и, что особенно важно, в качестве индикатора внешних воздействий на магнитосферу.

С одной стороны, существуют многочисленные свидетельства того, что режим возбуждения волн  $Pc1$  контролируется параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля перед фронтом ударной волны. С другой стороны, в литературе неоднократно поднимался вопрос о слабой, но вполне обнаружимой связи возбуждения и/или распространения этих волн с процессами в лито- и техносфере.

В ряде статей приводятся данные о связи волн  $Pc1$  с сейсмической активностью [Bortnik et al., 2008; Guglielmi, Zotov, 2008; Довбня, Зотов, Щепетнов, 2008; Потапов, Довбня, Цэгмед, 2008; Зотов, Гульельми, 2009], а также с режимом функционирования технологических систем, в частности, с режимом работы электро- и радиотехнических устройств [Fraser-Smith, 1979; Гульельми и др., 1978; Зотов, Калишер, 1979; Fraser-Smith, 1981; Гульельми, Зотов, 1986; Довбня, Зотов, Щепетнов, 2008; Guglielmi, Zotov, 2007; Зотов, Гульельми, 2010].

Исходя из вышеизложенного, в данной работе автором сделана попытка обнаружить эффекты модуляции активности<sup>1</sup> волн  $Pc1$  сильными землетрясениями. Дополнительно были исследованы эффекты влияния на активность волн  $Pc1$  ядерных взрывов и пусков космических аппаратов.

### Анализируемые данные и методы исследований

Для анализа связи волн  $Pc1$  с землетрясениями были использованы длинные ряды наблюдений, содержащиеся в следующих каталогах:

1. Каталог колебаний  $Pc1$ , зарегистрированных с 1958 по 1992 гг. на обс. Борк (58.03°N, 38.97°E), составленный Э.Т. Матвеевой ([http://www.wdcb.ru/stp/data/catal\\_pc](http://www.wdcb.ru/stp/data/catal_pc));
2. Каталог землетрясений Международного сейсмологического центра, в котором содержатся также сведения о ядерных взрывах (ISC, 1964–2006, <http://www.isc.ac.uk>);

<sup>1</sup> Термин “активность волн  $Pc1$ ” в данном исследовании означает длительность серий колебаний  $Pc1$ .

3. Каталог Национального информационного центра Геологической службы США (*USGS/NEIC*, 1973–2010, [http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic\\_global.html](http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html));

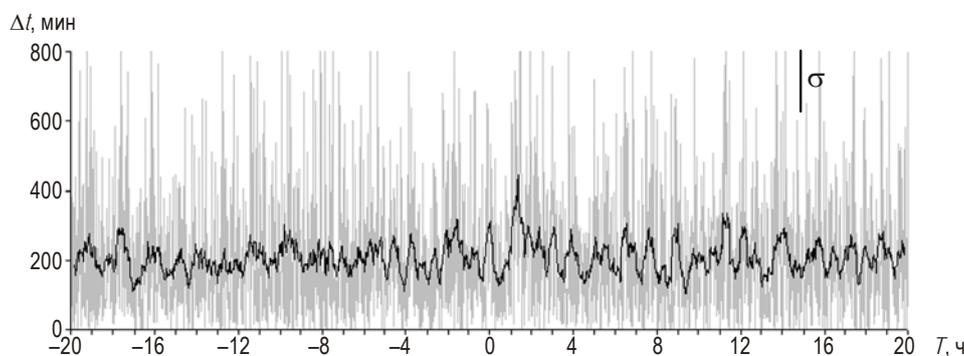
4. Каталог пусков космических аппаратов с различных стартовых площадок Земного шара с 1957 по 1999 гг. (<http://www.zabor.com/launch/>).

Для первичной обработки данных из перечисленных каталогов использовался метод наложения эпох (метод синхронного накопления). Для синхронизации активности волн *Pc1* моменты сильных землетрясений, ядерных взрывов, пусков космических аппаратов рассматривались в качестве реперов и обозначались на временных осях соответствующих графиков как  $t=0$ . По смыслу накопления активность *Pc1* характеризовалась суммарной длительностью серий колебаний, начавшихся в каждый данный момент в двух интервалах времени – до и после репера. Затем по полученным в результате накопления последовательностям с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) раздельно вычислялись спектры на временных интервалах до и после репера.

