

УДК 550.344

## О СВЯЗИ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ С ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

Б.В. Довбня

### ON THE RELATION BETWEEN GEOMAGNETIC PULSATIONS AND EARTHQUAKES

B.V. Dovbnya

При землетрясениях обнаружены аномальные изменения в режиме геомагнитных пульсаций типа Pc1 (жемчужины). Изменения наблюдаются вслед за появлением УНЧ электромагнитных импульсов, связанных с землетрясениями. Различные примеры изменений в пульсациях анализируются по данным обсерваторий Борок и Колледж. Обсуждается возможный механизм воздействия сейсмической активности на режим колебаний.

Abnormal changes in the mode of Pc1 geomagnetic pulsations (pearls) were revealed during earthquakes. The changes can be observed after the occurrence of ULF electromagnetic pulses associated with earthquakes. Various examples of such changes in pulsations are analyzed using data from the observatories Borok and College. A possible mechanism of the seismic activity effect on the oscillation mode is discussed.

#### 1. Введение

В последние десятилетия по данным спутниковых и наземных наблюдений накоплен большой экспериментальный материал о разнообразных проявлениях сейсмической активности в верхней атмосфере и переменном электромагнитном поле Земли [1–3]. Такие наблюдения направлены в первую очередь на поиск оперативных предвестников землетрясений и в то же время важны для изучения тектонических процессов и их взаимосвязей с внешней средой, природа которых остается до конца невыясненной. Данным сообщением мы хотим привлечь внимание еще к одному возможному эффекту землетрясений – воздействию сейсмической активности на режим естественных колебаний УНЧ электромагнитного поля – геомагнитных пульсаций.

Геомагнитные пульсации, или естественные вариации электромагнитного поля Земли в диапазоне от миллигерц до нескольких герц, являются одним из доступных инструментов для исследования околоземного и космического пространства [4]. Они чутко реагируют своими свойствами на изменения в среде, вызванные воздействием внешнего источника какого-либо происхождения. Можно ожидать, что наблюдение за геомагнитными пульсациями при сейсмической активности позволит получать ценную информацию о процессах в магнитосфере и ионосфере, инициированных при подготовке и протекании землетрясений. Способность геомагнитных пульсаций распространяться по ионосферному волноводу на большие расстояния дает дополнительную возможность наблюдать эффекты при значительном удалении от эпицентра землетрясения.

В этой работе мы приведем экспериментальные данные, свидетельствующие о связи геомагнитных пульсаций типа Pc1 (диапазон частот 0.2–5 Гц) с сейсмической активностью, и обсудим полученные результаты.

#### 2. Постановка задачи

В работе [5] сообщалось о наблюдении в близкой временной окрестности землетрясений (первые десятки секунд, первые минуты) электромагнитных импульсов в диапазоне частот от долей герца до нескольких герц. Наблюдения проводились на Геофизической обсерватории Борок ( $\varphi=58.06^\circ$ ,  $\lambda=38.23^\circ$ ), расположенной в сейсмически неактивной зоне. Ис-

ходным материалом для анализа являлись записи на магнитную ленту УНЧ-вариаций электромагнитного поля Земли. Обработка геомагнитных данных велась с применением методов компьютерного анализа. Данные о землетрясениях брались из каталога Международного сейсмологического центра (International Seismological Centre ISC Catalogues), [www.isc.ac.uk](http://www.isc.ac.uk). В ходе работ мы обратили внимание на связь импульсных сигналов с геомагнитными пульсациями типа Pc1 (жемчужины) [6]. Появление электромагнитного импульса приводило либо к резкому срыву существующих до землетрясения колебаний, либо к внезапной перестройке в их режиме. Возможен был также и другой эффект – возбуждение вслед за импульсом серии жемчужин с отчетливой привязкой начала колебаний к импульсу. Наблюдательные данные представляли несомненный интерес как одно из проявлений воздействия сейсмической активности на верхнюю атмосферу, не отмеченное ранее в литературе, и, безусловно, заслуживали внимания. Исследования были продолжены с привлечением наблюдений других обсерваторий. Анализу результатов и поиску физических механизмов, ответственных за наблюдаемые явления, посвящена данная работа.

