

## Об эффектах землетрясений в геомагнитных пульсациях и их возможной природе

© Б. В. Довбня, 2011

Геофизическая обсерватория "Борок",  
Институт физики Земли РАН, Ярославская обл., Россия

Поступила 8 апреля 2009 г.

Представлено членом редколлегии В. Г. Бахмутовым

За даними геофізичних обсерваторій "Борок" і "Коледж" виявлено, що геомагнітні пульсації в діапазоні від мілігерц до декількох герц реагують на сейсмічні події. Наведено приклади, що ілюструють характер впливу сейсмічної активності на режим пульсацій різних типів. Обговорено можливі механізми такого впливу.

As was shown using data from the "Borok" and "College" geophysical observatories, geomagnetic pulsations in the frequency range of millihertz to several hertz demonstrate their response to seismic events. Examples are shown which illustrate the character of seismic activity impact on the regime of various types of pulsations. Different mechanisms of such impact are discussed.

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 (см., например, монографии В. А. Липеровского [Липеровский и др., 1992], Г. А. Соболева [Соболев, 1993] и М. Хаякавы [Hayakawa, 2001]). Такие наблюдения направлены в первую очередь на поиск оперативных предвестников землетрясений. В то же время они важны для изучения тектонических процессов и их взаимосвязей с внешней средой, природа которых остается до конца невыясненной. Отклик на сейсмические события проявляется в виде специфических вариаций параметров космической плазмы, электрических и магнитных квазипостоянных и переменных полей, потоков энергичных частиц.

Данным сообщением мы хотим привлечь внимание еще к одному возможному эффекту землетрясений — воздействию сейсмической активности на режим *естественных* вариаций УНЧ-электромагнитного поля — *геомагнитных пульсаций*. Ниже приведены на-

блюдательные факты, свидетельствующие об этом, и обсуждены полученные результаты.

Геомагнитные пульсации — это естественные вариации электромагнитного поля Земли, наблюдаемые на земной поверхности в диапазоне от миллигерц до нескольких герц. По морфологическим признакам они подразделяются на регулярные (Pc) и иррегулярные (Pi) колебания [Jacobs, 1970]. Пульсации — один из доступных инструментов для исследования околоземного и космического пространства [Нишида, 1980]. Они чутко реагируют своими свойствами на изменения в среде, вызванные воздействием стороннего источника какого-либо происхождения. Можно ожидать, что процессы в верхней атмосфере, инициированные *сейсмической* активностью, также найдут отражение в режиме фиксируемых на земной поверхности колебаний. Способность геомагнитных пульсаций распространяться по ионосферному волноводу на большие расстояния дает дополнительную возможность наблюдать эффекты при значительном удалении от эпицентра землетрясения.

На геофизической обсерватории (ГО) "Борок" РАН проводятся систематическая регист-

рация и анализ вариаций естественного электромагнитного поля в диапазоне частот от 0 до 5 Гц для их сопоставления с другими геофизическими явлениями, в частности, с землетрясениями. Обсерватория расположена в сейсмически неактивной зоне, географические координаты пункта наблюдения  $\varphi = 58,06^\circ$ ,  $\lambda = 38,23^\circ$ . Исходный материал для анализа — записи на магнитную ленту УНЧ-вариаций электромагнитного поля Земли за период с 1973 по 1994 г. Обработка геомагнитных данных велась с применением методов компьютерного анализа. Текущий фрагмент магнитофонной записи (как правило, 12 ч при коэффициенте трансформации  $K_{\text{тр}} = 1000$ ) выводился на диаграмму (сонограмму) в координатах частота — время. Получали мгновенный сонографический “снимок” переменного электромагнитного поля, на котором в координатах частота — время отражалась информация о сигналах в анализируемом интервале. Амплитуды оценивались по видимым фотозаписям со скоростью протяжки ленты 30 мм/мин, частота определялась из сонограмм. Данные о землетрясениях брались из каталога International Seismological Centre, ISC Catalogues, [www.isc.ac.uk](http://www.isc.ac.uk). Подробное описание методики анализа, статистическая обработка результатов и оценка их достоверности даны в статье [Довбня и др., 2006].