Цель данного исследования – поиск эффектов модуляции активности волн *Pc1* на частотах, близких к частоте основной моды собственных сфероидальных колебаний Земли. Напомним, что частота основной моды  ${}_0S_2$  равна 0.309 мГц, а период составляет 54 мин. С учетом этого спектры модуляции активности волн *Pc1* вычислялись в диапазоне периодов 30–170 мин (диапазон частот 0.1–0.5 мГц).

### Результаты анализа

В качестве примера на рис. 1 приведен один из результатов поиска связи между режимом возбуждения геомагнитных пульсаций *Pc1* и сильными землетрясениями, полученный путем накопления с применением метода наложения эпох.



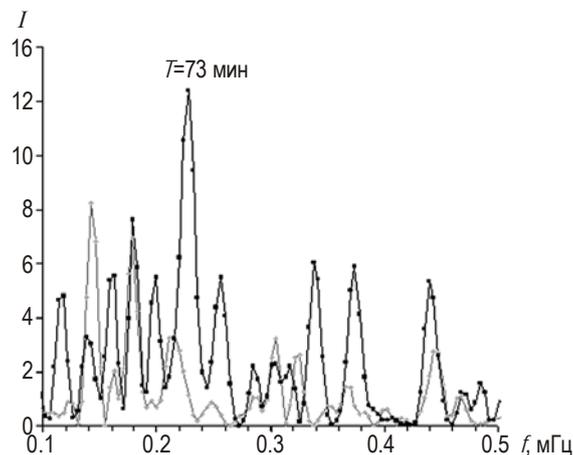
**Рис. 1.** Усредненная динамика активности колебаний *Pc1* в двух временных интервалах – 20 ч до репера и 20 ч после него. Серая кривая – результат накопления (исходный график); черная получена путем сглаживания исходного графика скользящим средним. Описание см. в тексте

В качестве репера использованы моменты 3646 землетрясений с магнитудами  $M \geq 5.8$  из представительной части каталога *USGS/NEIC* за 1973–1992 гг. Активность характеризовалась суммарной длительностью серий колебаний, начавшихся в каждую данную минуту в двух временных интервалах – 20 ч до репера и 20 ч после него. Для анализа использовались все представленные в каталоге серии *Pc1* без какой-либо селекции по длительности.

Обе приводимые на рис. 1 кривые – серая и черная – отражают динамику активности *Pc1*. Серая кривая – результат накопления (исходный график); черная получена путем сглаживания исходного графика скользящим средним с окном 20 точек при

шаге 1 точка. Вертикальный черный отрезок показывает среднеквадратичное отклонение  $\sigma$ , вычисленное по всему исходному ряду.

Можно видеть, что сильные землетрясения существенно изменяют режим генерации колебаний  $Pc1$  – после репера появляются флуктуации активности  $Pc1$  с периодом около часа, которые до репера не наблюдались. Указанное подтверждается результатами спектрального анализа (рис. 2).



**Рис. 2.** Спектры Фурье динамики активности волн  $Pc1$  до репера (серая кривая) и после него (черная). Описание см. в тексте. Здесь и далее на рисунках  $T$  – значение периода максимумов

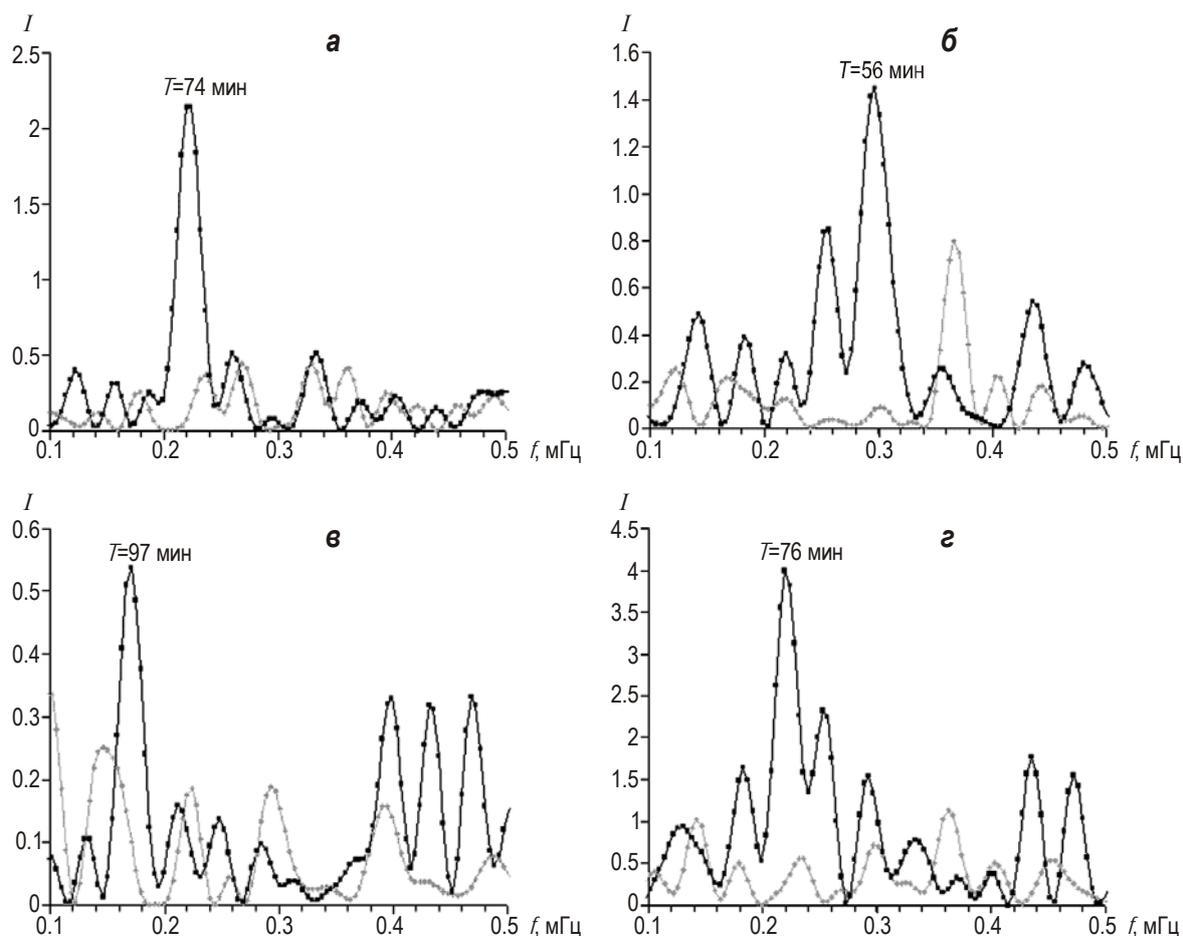
Спектры Фурье динамики активности  $Pc1$  (здесь и далее на всех рисунках) вычислялись по полученным до и после репера усредненным кривым и для наглядности приводятся в одном масштабе. Интенсивность компонент Фурье (здесь и далее на всех рисунках) дана в относительных единицах.

Видно, что спектр активности  $Pc1$  после репера (в данном случае после землетрясений), отображаемый черной кривой, содержит резко выделяющийся максимум на частоте 0.228 МГц (период  $T=73$  мин). Ничего подобного не наблюдается в спектре до землетрясений (серая кривая).

Проанализируем обнаруженный эффект более детально. Отберем для анализа короткие ( $\leq 240$  мин) серии колебаний  $Pc1$  и рассмотрим временные интервалы, составляющие 10 ч до репера и 10 ч после него. В качестве реперов для раздельного рассмотрения будем использовать выбранные из каталога землетрясения с магнитудами в трех диапазонах  $M$ :  $5.8 \leq M < 6.0$  (1364 эпохи),  $6.0 \leq M < 6.4$  (1336 эпох) и  $M \geq 6.4$  (946 эпох).

В каждом диапазоне магнитуд проведем накопление длительностей  $Pc1$  методом наложения эпох и по полученным усредненным кривым вычислим спектры Фурье. На рис. 3, а–в представлены результаты спектрального анализа до репера (серая кривая) и после него (черная). На рис. 3, г показаны спектры активности коротких серий  $Pc1$  до и после репера при использовании в качестве реперов всех 3646 землетрясений с магнитудами  $M \geq 5.8$  (интерес представляет сравнение этого графика с рис. 2, где приведены соответствующие спектры, полученные без селекции по длительности).

Мы видим, что сильные землетрясения значительно изменяют режим возбуждения колебаний  $Pc1$ , что проявляется в квазипериодической ( $T \approx 1$  ч) модуляции их активности. Об этом свидетельствуют различия полученных спектров – во всех случаях (см. рис. 3) после реперов (черные кривые) в динамике активности  $Pc1$  появляются



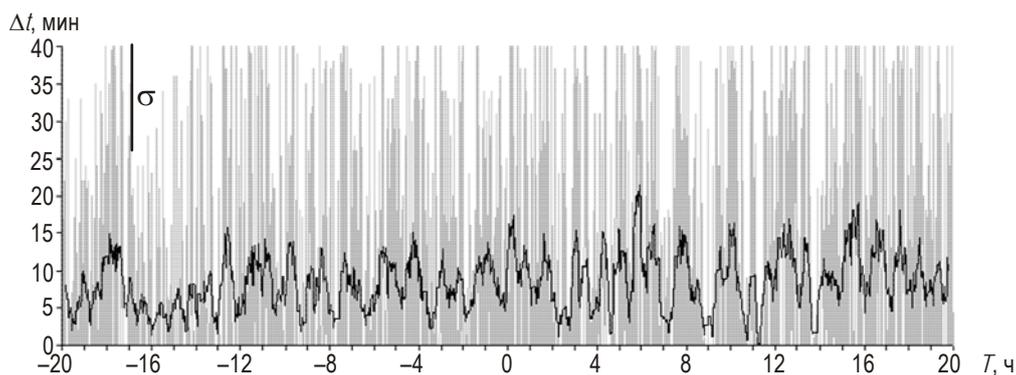
**Рис. 3.** Спектры активности волн  $Pc1$  до репера (серые кривые) и после него (черные) по результатам накопления для трех диапазонов магнитуд реперов: а –  $5.8 \leq M < 6.0$  (1364 эпохи), б –  $6.0 \leq M < 6.4$  (1336 эпох); в –  $M \geq 6.4$  (946 эпох)

выделяющиеся по амплитуде спектральные максимумы; до реперов подобные максимумы либо отсутствуют, либо имеют существенно меньшую интенсивность.

Вполне ожидаемый аналогичный результат получен и в случае, когда в качестве репера использовались моменты 1122 подземных ядерных взрывов из каталога Международного сейсмологического центра (ISC), произведенных в 1964–1992 гг. (рис. 4). Анализ данных проводился по той же методике, что и при анализе влияния землетрясений.

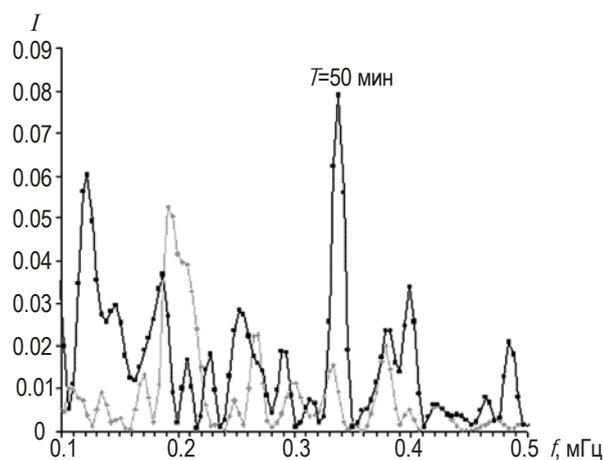
Так же, как и в случае с землетрясениями, после репера появляются более интенсивные флуктуации активности  $Pc1$ , которых до репера не было (см. рис. 4). Различия прослеживаются также в спектрах активности  $Pc1$  (рис. 5) – после репера (черная кривая) отчетливо виден спектральный максимум на частоте 0.337 МГц ( $T=50$  мин), что отражает квазипериодическую модуляцию активности колебаний.

Интересно, что противоположный результат получается при исследовании влияния на режим колебаний  $Pc1$  пусков космических аппаратов. В качестве репера использованы моменты 2 433 пусков космических аппаратов, произведенных в 1958–1992 гг. с территории бывшего СССР и России. Как и в двух первых случаях, накопление данных об активности  $Pc1$  проведено методом наложения эпох.

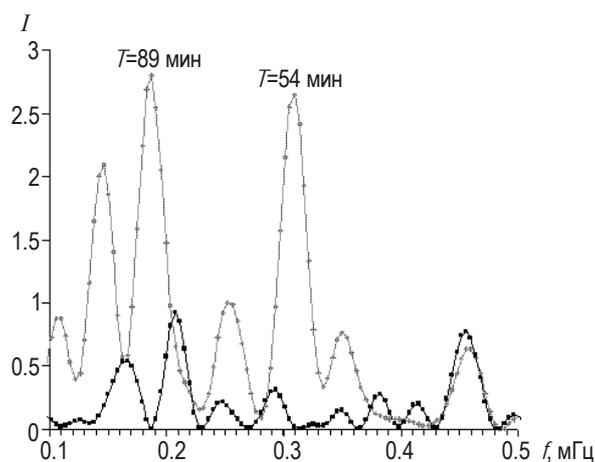


**Рис. 4.** К анализу влияния ядерных взрывов. Усредненная динамика активности колебаний  $Pc1$  в двух временных интервалах – 20 ч до репера и 20 ч после него

Серая кривая – результат накопления (исходный график); черная получена путем сглаживания исходного графика скользящим средним. Описание см. в тексте



**Рис. 5.** К анализу влияния ядерных взрывов. Спектры Фурье динамики активности  $Pc1$  до репера (серая кривая) и после него (черная). Описание см. в тексте



**Рис. 6.** К анализу влияния пусков космических аппаратов. Спектры активности  $Pc1$  до репера (серая кривая) и после репера (черная)

Спектры по полученным усредненным кривым строились на 10-часовых временных интервалах до репера и после него. В данном случае резко выделяющиеся спектральные максимумы в активности  $Pc1$  (рис. 6) наблюдаются до реперов (серая кривая) и отсутствуют после них (черная кривая).

### Обсуждение

В работе выявлена общая закономерность в эффекте влияния землетрясений и подземных ядерных взрывов на режим возбуждения колебаний  $Pc1$ .

Эффект состоит в том, что после репера спектры активности волн  $Pc1$  содержат максимумы, указывающие на квазипериодическую ( $T \approx 1$  ч) модуляцию динамики активности  $Pc1$ , которых нет в спектрах до репера. Таким образом, можно сделать вывод, что и землетрясения, и ядерные взрывы заметно изменяют режим генерации колебаний  $Pc1$ .

С одной стороны, можно сказать, что попытка обнаружить модуляцию активности  $Pc1$  на частоте основной моды собственных колебаний Земли  ${}_0S_2 = 0.309$  мГц ( $T = 54$  мин) не увенчалась успехом. С другой стороны, в некоторых случаях модуляция на близких частотах регистрируется весьма уверенно. Имеются в виду спектральные максимумы на частоте 0.297 мГц ( $T = 56$  мин, см. рис. 3,б) и на частоте 0.337 мГц ( $T = 50$  мин, см. рис. 5). Отличие указанных частот от частоты  ${}_0S_2$  невелико и составляет 4 % в первом случае и 9 % во втором.

Отмеченное отклонение может быть связано с неточностью оценки интенсивности спектральных компонент, вычисленных по сравнительно короткой реализации последовательности накопленных длительностей  $Pc1$ .

Это различие может быть связано также с нелинейной реакцией магнитосферы на внешнее воздействие. В нелинейной теории колебаний принцип суперпозиции не работает. Спектр колебаний может отличаться от спектра внешнего воздействия, даже если оно строго синусоидально. Возможно, что в этом случае небольшое отличие частот в спектре активности  $Pc1$  от частоты вынуждающей силы  ${}_0S_2$  есть результат нелинейного преобразования сфероидальных колебаний Земли. Происхождение других максимумов на частотах 0.224 ( $T = 74$  мин, см. рис. 3,а) и 0.171 мГц ( $T = 97$  мин, см. рис. 3,в) пока остается неясным.