#### 3. Наблюдения

Изменения в режиме Pc1 во всех случаях (~100) оказались связаны с появлением УНЧ электромагнитных импульсов, предшествующих моменту землетрясения или следующих за ним. Поэтому вначале мы кратко суммируем наши наблюдения сигналов при сейсмической активности (более подробное описание см. в работе [5]). После этого рассмотрим обнаруженные эффекты в режиме Pc1.

##### 3.1. Электромагнитные сигналы

Сигналы наблюдались в устойчиво выделенной и близкой временной окрестности землетрясений. Относительно землетрясений это были или опережающие (70 %), или запаздывающие (30 %) сигналы. Опережение или запаздывание составляло от 0 до 5 мин. И опережающие, и запаздывающие сигналы появлялись в диапазоне частот от долей герца до нескольких герц в виде либо единичных импульсов (75 %), либо парных, следующих друг за другом с интервалом 40–150 (25 %) с. Типичные примеры появления обоих типов сигналов при землетрясениях приведены

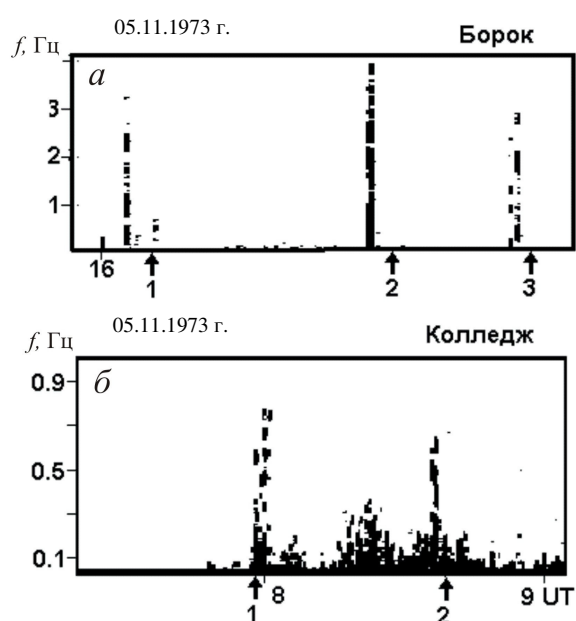


Рис. 1. Примеры наблюдений при землетрясениях электромагнитных импульсов на обсерваториях Борок и Колледж. Моменты землетрясений отмечены стрелками: а: 1) 16:05:13,  $-5.28$ ,  $154.34$ ,  $5.2$ ,  $233$ ; 2) 16:25:46,  $24.78$ ,  $122.87$ ,  $4.0$ ,  $23$ ; 3) 16:35:27,  $-41.13$ ,  $174.64$ ,  $3.4$ ,  $31$ ; б: 1) 7:58:51,  $41.76$ ,  $133.19$ ,  $4.1$ ,  $440$ ; 2) 8:40:47,  $41.58$ ,  $13.68$ ,  $4.4$ ,  $33$ .

на рис. 1. Здесь и далее стрелками на рисунках отмечены моменты землетрясений. В подписях к рисункам приводятся следующие параметры землетрясений: мировое время, географические координаты ( $\varphi$  и  $\lambda$ ), магнитуда  $M$ , глубина  $h$  в км. Анализ наблюдений не выявил количественной связи между интенсивностью электромагнитных импульсов и параметрами землетрясений в диапазоне магнитуд от 3 до 8 и глубин от 0 до 600 км. Типичные значения амплитуд магнитных колебаний составляли первые десятки пТл. В зависимости от расстояния до эпицентра присутствовало некоторое предпочтение для относительно близких (2000–3000 км) землетрясений. Эта особенность в проявлении сейсмо-электромагнитной активности была отмечена по наблюдениям на геофизических обсерваториях Борок и Колледж ( $\varphi = 64.9$ ,  $\lambda = 212.0$ ).