Одним из результатов проводимых исследований было обнаружение в близкой временной окрестности землетрясений (первые десятки секунд, первые минуты) электромагнитных импульсов в диапазоне частот от долей герца до нескольких герц [Довбня и др., 2006]. Напомним основные свойства обнаруженных нами сигналов, поскольку с ними оказались тесно связаны эффекты в геомагнитных пульсациях.

Относительно землетрясений это были или опережающие (70%), или запаздывающие сигналы (30%). 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 единичных (75%) либо парных импульсов, следующих друг за другом с интервалом 40—150 с (25%). Типичные примеры возникновения обоих типов сигналов при землетрясениях представлены на рис. 1 (здесь и на других рисунках стрелками отмечены моменты землетрясений; в подрисуночных подписях приведены следующие параметры землетрясений: мировое время; географичес-

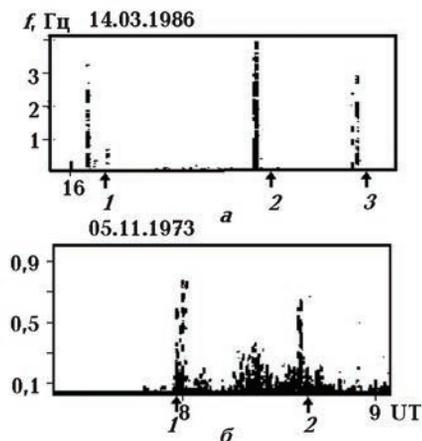


Рис. 1. Примеры наблюдений при землетрясениях электромагнитных импульсов на обсерваториях: а — “Борок” (1 — 16 : 05 : 13; — 5,28; 154,34; 5,2; 233; 2 — 16 : 25 : 46; 24,78; 122,87; 4,0; 23; 3 — 16 : 35 : 27; — 41,13; 174,64; 3,4; 31); б — “Колледж” (1 — 7 : 58 : 51; 41,76; 133,19; 4,1; 440; 2 — 8 : 40 : 47; 41,58; 13,68; 4,4; 33).

кие координаты; магнитуда  $M$ ; глубина  $h$ , 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 пикотесла. В зависимости от расстояния до эпицентра предпочтение оказывалось относительно близким (2000—3000 км) землетрясениям.

Таковы кратко свойства обнаруженного нами импульсного УНЧ-электромагнитного излучения, в основном сходные с наблюдаемыми в ОНЧ-диапазоне [Моргунов, 1985].

При анализе геомагнитных данных на ГО “Борок” наше внимание привлекла неожиданная реакция геомагнитных пульсаций типа Pc1 (жемчужины) на импульсное излучение [Dovbnya, 2007]. Появление электромагнитного импульса приводило либо к резкому срыву существовавших до землетрясения колебаний, либо, наоборот, к их резкой интенсификации. Возможен был и другой эффект — возбуждение вслед за импульсом серии жемчужин с отчетливой привязкой начала колебаний к импульсу.

Обнаруженные эффекты представляли несомненный интерес как одно из проявлений воздействия сейсмической активности на верхнюю атмосферу. Не меньшее значение имело исследование поведения в такие периоды

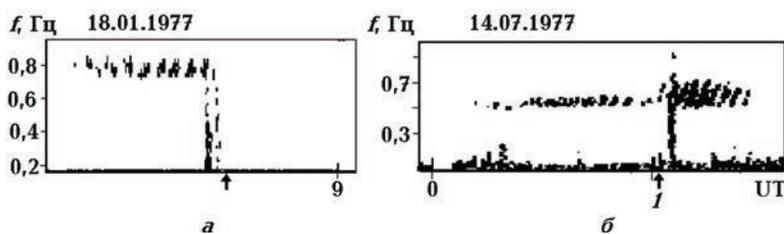


Рис. 2. Эффект внезапного подавления и резкой интенсификации колебаний электромагнитным импульсом при землетрясении. Обсерватории: а — "Борок": 8 : 48 : 54; 33,1; 48; 5,9; 71; б — "Колледж": 1 : 02 : 54; 39,5; 179,6; 3,4, 10.