Различие обнаруженных периодов в спектрах активности колебаний  $Pc1$  после репера может быть связано со сложностью отбора для анализа “чистых” интервалов времени. Поясним суть этой проблемы. Дело в том, что множественные процессы, влияющие на режим генерации волн  $Pc1$ , возникают как внутри магнитосферы (например, взрыв в геомагнитном хвосте, импульсная инжекция энергичных частиц), так и за ее пределами (солнечная вспышка, межпланетная ударная волна, грозовой разряд, землетрясение, извержение вулкана и т.п.). В [Гульельми, Троицкая, 1973] отмечается, что одним из загадочных свойств геомагнитных пульсаций типа  $Pc1$  является спорадичность их возбуждения. Как было сказано во Введении, существуют многочисленные свидетельства того, что режим возбуждения волн  $Pc1$  контролируется параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля перед фронтом ударной волны. Например, магнитный эффект  $Ssc$  (от английского термина *Storm sudden commencement*) влияет на возбуждение волн  $Pc1$ , которые часто наблюдаются сразу же после него [Троицкая, 1967]. Аналогичные, хотя и более слабые, эффекты вызывают внезапные импульсы  $Si$  (*Sudden impulse*). Иногда на режим генерации колебаний  $Pc1$  влияют

дискретные сигналы  $D_s$  (*Discrete signal*) [Д'Коста, Довбня, 1974]. Всплески пульсаций типа  $Pi1b$ , возникающие, как правило, на фоне суббурь [Довбня, Зотов, 1985], также влияют на режим возбуждения волн  $Pc1$ . В [Fraser-Smith, Rohbyrgh, 1969] предполагается связь возбуждения колебаний  $Pc1$  с молниевыми разрядами в тропосфере Земли. Кроме перечисленного, в литературе отмечена связь возбуждения и/или распространения  $Pc1$  с процессами в литосфере и техносфере (соответствующие ссылки см. во Введении).

Таким образом, помимо рассмотренных автором естественных (землетрясения) и искусственных (взрывы и пуски космических аппаратов) явлений, влияющих на режим генерации волн  $Pc1$ , внутри магнитосферы и за ее границами происходят разнообразные процессы, также оказывающие свое воздействие на возбуждения и/или распространения этих волн. В такой запутанной ситуации проконтролировать “включение” каждого влияющего процесса так же трудно, как и предугадать возбуждение серий  $Pc1$ .

Статистический метод синхронного накопления, когда в качестве репера выбирается то или иное явление, эффективен, но не абсолютен. Поэтому связь волн  $Pc1$  с заранее выбранными явлениями может быть в той или иной мере выявлена, но при этом не исключается полностью влияние и других процессов. Безусловно, доминирующим фактором в режиме возбуждения и распространения колебаний  $Pc1$  является взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой. Не приходится сомневаться, что землетрясения если и могут повлиять на режим, то лишь в более слабой степени.

Обращает на себя внимание схожесть влияния на режим активности колебаний  $Pc1$  землетрясений и подземных ядерных взрывов. Возможно, это свидетельствует о едином механизме влияния. Но каков этот механизм – акустико-гравитационный (см., например, [Альперович и др., 1983; Потапов, Довбня, Цзэмед, 2008; Guglielmi, 2006]) или электромагнитный [Довбня и др., 2006; Довбня, Зотов, Щенетнов, 2008; Johnston, 1989; Fraser-Smith et al., 1990; Bernardi et al., 1991; Гульельми и др., 2006; Гульельми, 2007]? – Этот вопрос пока остается открытым.

Представляет интерес отмеченная в работе противоположная реакция магнитосферы на пуски космических аппаратов. Особенно интересно наличие максимума в спектре активности  $Pc1$  на частоте  $0S_2$  ( $T=54$  мин) до пусков и его полное отсутствие после. Можно сказать, что пуски космических аппаратов подавляют модуляцию активности  $Pc1$ , поэтому, вполне вероятно, что в данном случае механизм влияния на режим модуляции активности  $Pc1$  принципиально иной.

### Заключение

Каталог колебаний  $Pc1$  проанализирован автором с использованием метода наложения эпох для поиска эффекта модуляции активности волн  $Pc1$  собственными колебаниями Земли. Уверенно такой эффект обнаружить не удалось, однако некоторые признаки явно указывают на возможность его существования.

Результаты проведенного статистического исследования свидетельствуют, что и землетрясения, и ядерные взрывы, представляющие явления, способные возбудить собственные колебания Земли, оказывают модулирующее влияние на режим колебаний  $Pc1$ . В обоих случаях речь идет об изменении режима возбуждения колебаний  $Pc1$ .

Вопросы о том, какой именно механизм играет роль модулирующего фактора и какие процессы приводят к модуляции активности  $Pc1$ , остаются открытыми. Вполне вероятно, что мы наблюдаем суперпозицию собственных колебаний магнитосферы и реакции магнитосферы на внешнее воздействие.

### Благодарности

Автор выражает благодарность Э.Т. Матвеевой, составившей каталог волн  $Pc1$  по данным наблюдений в 1958–1992 гг. на Геофизической обсерватории “Борок”, и искренне благодарит А.В. Гульельми и Б.И. Клайна за помощь и многократное обсуждение результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы № 18 фундаментальных исследований Президиума РАН и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-05-00066 и 15-05-00491).

### Литература

- Альперович Л.С., Вугмейстер Б.О., Гохберг М.Б., Дробжес В.И., Ерущенков А.И., Иванов Е.А., Кудрявцев В.П., Куличков С.Н., Краснов В.М., Матвеев А.К., Мордохович М.И., Нагорский П.М., Пономарев Е.А., Похотелов О.А., Терацук Ю.Е., Троицкая В.А., Федорович Г.В. Об опыте моделирования магнитосферно-ионосферных эффектов при сейсмических явлениях // Докл. АН СССР. 1983. Т. 269, № 3. С.573–578.
- Гульельми А.В. Циклотронная неустойчивость протонов внешнего радиационного пояса // Геомагнетизм и аэрономия. 1968. Т. 8. С.412–419.
- Гульельми А.В. МГД волны в околоземной плазме. М.: Наука, 1979, 139 с.
- Гульельми А.В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и в магнитосфере Земли // УФН. 2007. Т. 177, № 12. С.1257–1276.
- Гульельми А.В., Довбня Б.В., Клайн Б.И., Пархомов В.А. Стимулированное возбуждение альвеновских волн импульсным радиоизлучением // Геомагнетизм и аэрономия. 1978. Т. 18, № 1. С.179–181.
- Гульельми А.В., Зотов О.Д. О геомагнитном эффекте “Мировых дней” // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26, № 5. С.870–872.
- Гульельми А.В., Зотов О.Д. О нелинейном антиподном эффекте землетрясений // Геофизические исследования. 2013а. Т. 14, № 1. С.54–60.
- Гульельми А.В., Зотов О.Д. О скрытой окологосударственной периодичности землетрясений // Физика Земли. 2013б. № 1. С.3–10.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.
- Гульельми А.В., Цэгмед Б., Потанов А.С., Культима Й., Райта Т. Сейсмамагнитные сигналы от сильного землетрясения на Суматре // Физика Земли. 2006. № 11. С.63–69.
- Д’Коста А., Довбня Б.В. Спорадическое излучение в полярной шапке в диапазоне 0.1–0.7 Гц во время внезапных начал магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. 1974. Т. 14, № 6. С.1125–1127.
- Довбня Б.В., Зотов О.Д., Щепетнов Р.В. Связь УНЧ электромагнитных волн с землетрясениями и с антропогенными воздействиями // Геофизические исследования. 2008. Вып. 9. С.3–23.
- Довбня Б.В., Зотов О.Д. О связи импульсных процессов в ионосфере с режимом генерации колебаний  $Pc1$  // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25, № 3. С.515–518.
- Довбня Б.В., Зотов О.Д., Мострюков А.О., Щепетнов Р.В. Электромагнитные сигналы во временной окрестности землетрясений // Физика Земли. 2006. № 8. С.60–65.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
- Зотов О.Д., Гульельми А.В. Совместный анализ электромагнитных колебаний  $Pc1$  и землетрясений // Электромагнитные исследования Земли (под ред. В.В. Спичака): Материалы IV Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли. Москва. 1–4 сентября 2009. М.: ИФЗ РАН, 2009. С.162.

- Зотов О.Д., Гульельми А.В.* Проблемы синхронизма электромагнитных и сейсмических событий в динамической системе “Магнитосфера–Техносфера–Литосфера” // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 16. С.19–25.
- Зотов О.Д., Калишер А.Л.* Статистический анализ эффектов искусственного воздействия на ионосферу // Влияние мощного радиоизлучения на ионосферу. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1979. С.150–153.
- Кузнецов В.В.* Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли // УФН. 1997. Т. 167, № 9. С.1001–1012.
- Нишида А.* Геомагнитный диагноз магнитосферы // М.: Наука, 1980. 299 с.
- Потапов А.С., Довбня Б.В., Цэгмед Б.* О воздействии землетрясений на ионосферные резонансы Альвена // Физика Земли. 2008. № 4. С. 93–96.
- Bernardi A., Fraser-Smith A.C., McGill P.R., Villard O.G., Jr.* ULF magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake // Phys. Earth Planet. Inter. 1991. V. 68. P.45–63.
- Bortnik J., Cutler J.W., Dunson C., Bleier T.E.* The possible statistical relation of Pc1 pulsations to Earthquake occurrence at low latitudes // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P.2825–2836.
- Fraser-Smith A.C.* Weekend increase in geomagnetic activity // J. Geophys. Res. 1979. V. 84, N A5. P.2089–2096.
- Fraser-Smith A.C., Rohbyrgh K.R.* Triggering of hydromagnetic “Wistlers” by sferics // Planet. Space Sci. 1969. V. 17, N 6. P.1310–1312.
- Fraser-Smith A.C.* Effect of man on the geomagnetic activity and pulsations // Adv. Space Res. 1. 1981. P.455–466.
- Fraser-Smith A.C., Bernardi A., McGill P.R., Ladd M.E., Helliwell R.A., Villard O.G., Jr.* Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake // Geophys. Res. Lett. 1990. V. 17. P.1465–1468.
- Greifinger C., Greifinger P.S.* Theory of hydromagnetic propagation in the ionosphere wave guide // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. P.7473–7490.
- Guglielmi A., Zotov O.* Long-term trend in Pc1 weekend effect according to geomagnetic data collected by the Borok Geophysical Observatory // Geophysical Research Abstracts. 2008. V. 10. EGU2008-A-04807. EGU General Assembly 2008.
- Guglielmi A., Zotov O.* The human impact on the Pc1 wave activity // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2007. V. 69. P.1753–1758.
- Guglielmi A., Potapov A., Tsegmed B., Hayakawa M., Dovbnya B.* On the earthquake effects in the regime of ionospheric Alfvén resonances // Physics and Chemistry of the Earth. 2006. V. 31. P.469–472.
- Johnston M.J.S.* Review of magnetic and electric field effects near active faults and volcanos in the USA // Phys. Earth Planet. Inter. 1989. V. 57. P.47–63.
- Troitskaya V.A.* Micropulsations and State of the magnetosphere // Solar-Terrestrial Physics / Ed. J.W. King, W.S. Newman. London. K.Y., Acad. Press, 1967. V. 7. P.213–224.
- Troitskaya V.A., Guglielmi A.V.* Geomagnetic micropulsations and diagnostics of the magnetosphere // Space Sci. Rev. 1967. V. 7, N 5/6. P.689–769.

#### *Сведения об авторе*

**ЗОТОВ Олег Дмитриевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Геофизическая обсерватория “Борок” – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок. Тел.: 8(485) 47-2-47-61. E-mail: ozotov@inbox.ru

## THE INFLUENCE OF STRONG EARTHQUAKES ON THE Pc1 GENERATION REGIME

O.D. Zotov

*Borok Geophysical Observatory of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Science,  
Borok (Yaroslavl region), Russia*

**Abstract.** Pc1 geomagnetic pulsations (electromagnetic waves in the range of 0.2–5 Hz) are experimentally studied in connection with strong earthquakes. This is a part of the lithosphere-magnetosphere relations problem. The long series of observations from the catalogs of Pc1 and earthquakes were used in the study. It is shown that after strong earthquakes, the regime of Pc1 generation changes. It is displayed as a quasi-periodic (with a period close to an hour) modulation of the oscillation activity. The same effect is observed after nuclear explosions. The similar responses of magnetosphere to strong earthquakes and nuclear explosions suppose the uniform nature of these effects.

**Keywords:** magnetosphere, lithosphere, earthquake, geomagnetism.