### 3.2. Эффекты в режиме геомагнитных пульсаций Pc1

В этом разделе мы рассмотрим различные примеры изменений в режиме пульсаций Pc1 на обсерваториях Борок и Колледж. Каждый из рисунков представляет собой фрагмент записи переменного электромагнитного поля в частотно-временном изображении за выбранный интервал времени. Перед рассмотрением отметим, что случаи одновременного наблюдения эффектов на обсерваториях Борок и Колледж, которые разнесены почти на 12 ч по долготе и на  $10^\circ$  по широте, крайне редки (одно событие из свыше 100 проанализированных), хотя по отдельности одни и те же изменения в режиме пульсаций наблюдаются при землетрясениях на каждой из обсерваторий.

Рассмотрение начнем с примеров резкого срыва и быстрого затухания колебаний (рис. 2). Обратимся

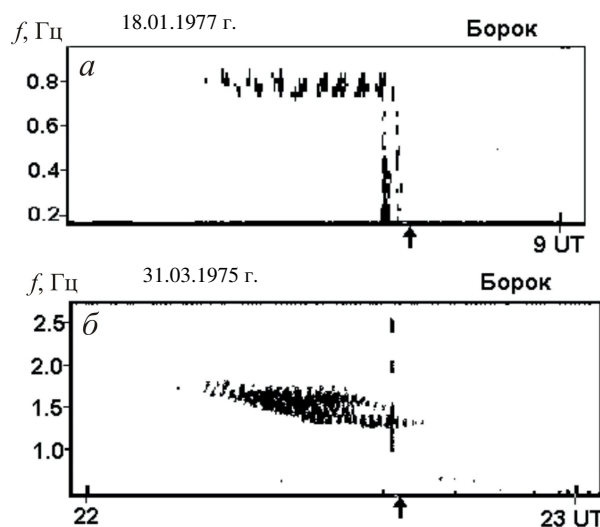


Рис. 2. Эффект полного (а) или частичного (б) подавления жемчужин электромагнитным импульсом при землетрясениях: а – 8:48:54,  $33.1$ ,  $48$ ,  $5.9$ ,  $71$ ; б – 22:37:51,  $49.8$ ,  $179.6$ ,  $4.8$ ,  $0$ .

к рис. 2, а. Серия жемчужин наблюдалась на обсерватории Борок 18.01.1977 г. в интервале 8–9 UT. В 8:48:54 UT произошло землетрясение с магнитудой  $M=5.9$  на глубине  $h=71$  км. Расстояние от эпицентра составило около 2000 км. За 3 мин до землетрясения в электромагнитном поле регистрируются два следующих друг за другом импульса (импульсы-близнецы). Эффект неожиданный: происходит резкий и полный срыв колебаний, серия жемчужин внезапно исчезает, и какие-либо ее следы за импульсами не просматриваются. Иногда появление импульса приводит не к полному срыву существующих до землетрясения серий жемчужин, но к ослаблению и быстрому затуханию колебаний, как это показано на рис. 2, б. В этом случае землетрясение было поверхностным с  $M=4.8$ , расстояние до эпицентра составило более 10000 км. Импульс в электромагнитном поле появляется за 1 мин до сейсмического события.

Итак, на рис. 2 мы видим эффект полного или частичного подавления жемчужин электромагнитным импульсом при землетрясении. Наблюдается также и обратный эффект, как это показано на рис. 3, а именно: появление импульса приводит не к ослаблению, а либо к резкой интенсификации существующих колебаний, либо к их внезапному появлению. Случай интенсификации серии жемчужин вслед за импульсом дан на рис. 3, а. Эффект наблюдался через 2 мин после землетрясения с  $M=3.4$  и  $h=10$  км. Расстояние до эпицентра составило свыше 10000 км. На рис. 3, б дан пример аномального появления серии жемчужин. Землетрясение с магнитудой  $M=5.0$  произошло на глубине  $h=131$  км на расстоянии около 8000 км от обсерватории Колледж. За 4 мин до сейсмического события регистрируется электромагнитный импульс. Эффект, связанный с его появлением, снова неожиданный – вслед за импульсом внезапно появляется уже сформировавшаяся серия Pc1, следы которой до импульсного излучения не просматривались.