и других типов геомагнитных пульсаций. Каждый из эффектов мог содержать важную информацию о процессах в магнитосфере и ионосфере, инициированных тектонической активностью на стадии подготовки и протекания землетрясений. К анализу дополнительно были привлечены наблюдательные данные высокоширотной обсерватории "Колледж" за период с 1972 по 1978 г. Ее географические координаты:  $\varphi = 64,9^\circ$ ;  $\lambda = 212,0^\circ$ .

Рассмотрим различные примеры сейсмического воздействия на режим регулярных и иррегулярных колебаний по наблюдениям на обсерваториях "Борок" и "Колледж". На рис. 2—4 представлены фрагменты записи переменного электромагнитного поля в частотно-временном изображении за выбранный интервал времени.

**Эффекты в режиме геомагнитных пульсаций Pc1.** Пульсации типа Pc1 относятся к классу регулярных колебаний, для которых характерна устойчивость режима. При спокойных условиях в магнитосфере серия жемчужин представляет собой последовательность дискретных элементов, плавно нарастающих в начале серии и плавно затухающих в конце. Появление электромагнитных импульсов, связанных с землетрясениями, нарушало естественный ход серии Pc1 и приводило к аномальным изменениям в режиме колебаний.

Рассмотрим рис. 2. Серия жемчужин наблюдалась на ГО "Борок" 18.01.1977 г. в интервале 8—9 UT (рис. 2, а). В 8 : 48 : 54 UT произошло землетрясение с магнитудой  $M = 5,9$  на глубине  $h = 71$  км. Расстояние от эпицентра около 2000 км. За 3 мин до землетрясения в электромагнитном поле регистрируются два следующих друг за другом импульса (импульсы-близнецы). Эффект в пульсациях на их появление неожиданный. Происходит резкий и полный срыв колебаний, серия жемчужин вне-

запно исчезает, и какие-либо ее следы за импульсами не просматриваются.

Итак, на рис. 2, а показан эффект полного подавления жемчужин электромагнитным импульсом при землетрясении. Наблюдался и обратный эффект, а именно появление импульса привело не к ослаблению, а к резкой интенсификации существующих колебаний. На рис. 2, б видно, что естественное развитие серии жемчужин не нарушалось до момента землетрясения. В 01 : 02 : 54 UT произошло землетрясение с магнитудой  $M = 3,4$  на глубине  $h = 10$  км, на расстоянии свыше 10 000 км от ГО "Колледж". Спустя 2 мин после сейсмического события на обсерватории регистрируется импульс электромагнитного излучения. И снова вслед за импульсом происходят аномальные изменения в режиме наблюдаемых на земной поверхности колебаний, но в этом случае уже их резкая интенсификация.

Выше обсуждено воздействие сейсмических событий на серии жемчужин, возбужденных в магнитосфере независимо от этих событий. Рассмотрим случаи, которые наглядно свидетельствуют о том, что электромагнитный импульс, связанный с землетрясением, стимулирует *возбуждение* жемчужин, по-видимому, будучи своего рода затравочным сигналом. На рис. 3, а видно, как из весьма узкополосного начала постепенно развивается клинообразная структура динамического спектра серии жемчужин, характерная для пульсаций данного типа. Не вызывает 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 Pc1. Импульсы-близнецы ре-

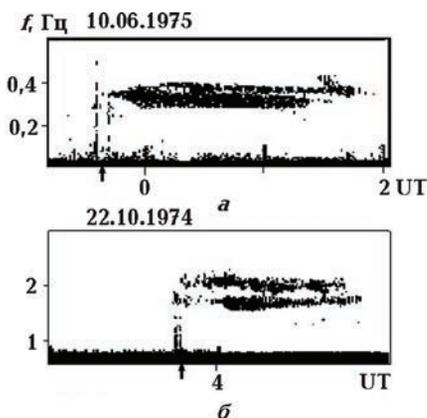


Рис. 3. Возбуждение серии жемчужин вслед за импульсными сигналами. Обсерватории: а — "Колледж": 23 : 37 : 37; 43,18; 147,72; 5,4; 100; б — "Борок": 3 : 49 : 13; -22,4; -179,5; 4,8; 0.

гистрируются на ГО "Борок" за 1 мин до землетрясения с  $M = 4,8$  и  $h = 0$  на расстоянии свыше 10 000 км от его эпицентра (рис. 3, б).

Итак, появление электромагнитных импульсов, связанных с землетрясением, нарушает естественный ход существующих регулярных колебаний, что приводит к аномальным изменениям в их режиме. Всего за анализируемые периоды обнаружено около 200 таких событий. 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. Однако по отдельности одни и те же изменения в режиме пульсаций наблюдаются при землетрясениях на каждой из обсерваторий. Касаясь вопроса о статистике связи импульс-Рс1,

отметим 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. Вместе с тем *возбуждение* серии жемчужин вслед за импульсом — возможное, но относительно редкое явление, контролируемое, по видимому, наличием в магнитосфере благоприятных условий для развития колебаний.

Ниже рассмотрены особенности проявления сейсмической активности в *иррегулярных* колебаниях — в пульсациях типа Irdf и P1B.

**Эффекты землетрясений в пульсациях типа Irdf.** Наряду с эффектами в Рс1 имеют место странности в поведении другого типа геомагнитных пульсаций, а именно колебаний нарастающей частоты, или Irdf. Эти пульсации относятся к классу иррегулярных и наблюдаются в главную фазу магнитной бури в вечерние и предполуночные часы [Гульельми, Троицкая, 1973]. Обнаружены не совсем обычные случаи, когда пульсации неожиданно появлялись в отсутствие магнитных бурь и при этом не всегда в характерное для них время. Мы сопоставили такие наблюдения с сейсмическими событиями. Оказалось, что все случаи аномального появления Irdf совпадали или были близки по времени к моменту того или иного землетрясения. Отклик на землетрясения мог проявляться и в аномальном срыве колебаний во время, близкое к моменту сейсмического события. На рис. 4 показаны динамические спектры колебаний нарастающей частоты, наблюдавшихся на обсерваториях "Борок" и "Колледж". В обоих случаях возбуждение пульсаций происходило в отсутствие

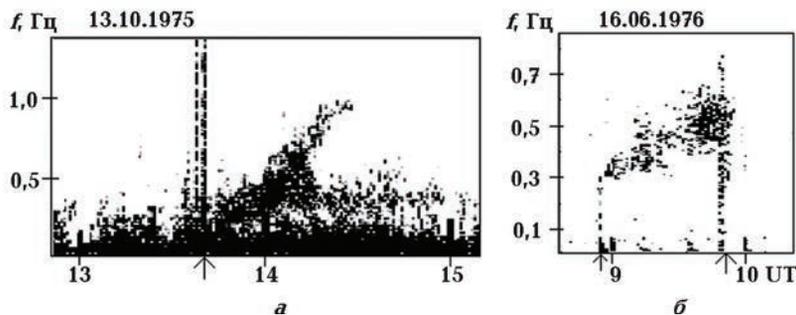


Рис. 4. Примеры иррегулярных колебаний Irdf, зарегистрированных на обсерваториях "Борок" и "Колледж" при индивидуальных землетрясениях: а — "Борок": 13 : 41 : 21; 37,9; 2,8; 23,1; б — "Колледж": 8 : 56 : 00; 35,5; 139,1; 0; 22; 9 : 50 : 48; 35,5; 139,1; 0; 21.

магнитных бурь. Это видно на рис. 4, *а*, когда 13.10.1975 г. в 1341 UT (для ГО "Борок"  $LT = UT + 3$ ) на юге Греции на расстоянии 2500 км от обсерватории произошло землетрясение. Оно сопровождалось импульсным электромагнитным излучением (три широкополосных импульса на сонограмме), вслед за которым наблюдалось начало иррегулярных колебаний  $I_{pdr}$  с характерным для них трендом частоты. На рис. 4, *б* показано anomальное появление пульсаций  $I_{pdr}$  при сейсмической активности на ГО "Колледж". Землетрясения произошли в одном регионе с интервалом 55 мин. Оба сейсмических события также сопровождалось импульсным электромагнитным излучением. Эффект от первого импульса проявился в виде внезапных пульсаций, в то время как после второго импульса произошел резкий срыв колебаний. Расстояние от эпицентра составило около 8000 км. Как и в предыдущем случае, возбуждение колебаний не связано с магнитной бурей и происходило при спокойных условиях в магнитосфере (индекс геомагнитной активности  $K_p = 2$ ).

В нашем архиве имеются еще около 30 примеров сейсмического воздействия на режим иррегулярных колебаний типа  $I_{pdr}$ . Во всех этих случаях появление пульсаций совпадало или было близко по времени к моменту того или иного землетрясения.

Таким образом, экспериментальные факты свидетельствуют о том, что сейсмическая активность может привести к anomальному возбуждению пульсаций  $I_{pdr}$ , независимо от геомагнитной активности и местного времени.

#### Аномальное появление всплесков $Pi1B$ .

Рассмотрим примеры, которые не только иллюстрируют еще один из эффектов землетря-

сений в геомагнитных пульсациях, но и позволяют указать на природу, их вызывающую. Речь идет о коротких, длительностью 2—5 мин, всплесках иррегулярных колебаний  $Pi1B$ , связанных своим происхождением с инъекцией заряженных частиц в ионосферу. Они характерны для суббулевой активности и наблюдаются вблизи местной полуночи [Гульельми, Троицкая, 1973]. Однако имеются экспериментальные факты, свидетельствующие о том, что сейсмическая активность может привести к anomальному возбуждению пульсаций  $Pi1B$ , независимо от геомагнитной возмущенности и местного времени. 6 сентября 1975 г. в 9:20 UT в Турции произошло разрушительное землетрясение с магнитудой  $M = 6,9$ . Из сонограммы (рис. 5) видно, что за 3 мин до главного толчка появились следующие друг за другом два импульса. Справа на рис. 5 показаны фрагмент  $H$ -компоненты магнитограммы с оригинальной записью зарегистрированного на обсерватории импульса (*а*) и его увеличенная копия (*б*). Амплитуда сигнала в ГО "Борок" не превышала 20 пТл. Нас интересует последующий эффект. В 9:20 UT появился еще один импульс и вслед за ним — всплеск иррегулярного излучения длительностью около 5 мин. По виду динамического спектра излучение подобно пульсациям  $Pi1B$ . В геомагнитном поле в это время отмечена внезапная бухта. Ее амплитуда в ГО "Борок" составила 15 и 9,5 нТл по  $H$ - и  $D$ -компонентам соответственно, уменьшаясь к северу на станциях, находящихся вблизи долготы ГО "Борок". Событие наблюдалось в дневные часы (для ГО "Борок"  $LT = UT + 3$ ).

Нами обнаружено около 30 случаев anomального по времени появления пульсаций в

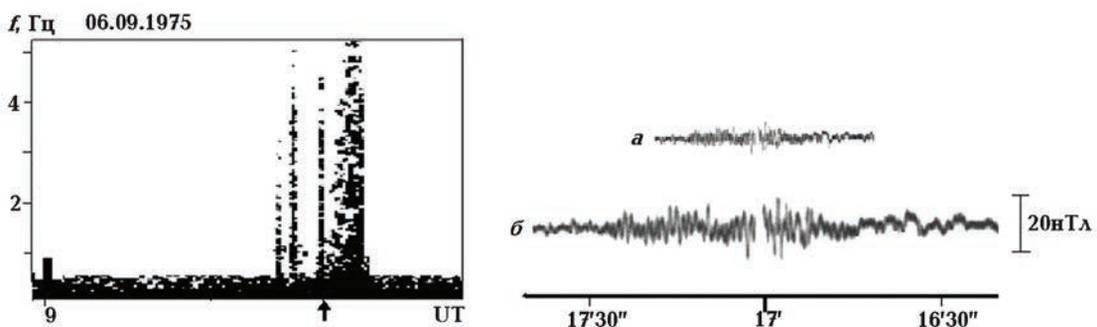


Рис. 5. Аномальное по времени появление пульсаций  $Pi1B$  при разрушительном землетрясении в Турции 6 сентября 1975 г. (9:20:11; 38,513; 40,774; 6,9; 32): слева — сонограмма; справа — фрагмент магнитограммы с оригинальной записью  $H$ -компоненты электромагнитного поля.

периоды, не отмеченные геомагнитной возмущенностью. Все они также совпадали или были близки по времени к моменту индивидуального землетрясения и, как правило, наблюдались вслед за электромагнитными импульсами.

Итак, наблюдательные данные свидетельствуют о воздействии сейсмической активности на геомагнитные пульсации. Природа этого воздействия не столь очевидна. Эффекты не зависят от магнитуды и глубины землетрясений. В то же время не вызывает сомнений их связь с электромагнитными импульсами. Попытаемся на примерах с колебаниями  $Pc1$  и  $Pi1B$  дать качественное объяснение результатам, исходя при этом из существующих представлений о свойствах пульсаций и особенностях их поведения при сейсмической активности<sup>1</sup>.

Свойства геомагнитных пульсаций на земной поверхности определяются условиями прохождения альвеновских волн через ионосферу [Гульельми, Троицкая, 1973; Trakhtengerts et al., 2000; Demekhov et al., 2002]. Коэффициент отражения волн Альвена, распространяющихся вдоль силовых линий из магнитосферы в ионосферу, как функция частоты, имеет несколько максимумов и минимумов, обусловленных резонансными свойствами отражающего слоя [Поляков и др., 1983]. Практически пульсации на Земле могут наблюдаться лишь при условии частичного отражения. Если же частота наблюдаемых пульсаций соответствует одному из экстремальных значений коэффициента отражения, может произойти срыв колебаний либо их резкая интенсификация. Условия прохождения волн к Земле могут трансформироваться при импульсном высыпании заряженных частиц радиационного пояса Земли (РПЗ) в ионосферу. Изменение резонансных свойств среды приведет к сдвигу спектральной кривой по оси частот, что найдет свое отражение в режиме наблюдаемых на земной поверхности пульсаций.

Косвенное свидетельство высыпания частиц при землетрясении — случаи аномального появления всплесков иррегулярных колебаний  $Pi1B$ , возбуждение которых обусловлено инъекцией заряженных частиц РПЗ в

ионосферу. И, безусловно, пристального внимания заслуживает загадочная связь наблюдаемых при этом эффектов с импульсным электромагнитным излучением.

Можно попытаться дать объяснение наблюдательным фактам, если принять гипотезу о существовании особого вида сейсмомагнитно-сферно-ионосферной связи, вызванной резким УНЧ-электромагнитным импульсом литосферного происхождения. Схема этой связи нам представляется следующей.

В преддверии землетрясений (или после землетрясения) в результате процессов механоэлектромагнитных преобразований в земной коре генерируется УНЧ-электромагнитный импульс [Довбня и др., 2006]. Пройдя атмосферу, сигнал в диапазоне частот 0—5 Гц практически без затухания распространяется в ионосфере и магнитосфере и может достигнуть РПЗ [Молчанов, 1991]. Мы предполагаем резонансное взаимодействие этих импульсов с частицами РПЗ, что может привести к резкому возрастанию потока высыпавшихся в ионосферу заряженных частиц. Еще в 1970-е годы на спутниках "Интеркосмос-3 и -5" изучалось взаимодействие низкочастотных электромагнитных волн с потоками захваченных частиц [Вернова и др., 1970; Yiricek et al., 1973]. Было обнаружено, что низкочастотное излучение изменяет в процессе взаимодействия стационарное питч-угловое распределение захваченных частиц РПЗ. В результате резонансные частицы попадают в конус потерь, что обеспечивает дополнительную ионизацию ионосферных слоев. Возрастание потока высыпавшихся частиц (протонов и электронов) *перед землетрясением* впервые наблюдалось в эксперименте на орбитальной станции "Салют-7" в 1985 г. [Voronov et al., 1987]. Авторы объясняют этот эффект взаимодействием УНЧ-электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,1—10 Гц с захваченными электронами и протонами РПЗ. При совпадении частоты излучения с баунс-частотой частиц РПЗ взаимодействие приобретет квазирезонансный характер и может привести к резкому возрастанию потока высыпавшихся в ионосферу заряженных частиц. Последующие работы на эту же тему, выполненные по данным космических аппаратов "Метеор-3А" [Пустоветов, Малышев, 1993] и OREOL-3 [Гальперин и др., 1992], подтвердили сделанные ранее выводы о корреляции аномальных высыпаний с сейсмическими процессами.

<sup>1</sup> Природа эффектов  $I_{pdr}$  не столь очевидна, и мы оставляем открытым вопрос об их происхождении. Можно лишь констатировать отклик в их режиме на то или иное сейсмическое событие.

В наших наблюдениях эффектам, связанным с инъекцией заряженных частиц в ионосферу, закономерно предшествовал широкополосный УНЧ-электромагнитный импульс в диапазоне частот от миллигерц до нескольких герц. Следовательно, сделанное нами предположение не противоречит результатам рассмотренных работ.

Дополнительная инъекция, вызванная воздействием УНЧ-электромагнитного импульса на РПЗ, изменит резонансные свойства ионосферы и, как показано выше, приведет к тому или иному эффекту в режиме наблюдаемых на земной поверхности серий Pc1. Другое проявление аномального высыпания частиц РПЗ в ионосферу — возбуждение иррегулярных колебаний Pi1B<sup>2</sup>.

Внезапные изменения в режиме Pc1 наблюдались ранее автором при исследовании связи геомагнитных пульсаций с импульсными процессами в магнитосфере (см., например: [Довбня, Зотов, 1985]). Убедительные аргументы в пользу связи геомагнитных волн (на земной поверхности это геомагнитные пульсации Pc1 и IPDP) с рассеянием частиц РПЗ в конус потерь и высыпаниями приводятся в публикациях [Yahnina et al., 2000; 2003; Erlandson, Ukhorskiy, 2001].

При условиях в магнитосфере, благоприятных для возбуждения пульсаций Pc1, электромагнитные сигналы от землетрясений могут играть роль затравочного импульса и стимулировать развитие серий жемчужин. Генерации жемчужин могут также способствовать увеличению коэффициента отражения волн от ионосферы и, соответственно, увеличение добротности магнитосферного резонатора в ре-

зультате дополнительной ионизации, вызванной импульсным излучением.

Таким образом, мы принимаем гипотезу об электромагнитной природе сейсмоионосферной связи, где в качестве агента, связывающего процессы в земных недрах с процессами в верхней атмосфере, предлагается импульсное электромагнитное излучение Земли.

В этой работе мы стремились экспериментально показать наличие отклика в геомагнитных пульсациях на процессы подготовки и протекания землетрясений. Результаты не противоречат накопленным в литературе данным о разнообразных формах воздействия землетрясений на ионосферу. Напротив, они расширяют спектр возможных электромагнитных проявлений сейсмических процессов. Наблюдение за пульсациями может оказаться полезным при исследовании процессов в верхней атмосфере, инициированных сейсмической активностью. Вместе с тем они также важны для изучения тектонических процессов и их взаимосвязей с внешней средой, природа которых остается до конца невыясненной. В 2004 г. был начат специальный спутниковый эксперимент DEMETER [Parrot, 2005] для проведения прямых измерений отклика ионосферных параметров на сейсмические и вулканические явления. В настоящее время в лаборатории записана 3-компонентная запись переменного электромагнитного поля. Изучение взаимосвязей в системе литосфера — магнитосфера — ионосфера по комплексным данным — предмет дальнейших исследований в этом направлении.

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

## Список литературы

- Вернова Л. В., Войта Я., Иржичек Ф. Регистрация низкочастотных излучений и сигналов на спутнике "Интеркосмос-3" // Косм. исследования. — 1970. — 10. — С. 82—91.
- Гальперин Ю. И., Гладышев В. А., Джорджио Н. В. Высыпания энергичных захваченных частиц в магнитосфере над эпицентром готовящегося землетрясения // Косм. исследования. — 1992. — 30, № 1. — С. 89.
- Гульельми А. В., Троицкая В. А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. — Москва: Наука, 1973. — 208 с.
- Довбня Б. В., Зотов О. Д. О связи импульсных процессов в ионосфере с режимом генерации колебаний Pc1 // Геомагнетизм и аэрономия. — 1985. — № 3. — С. 515—518.
- 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.

<sup>2</sup> Всплески Pi1B наблюдаются локально и поэтому не всегда заметны от удаленных землетрясений. Однако вопросы остаются.

- Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л.* Ионосферные предвестники землетрясений. — Москва: Наука, 1992. — 304 с.
- Молчанов О. А.* Прохождение электромагнитных полей от сейсмических источников в верхнюю ионосферу Земли // Геомагнетизм и аэронамия. — 1991. — **31**, № 1. — С. 111—119.
- Моргунов В. А.* Об электромагнитном излучении при сейсмической активности // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1985. — № 3. — С. 77—85.
- Нишига А.* Геомагнитный диагноз магнитосферы. — Москва: Наука, 1980. — 299 с.
- Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю.* Альвеновский свип-мазер // Физика плазмы. — 1983. — **9**, вып. 2. — С. 371—377.
- Пустоветов В. П., Малышев А. Б.* Пространственно-временная корреляция землетрясений и вариаций потока высокоэнергичных частиц во внутреннем радиационном поясе // Косм. исследования. — 1993. — **31**, № 5. — С. 84.
- Соболев Г. А.* Основы прогнозирования землетрясений. — Москва: Наука, 1993. — 313 с.
- Demekhov A. G., Isaev S. V., Trakhtengerts V. Yu.* Self-consistent modeling of Pc1 emissions in the Earth's magnetosphere, Physics of Auroral Phenomena // Proc. XXV Ann. Seminar. — Apatity, 2002. — PGI-02-03-113. — P. 69—72.
- Dovbnya B. V.* On the earthquake effects in the regime of Pc1 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. — 2007. — **69**, is. 14. — P. 1765—1769.
- Erlanson R. E., Ukhorskiy A. J.* Observations of electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms: Wave occurrence and pitch angle scattering // J. Geophys. Res. — 2001. — **106**. — P. 3883—3895.
- Jacobs J. A.* Geomagnetic micropulsations. — Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1970.
- Hayakawa M.* Electromagnetic phenomena associated with earthquakes: Review // Trans. Ins. Electr. Engrs. of Japan. — 2001. — **121-A**. — P. 893—898.
- Parrot M.* La mission DEMETER. — <http://www.sfp2005.org/resumes/NML3787/>
- Trakhtengerts V. Y., Demekhov A. G., Polyakov S. V., Belyaev P. P., Rapoport V. O.* A mechanism of Pc1 pearl formation based on the Alfvén sweep maser // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. — 2000. — **62**. — P. 231—238.
- Voronov S. A., Galper A. M., Kirillov-Ugriunov V. G.* Registration of sporadic increase of high energy particle flux near Brasilia magnetic anomaly region // Proc. 20<sup>th</sup> Int. Cos. Ray Conf. — 1987. — **4**. — P. 451—452.
- Yahnina T. A., Yahnin A. G., Kangas J., Manninen J.* Proton precipitation related to Pc1 pulsations // Geophys. Res. Lett. — 2000. — **27**. — P. 3575—3578.
- Yahnina T. A., Yahnin A. G., Kangas J., Manninen J., Evans D. S., Demekhov A. G., Trakhtengerts V. Yu., Thomsen M. F., Reeves G. D., Gvozdevsky B. B.* Energetic particle counterparts for geomagnetic pulsations of Pc1 and IPDP types // Ann. Geophys. — 2003. — **21**. — P. 2281—2292.
- Yiricek F., Triska P., Voita Ya.* VLF experiment with the Intercosmos 5 satellite // Studia Geophysica et Geodetica. — 1973. — **17**. — P. 49—52.