До сих пор мы обсуждали воздействие сейсми-

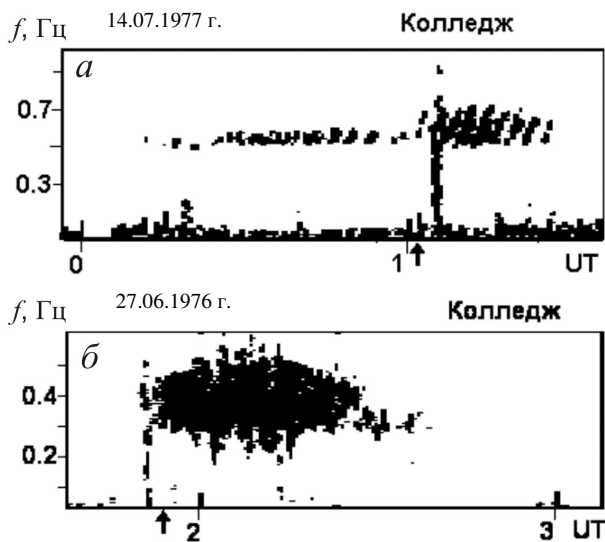


Рис. 3. Пример интенсификации и внезапного появления колебаний вслед за импульсом: *a* – 1:02:54, 39.5, 179.6, 3.4, 10; *б* – 1:55:07, 3.15, 96.12, 5.0, 131.

ческих событий на серии жемчужин, возбужденных в магнитосфере независимо от этих событий. Теперь рассмотрим случаи, которые наглядно свидетельствуют о том, что электромагнитный импульс, связанный с землетрясением, стимулирует возбуждение жемчужин, являясь, по-видимому, своего рода затравочным сигналом. На рис. 4 даны примеры возбуждения серий жемчужин вслед за импульсными сигналами. Рассмотрим случай, наблюдавшийся 10.06.1975 г. в Колледже. Мы видим, как из весьма узкополосного начала постепенно развивается клинообразная структура динамического спектра серии жемчужин, характерная для пульсаций данного типа. Не вызывает никакого сомнения связь момента возбуждения жемчужин с появлением электромагнитного импульса. Эффект наблюдался при землетрясении с  $M=5.4$  и  $h=100$  км на расстоянии от эпицентра около 4000 км. Примечательно, что парные импульсы могут привести к возбуждению на различных частотах двух серий Рс1. Пример такого типа показан на рис. 4, б. Импульсы-близнецы регистрируются на обсерватории Борок за 1 мин до землетрясения с  $M=4.8$  и  $h=0$  на расстоянии свыше 10 000 км от его эпицентра.

Рисунок 5 иллюстрирует изменения частотного диапазона, в котором жемчужины наблюдаются до и после электромагнитного импульса. В обоих случаях появление импульса приводит к срыву существующих колебаний. Вслед за импульсом мы снова видим серии жемчужин, но уже в другом частотном диапазоне. При этом, если в случае, отраженном на рис. 5, а, серия жемчужин появляется с сохранением тонкой структуры динамического спектра, то в случае, представленном на рис. 5, б, можно говорить о возбуждении новой серии жемчужин в другом частотном диапазоне. Эффекты наблюдались на обсерваториях Борок и Колледж при землетрясениях в разное время и с различными параметрами.

Мы завершим рассмотрение примерами эффектов от двух последовательных землетрясений. Обратимся к рис. 6. На сонограмме в координатах частота–время

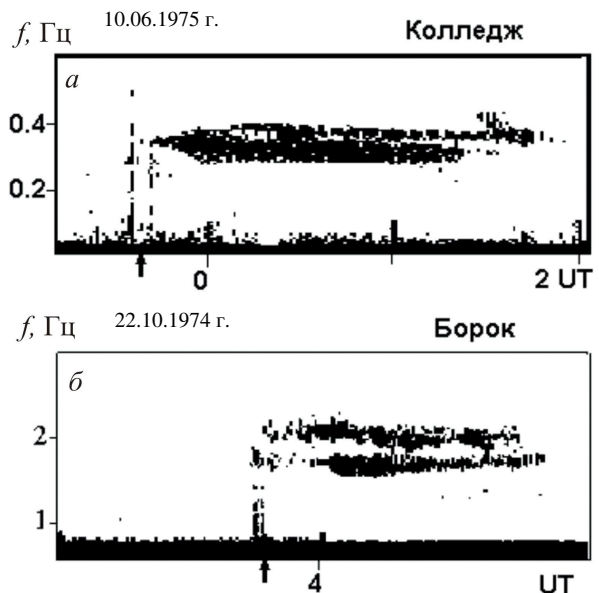


Рис. 4. Электромагнитный импульс стимулирует возбуждение серии жемчужин (*a*). Парные импульсы могут приводить к возбуждению двух серий жемчужин на различных частотах (*б*). Здесь *a* – 23:37:37, 43.18, 147.72, 5.4, 100; *б* – 3:49:13, –22.4, –179.5, 4.8, 0.

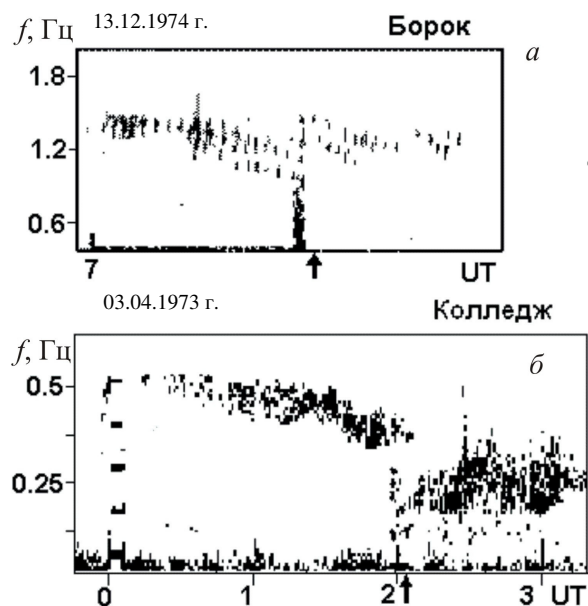


Рис. 5. Изменение частотного диапазона наблюдения жемчужин до и после электромагнитного импульса: *a* – 7:30:02, 4.8, 127.3, 6.6, 80; *б* – 2:01:36, 5.94, 127.1, 5.1, 90.

представлен фрагмент записи переменного электромагнитного поля за интервал времени, включающий два сейсмических события. Землетрясения произошли в одном регионе с интервалом 40 мин. Их магнитуды равны 4.9 и 4.5, глубины 160 и 33 км. Мы видим на рисунке, что обоим сейсмическим событиям предшествовали импульсы в электромагнитном поле: за 2 мин перед первым землетрясением и за 3 мин перед вторым. Эффект от первого импульса проявляется в виде внезапного появления серии Рс1, в то время как после второго наблюдается резкий срыв колебаний. Расстояние от эпицентра в данном случае около 3000 км.

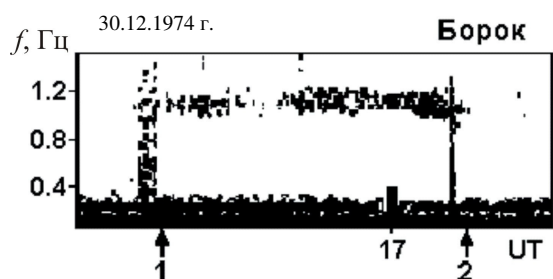


Рис. 6. Эффекты от двух последовательных землетрясений: 1 – 16:24:53, 36.68, 71, 4.9, 160; 2 – 17:13:41, 35.2, 72.8, 4.5, 33.

Таковы в основном эффекты в режиме колебаний типа Pc1, обнаруженные нами при исследовании связи геомагнитных пульсаций с землетрясениями. Касаясь вопроса о статистике связи импульс–Pc1, отметим следующую важную закономерность: если серия жемчужин уже существовала, то появление электромагнитного импульса, связанного с землетрясением, в наших наблюдениях всегда нарушало естественный ход излучения и приводило к тем или иным эффектам в пульсациях. И с другой стороны, возбуждение серии жемчужин вслед за импульсом – возможное, но относительно редкое явление, контролируемое, по-видимому, наличием в магнитосфере благоприятных условий для развития колебаний.

#### 4. Обсуждение результатов

На различных примерах мы показали, что сейсмическая активность может приводить к аномальным изменениям в режиме геомагнитных пульсаций типа Pc1. Эффекты не зависят от магнитуды и глубины землетрясений. В то же время связь изменений в геомагнитных пульсациях с электромагнитными импульсами при землетрясениях настолько очевидна, что ей следует придать реальное физическое значение. Попытаемся увязать наблюдения за пульсациями с конкретными представлениями о природе этой связи.

Свойства геомагнитных пульсаций на земной поверхности определяются условиями прохождения альфвеновских волн через ионосферу. Коэффициент отражения волн Альфвена, распространяющихся вдоль силовых линий из магнитосферы в ионосферу, как функция частоты имеет ряд максимумов и минимумов, обусловленных резонансными свойствами среды [7]. Практически пульсации на Земле могут наблюдаться лишь при условии частичного отражения. Положение пиков на оси частот определяется величиной плотности плазмы. Возмущение ионосферных параметров меняет резонансные свойства среды, вызывая сдвиг спектральной кривой по оси частот. При этом меняются условия прохождения геомагнитных пульсаций через ионосферу, приводя к аномальным изменениям в спектре наблюдаемых на Земле колебаний.

В нашем эксперименте такие изменения в пульсациях Pc1 во всех случаях были тесно связаны с появлением УНЧ электромагнитных импульсов и наблюдались вслед за ними.

Для объяснения обнаруженных эффектов мы предлагаем гипотезу о существовании при сейсмической активности особого вида магнитосферно-

ионосферной связи, вызванной резким электромагнитным импульсом литосферного происхождения. Рассмотрим схему такой связи.

В преддверии землетрясения (или после землетрясения) в результате процессов механоэлектромагнитных преобразований в земной коре генерируется УНЧ электромагнитный импульс [5]. Пройдя атмосферу, сигнал в диапазоне частот 0–5 Гц практически без затухания распространяется в ионосфере и магнитосфере и может достигнуть радиационного пояса Земли [8]. Мы предполагаем резонансное взаимодействие этих импульсов с частицами радиационного пояса, которое может привести к резкому возрастанию потока выпадающих в ионосферу заряженных частиц [9]. Дополнительная ионизация вызовет изменения в характере прохождения геомагнитных пульсаций через ионосферу. В зависимости от исходного состояния и величины ионосферного возмущения в динамическом спектре жемчужин на земной поверхности может наблюдаться один из рассмотренных выше эффектов.

Для объяснения обратного эффекта – возбуждения серий жемчужин вслед за импульсом – можно предложить следующее. При условиях в области генерации, благоприятных для возбуждения колебаний, электромагнитные сигналы от землетрясений могут играть роль затравочного импульса и стимулировать развитие серий Pc1. Генерации жемчужин может способствовать также и увеличение коэффициента отражения волн от ионосферы и, соответственно, увеличение добротности магнитосферного резонатора в результате дополнительной ионизации, вызванной импульсным излучением.

Автор признателен А.С. Потапову за полезные обсуждения результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
2. Соболев Г.А. Основы прогнозирования землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
3. Hayakawa M. Electromagnetic phenomena associated with earthquakes: Review // Trans. Ins. Electr. Engrs. of Japan. 2001. V. 121A. P. 893–898.
4. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Наука, 1980. 299 с.
5. Довбня Б.В., Зотов О.Д., Мострюков А.Ю., Щепетнов Р.В. Электромагнитные сигналы во временной окрестности землетрясений // Физика Земли. 2006. № 8. С. 60–65.
6. Dovbnya B.V. On the earthquake effects in the regime of Pc1 // J. Atmosph. Terrestr. Physics. 2007. V. 69, Iss. 14. P. 1765–1769.
7. Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Альфвеновский свип-мазер / Препринт № 23. ИПФ АН СССР. Горький, 1981. 21 с.
8. Молчанов О.А. Прохождение электромагнитных полей от сейсмических источников в верхнюю ионосферу Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т. 31, № 1. С. 111–119.
9. Voronov S.A., Galper A.M., Kirillov-Ugriyomov V.G., et al. Registration of sporadic increase of high energy particle flux near Brasilia magnetic anomaly region. // Proc. 20-th Int. Cos. Ray Conf. 1987. V. 4. P. 451–452.

Геофизическая обсерватория Борок, филиал ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН