



Казахский Национальный Исследовательский Технический
Университет,
Институт Геологии и Нефтегазового Дела
Кафедра “Геофизики”

Сейсмогеофизические предвестники и стратегия прогнозирования землетрясений

Лекция 5

Краткосрочные электромагнитные предвестники землетрясений

По материалам: Б.В. Довбня, А. Ю. Пашинина, Р. А. Рахматулина (2019)

Преподаватель: Абетов Ауэз Егембердыевич – профессор,
доктор геол.-мин. наук, академик НАН РК

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 (монографии В.А. Липеровского [Liperovsky *et al.*, 1992], Г.А. Соболева [Sobolev, 1993] и М. Хаякавы [Hayakawa, 2001], обзор [Guglielmi, 2007]). Ряд работ посвящен исследованию связи землетрясений с магнитными бурями, имеющими внезапное начало (SSC)*. Обнаружено изменение сейсмической активности через несколько дней после SSC [Sobolev *et al.*, 2001; Zakrhevskaya, Sobolev, 2002, 2004; Adushkin *et al.*, 2012].

Другое направление, которое будет нами рассмотрено связано с изучением электромагнитных явлений, предваряющих и сопровождающих землетрясения. Накопленный к настоящему времени экспериментальный материал указывает на перспективность исследований таких явлений в ультразвукочастотном (УНЧ) диапазоне (0.001-10 Гц) [Ismaguilov *et al.*, 2001].

К первым наблюдениям относятся работы [Korytenko *et al.*, 1993; Molchanov, 1990; Molchanov *et al.*, 1992], в которых сообщается о колебаниях геомагнитного поля перед разрушительным землетрясением в Спитаке. Также следует отметить работы [Fraser-Smith *et al.*, 1990; Bernardi *et al.*, 1991], в которых обнаружен и проанализирован мощный всплеск ультразвукочастотных электромагнитных колебаний перед землетрясением в Лома-Приета**.

В работе [Hayakawa *et al.*, 1996] сообщается о наблюдении сверхнизкочастотного электромагнитного шума перед землетрясением в Гуаме. Обнаружены УНЧ геомагнитные возмущения, отражающие процесс подготовки Суматра-Андаманского землетрясения [Sobisevich *et al.*, 2010; Sobisevich L.E., Sobisevich A.L., 2010].

Таким образом, имеющиеся к настоящему времени отдельные наблюдения указывают на возможность возникновения перед сейсмическими событиями электромагнитных

Исходный материал и методы анализа

явлений в УНЧ диапазоне. И все же, как полагают авторы работ [*Kosterin et al., 2015; Thomas et al., 2009a, 2009b*], результаты разрозненных наблюдений нельзя еще считать строгим доказательством связи УНЧ эмиссий с землетрясениями.

В геофизической обсерватории «Борок» (п. Борок, Ярославская область, Россия) была предпринята попытка по данным непрерывных записей УНЧ вариаций электромагнитного поля Земли исследовать связь электромагнитных и сейсмотектонических процессов. В результате удалось обнаружить специфические УНЧ электромагнитные импульсы в диапазоне частот 0–5 Гц, наблюдаемые в выделенной временной окрестности землетрясений [*Dovbnya et al., 2006*].

Особое внимание привлекли те из них, которые наблюдались до сейсмического события. Появление упреждающих сигналов представляло несомненный интерес в рамках актуальной проблемы геофизики – поиска предвестников землетрясений (см., например [*Hayakawa, 1999; Hayakawa, Molchanov, 2002; Hattori, 2004; Guglielmi, Zотов, 2012*]).

На основе тщательного анализа большого массива геофизических данных в трех разнесенных по широте и долготе обсерваториях экспериментальные факты, свидетельствующие о появлении электромагнитных предвестников, и обсудим полученные результаты.

Исходный материал и методы анализа

Анализ ультразвуковых излучений выполнялся по данным магнитных измерений, полученных двумя среднеширотными обсерваториями – Геофизической обсерваторией «Борок» Института физики Земли РАН (58.1° с.ш., 38.2° в.д.) за период с 1973 по 1995 г. и обсерваторией «Монды», расположенной на территории Саянской солнечной обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (51.6° с.ш., 100.9° в.д.) за период с 2011 по 2015 г., а также высокоширотной Геофизической обсерваторией «Колледж» (64.9° с.ш., 148.0° з.д.), расположенной в штате Аляска, США, за период с 1973 по 1977 г.

Исходным материалом для анализа являлись записи УНЧ вариаций электромагнитного поля Земли. В обсерваториях «Борок» и «Колледж» для измерений использовался индукционный магнитометр* с регистрацией на аналоговый магнитофон, в обсерватории «Монды» – цифровой индукционный магнитометр LEMI-30**.

Исходный материал и методы анализа. Результаты наблюдений

Во всех обсерваториях регистрировалось по две горизонтальные компоненты магнитных вариаций, север-юг и восток-запад. Амплитудно-частотная характеристика приборов позволяла анализировать колебания с частотой до 10 Гц в обсерваториях «Борок» и «Колледж» и до 30 Гц в обсерватории «Монды».

Аналоговые записи, полученные в обсерваториях «Борок» и «Колледж», оцифровывались, а затем подвергались спектрально-временному анализу с применением компьютерных программ так же, как и цифровые записи обсерватории «Монды».

Строились динамические спектры колебаний (спектрограммы), на которых в координатах частота–время отражалась информация о переменном электромагнитном поле в анализируемом интервале. При первоначальном визуальном просмотре из дальнейшего анализа исключались известные формы сигналов магнитосферного происхождения.

Сигналы, не коррелирующие с другими геофизическими явлениями, сопоставлялись с данными каталога землетрясений (International Seismological Centre, ISC Catalogues, <https://www.isc.ac.uk>). За момент появления сигнала бралась середина длительности импульса, которая определялась по временной шкале спектрограммы с точностью до 10 с.

Примерно для 250 событий (землетрясений) со статистической значимостью $p=0.86$ привязки к ближайшему по каталогу землетрясению были зарегистрированы сигналы, наблюдавшиеся в первые десятки секунд или минуты до сейсмического события.

По виду динамического спектра это были либо единичные, либо парные электромагнитные импульсы* в диапазоне частот от 0 до 5 Гц. Амплитуда сигнала обычно не превышала значения 10 нТл, а длительность – 20 с. При парном проявлении время между первым и вторым импульсами варьировалось в основном в интервале от 10 до 40 с. Реже наблюдались серии из трех и более импульсов.

Результаты наблюдений

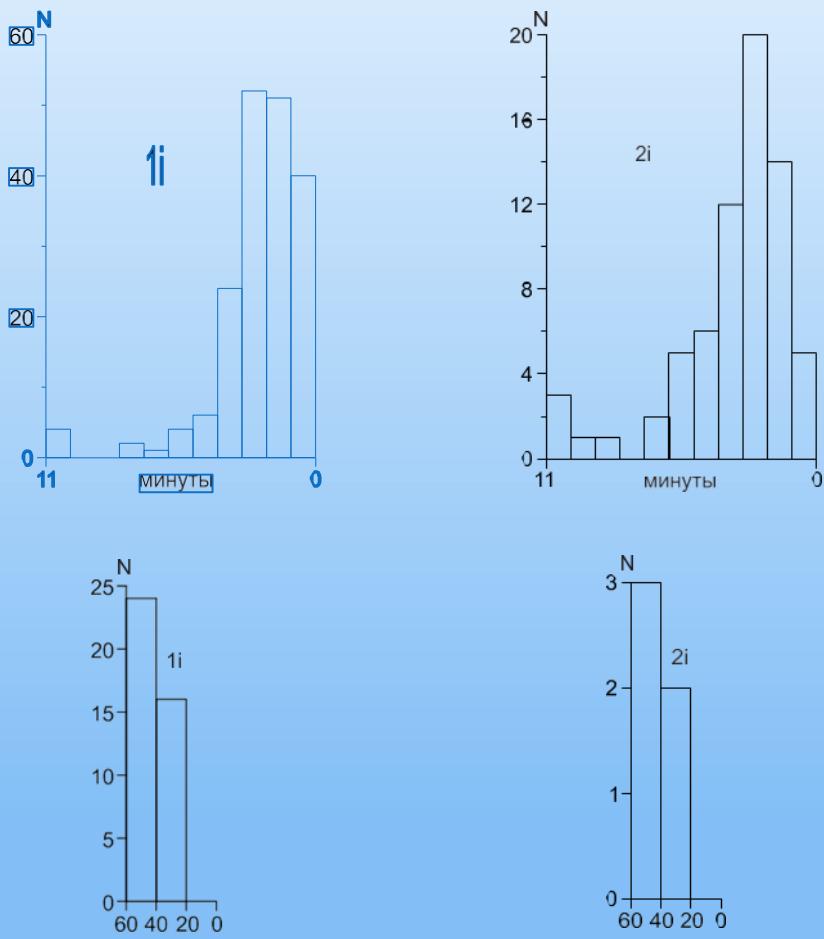


Рис 1. Распределение электромагнитных сигналов-предвестников в интервале 0–11 мин (верхняя панель) и за минуту до землетрясения (нижняя панель). Слева – одиночные сигналы, справа – парные.

Как правило, динамические спектры импульсов имели *дискретную структуру*.

На рис. 1 даны распределения единичных (1i) и парных (2i) импульсов, построенные по результатам наблюдений в трех обсерваториях. На верхней панели рисунка распределения приведены в интервале 0–11 мин до землетрясения, на нижней – за минуту. Из рисунка видно, что в основном перед землетрясением наблюдались единичные импульсы*. Отдельные сигналы регистрировались уже за 10 мин, но все же большая их часть появлялась ближе к моменту землетрясения. За минуту до землетрясения электромагнитная активность резко падала, и в последние 20 с импульсы не были замечены.

Примерно такой же характер наблюдался и в распределении парных импульсов.

Вероятность появления сигналов в отдельной обсерватории при одинаковой в среднем сейсмической активности оказалась существенно неодинаковой в разные дни и даже недели. Периоды их полного отсутствия вдруг сменялись периодами неожиданно высокой электромагнитной активности.

Сигналы после затишья начинали появляться, при этом вероятность их наблюдения не зависела существенно от магнитуды события, но отмечалось предпочтение для близких (2–3 тыс. км) землетрясений.

Результаты наблюдений

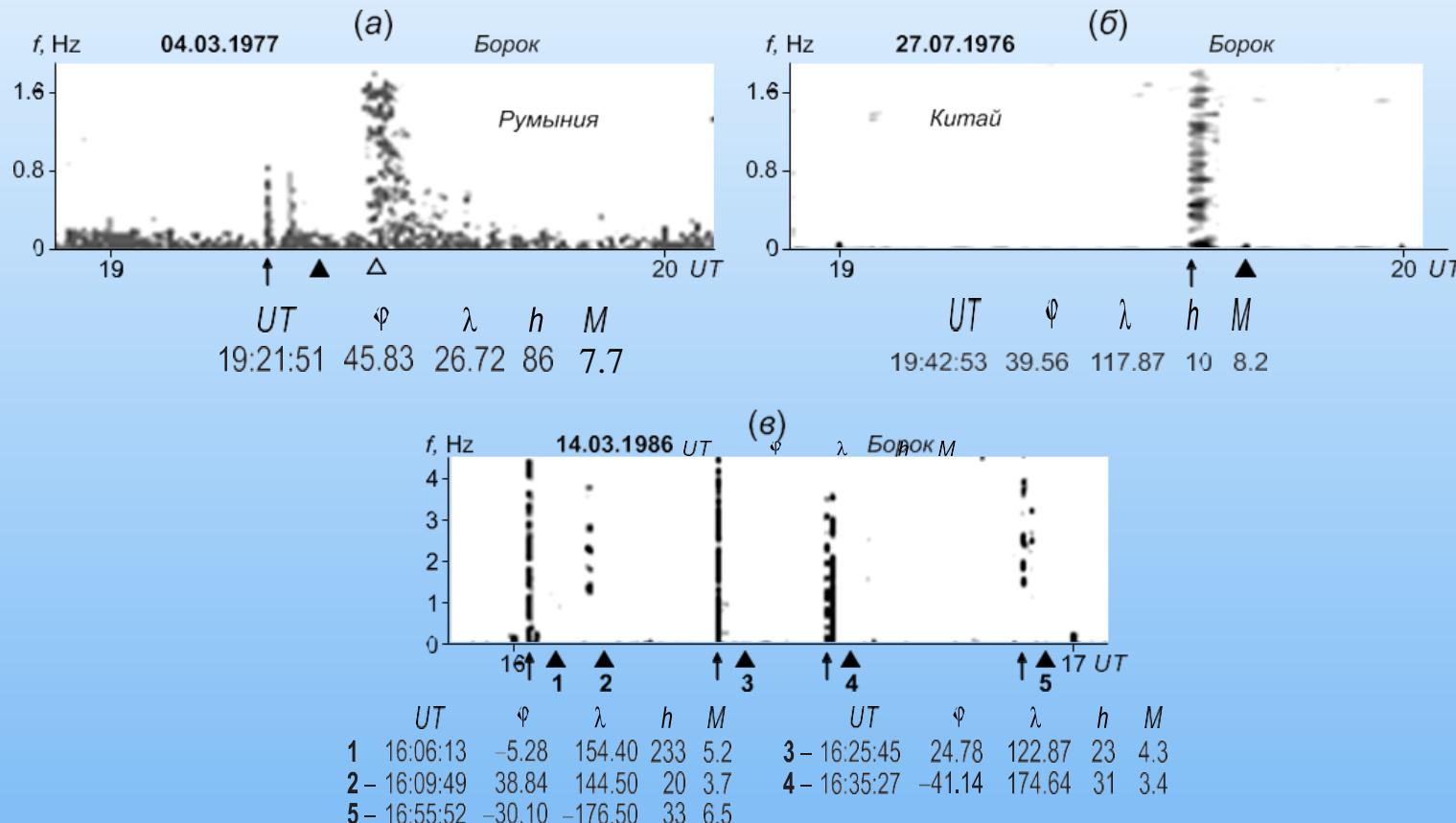


Рис. 2. Примеры краткосрочных предвестников землетрясений.

Электромагнитные предвестники были зарегистрированы перед разрушительными землетрясениями в Японии, Китае, Румынии, перед землетрясениями в Турции и других сейсмоактивных регионах. Примеры предвестников обоих типов даны на рис. 2, *а–в*. Здесь и далее темными треугольниками отмечены моменты землетрясений, стрелками – их предвестники, светлыми треугольниками отмечается приход сейсмической волны.

Результаты наблюдений

27 июля 1976 г. в Китае произошло катастрофическое землетрясение с $M=8.2$. За четыре минуты до момента землетрясения был также зарегистрирован его предвестник (рис. 2, б). На панели (в) даны примеры предвестников землетрясений, произошедших в разных регионах и с разной магнитудой.

На рис. 3 рассмотрены случаи появления электромагнитных сигналов перед землетрясениями в Японии по наблюдениям в трех разных обсерваториях. 11 марта 2011 г. у берегов Японии в 05:46 UT произошло самое мощное за всю историю наблюдений землетрясение. Его магнитуда составила 9.1 по шкале Рихтера.

Землетрясение сопровождалось серией повторных толчков, наиболее сильный из них с $M=7.2$ зафиксирован в 06:25 UT. На верхней панели рис. 3 это событие рассматривается по данным магнитных измерений в обсерватории «Монды». Здесь по горизонтальной оси нанесены метки времени с интервалом 11.5 мин между ними. За 5 мин до главного толчка в обсерватории регистрируется электромагнитный импульс. Перед повторным толчком наблюдается более интенсивный сигнал, который также опережает момент землетрясения на 4 мин.

На нижней панели рис. 3 даны примеры регистрации предвестников в «Бороке» и «Колледже». Рассмотрим рисунок слева. У берегов Японии 31 января произошло два глубокофокусных землетрясения с близко расположенными эпицентрами. Их магнитуды M составили 6.5 и 4.5 соответственно. На спектрограмме моменты землетрясений отмечены темными треугольниками. Как и в случае 11 марта 2011 г., перед каждым из сейсмических событий мы видим электромагнитные импульсы (показаны стрелками).

Опережение в данном случае составило около 5 мин. В «Бороке» снова отмечается приход сейсмических волн из эпицентра землетрясения. Справа на панели дан пример регистрации импульса-предвестника землетрясения в Японии с $M=5.3$ по наблюдениям в обсерватории «Колледж». Опережение составило около 5 мин.

На рис. 2 и 3 можно заметить примечательное свойство проявления электромагнитной активности – повторяемость предвестников в землетрясениях, происходящих вслед за главным ударом в том же регионе. Эта особенность представляет отдельный интерес, мы проиллюстрируем ее примерами на рис. 4, на котором моменты землетрясений отмечены черными треугольниками, их предвестники отмечаются стрелками.

Результаты наблюдений

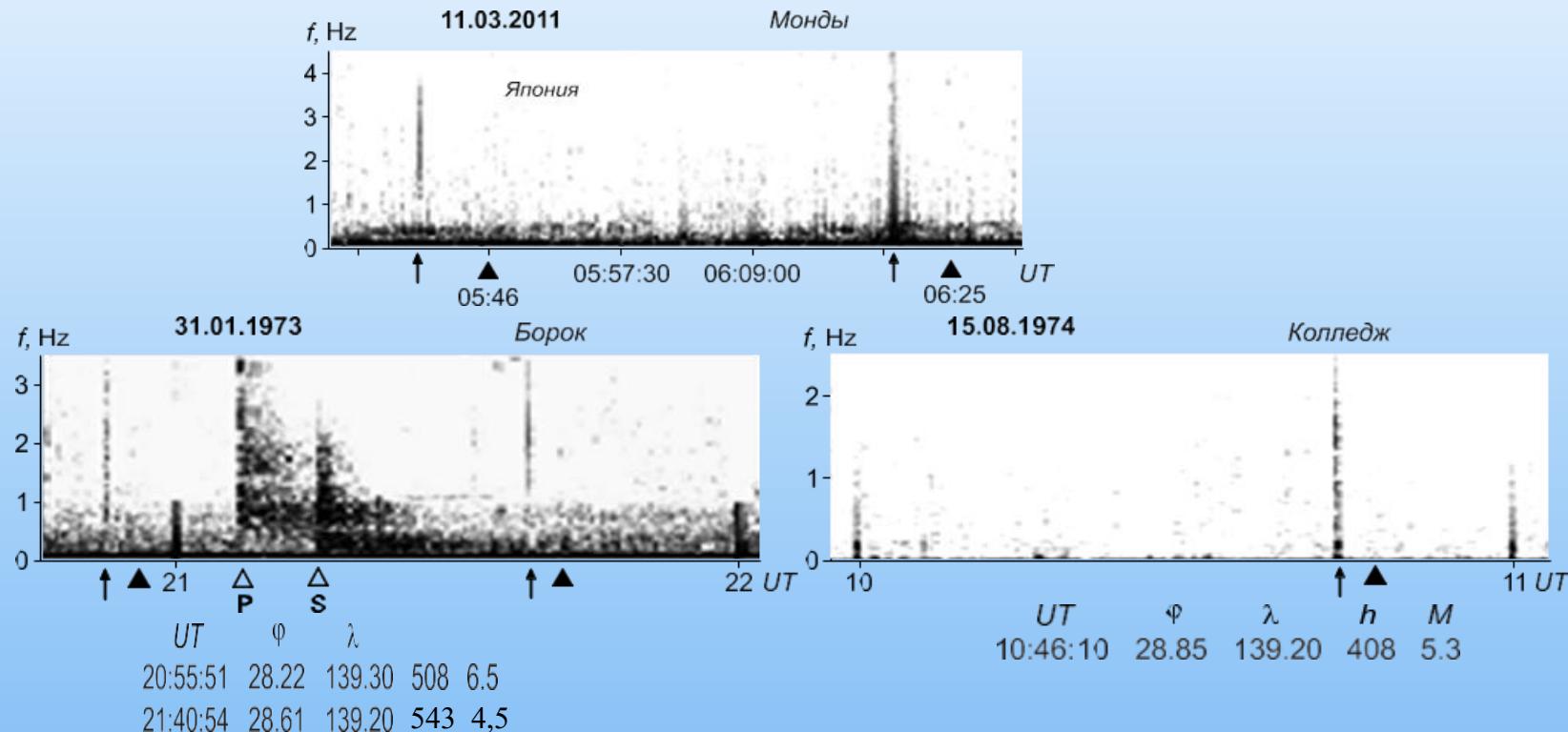


Рис. 3. Наблюдение предвестников землетрясений в Японии по данным обсерваторий «Монды», «Борок» и «Колледж».

В подписях к рисункам приводятся следующие параметры землетрясений: мировое время, географические координаты, глубина h в км, магнитуда M . На панели (а) рассмотрен электромагнитный отклик на событие в Японии. Разрушительное землетрясение с магнитудой $M=7.7$ произошло 4 марта 1977 г. в 19:21 UT. За четыре минуты до момента землетрясения в обсерватории «Борок» была зарегистрирована пара электромагнитных импульсов, которые на 10 мин опередили приход сейсмической волны из эпицентра главного удара (отмечен светлым треугольником на рисунке).

Результаты наблюдений

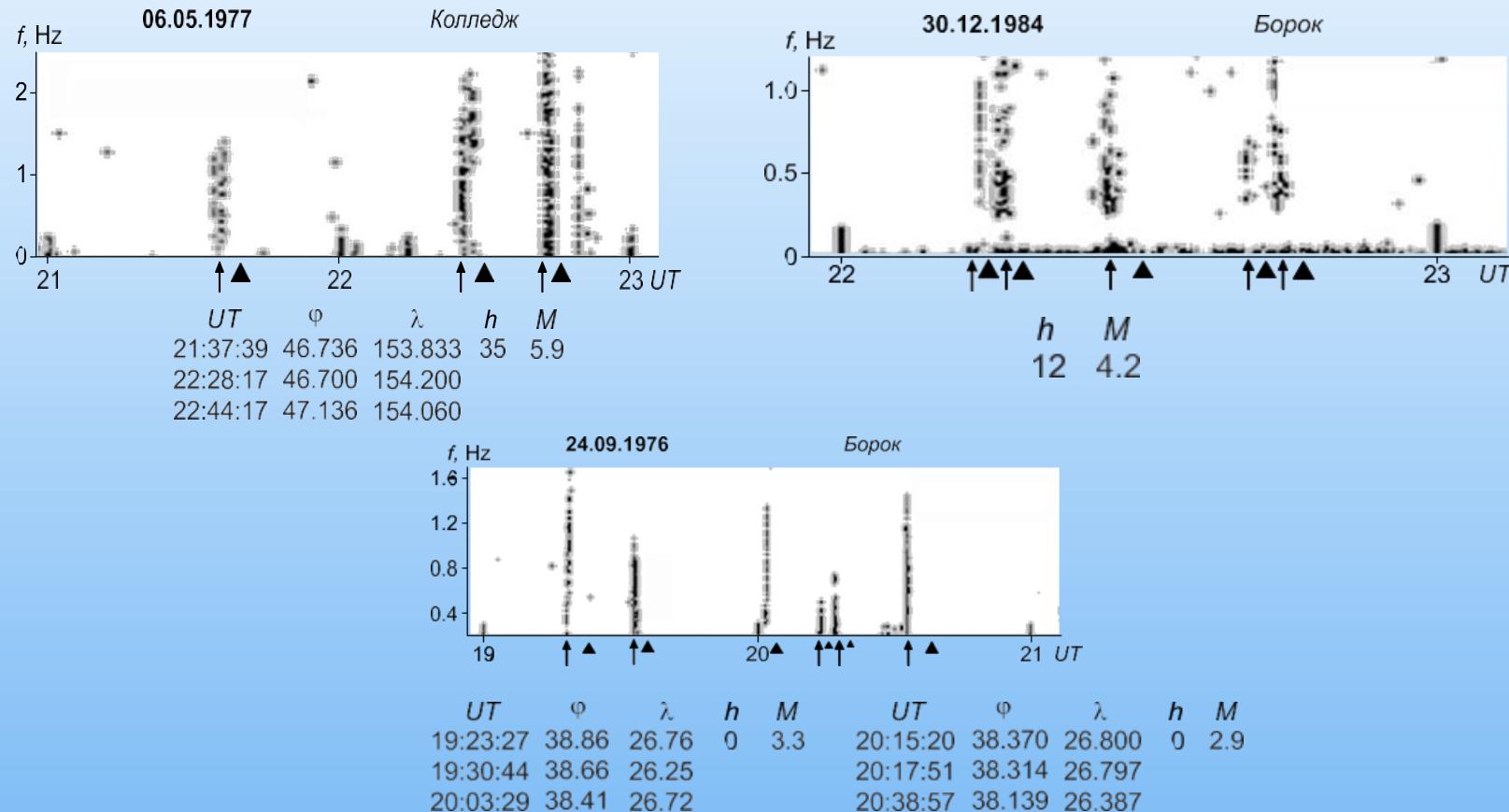


Рис.4-Примеры повторяемости предвестников.

На рисунке 5 дан пример одновременного появления электромагнитного сигнала-предвестника в обсерваториях «Борок» и «Колледж». В обеих обсерваториях сигналы имеют одинаковую спектральную форму и наблюдаются практически одновременно, несмотря на то, что они почти на 12 часов разнесены по долготе и на 10 градусов по широте.

Иногда перед землетрясениями могут наблюдаться серии из следующих друг за другом с разными интервалами импульсов. Число импульсов в серии может меняться от 3 до 10, интервалы между

Результаты наблюдений

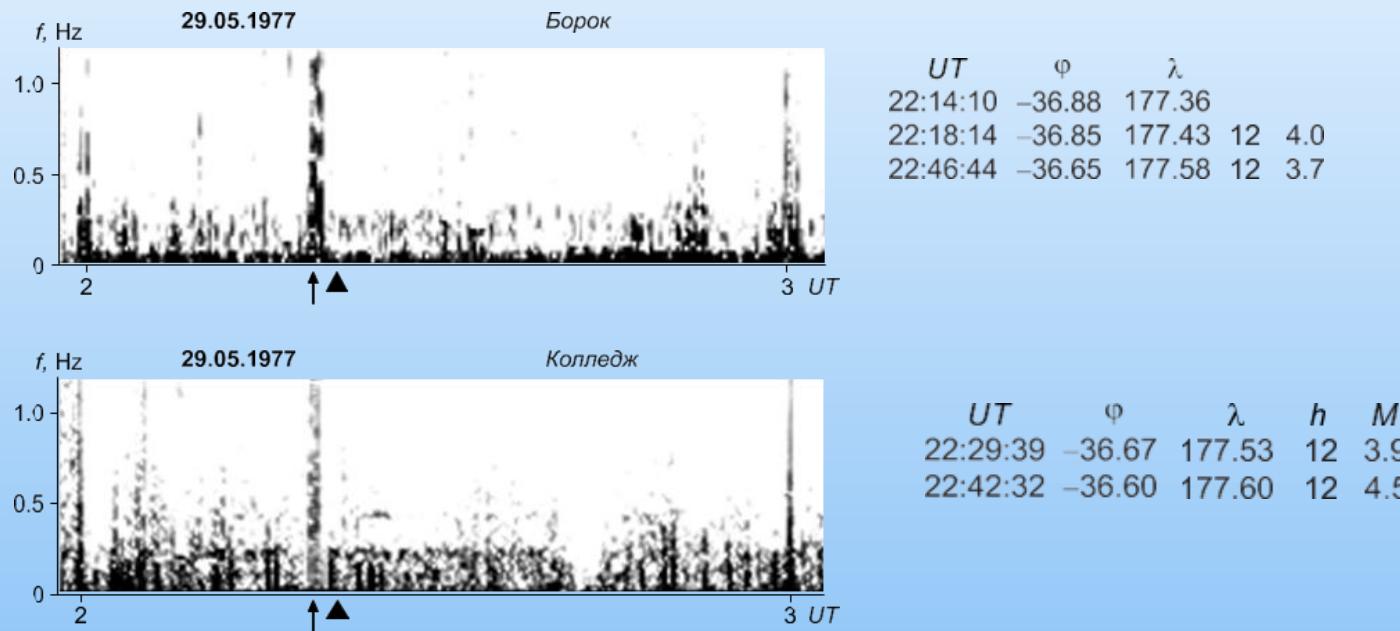


Рис. 5. Одновременное наблюдение сигнала-предвестника в разнесенных обсерваториях.

ними – от 1 до 2 мин, длительность серий может доходить до 15 мин, хотя в основном она составляет 5–10 мин. Спектры таких серий-предвестников представлены на рис. 6.

На этом мы закончим краткий обзор результатов наблюдения краткосрочных предвестников землетрясений и перейдем к их обсуждению.

Результаты наблюдений

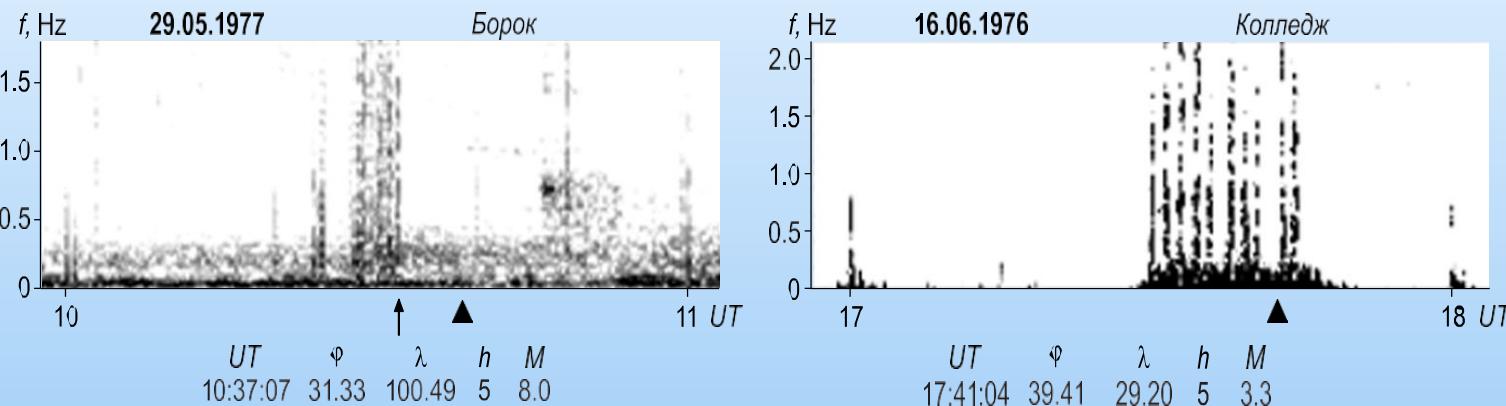


Рис. 6. Серии из следующих друг за другом импульсов, зарегистрированные перед землетрясениями по наблюдениям в обсерваториях «Борок» и «Колледж».

Обсуждение

Итак, в рассмотренных нами случаях зарегистрированы сигналы, наблюдаемые в первые десятки секунд или минуты до землетрясения. По виду динамического спектра это были либо единичные, либо парные электромагнитные импульсы с дискретной структурой. Иногда наблюдались серии из следующих друг за другом импульсов. *Во всех случаях сигналы имели подобные спектральные формы, один частотный диапазон и наблюдались в выделенном, относительно момента землетрясения, интервале времени.*

Обнаруженные сигналы можно рассматривать как проявление механоэлектромагнитных преобразований в зоне землетрясений. Обычно при рассмотрении возможной причины генерации сейсмоэлектромагнитных сигналов предлагаются индукционный и пьезомагнитный механизмы [Guglielmi, Levshenko, 1996].

Но индукционный эффект предполагает резкие и заметные перемещения пород при импульсном излучении, что с большей вероятностью можно ожидать в момент землетрясения. В нашем эксперименте

ОБСУЖДЕНИЕ

сигналы наблюдались до землетрясений, и их не было в момент главного толчка (см. рис. 1).

По-видимому, процессы, протекающие в очаговой зоне, не могут рассматриваться в качестве источников электромагнитного излучения (впервые на эту особенность было обращено внимание в работе [Gokhberg *et al.*, 1982]). Физика предвестников остается неясной.

Возможно, объяснение следует искать в рамках модели Рейда, в которой землетрясение связывается с разрушением защеплений на границе двух смежных плит [Reid, 1910]. Резкое сжатие пород, предшествующее их разрушению, приведет к генерации электромагнитного импульса (пьезомагнитный механизм) или серии из двух и более импульсов при неоднородной структуре межблочных защеплений.

В рамках этой гипотезы находит объяснение и предпочтительное появление предвестников в выделенном и близком относительно момента землетрясения интервале времени.

Повторяемость предвестников можно рассматривать как повторяемость и подобие процессов, предваряющих происходящие в одном регионе землетрясения, с преобразованием механической энергии в энергию электромагнитного излучения. Тесная времененная взаимосвязь электромагнитных и сейсмических явлений находится в хорошем соответствии с моделью землетрясений Рейда и не противоречит предлагаемому выше объяснению физической природы предвестников.

Дискретность спектра является типичной для случаев распространения пульсаций в ионосферном МГД-волноводе [Dovbnya *et al.*, 2014]. Логично предположить, что для электромагнитных импульсов с дискретной структурой трассой их распространения от эпицентра землетрясения является ионосферный волновод. Канализируемые в таком волноводе сигналы способны распространяться вдоль земной поверхности с альвеновской скоростью 1000 км/с на значительные расстояния [Guglielmi, Troitskaya, 1973]. Разные условия на пути их следования могут привести к разной вероятности появления импульсов при одинаковой в среднем сейсмической активности.

Таким образом при исследовании связи электромагнитных и сейсмоконтактных процессов по данным трех разнесенных по широте и долготе обсерваторий обнаружены электромагнитные импульсы в диапазоне частот от 0 до 5 Гц, которые наблюдались за минуты до землетрясения.. На конкретных примерах иллюстрируется появление сигналов перед разрушительными землетрясениями в Японии, Китае, Румынии и в ряде других сейсмоактивных регионов..

Заключение. Литература

Результаты могут найти применение при поиске и разработке методов контроля за сейсмической активностью в потенциально опасных регионах. *Наблюдение сигналов известной спектральной формы и их повторяемость дают принципиальную возможность оперативного оповещения (за несколько минут) о предстоящем землетрясении.*

Библиография

1. Довбня Б.В. Электромагнитные предвестники землетрясений и их повторяемость // Геофизический журнал. 2014. Т. 36. № 3. С. 160–165]. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i3.2014.116069>.
2. Довбня Б.В., Потапов А.С., Гульельми А.В., Рахматулин Р.А. О воздействии МГД резонаторов на геомагнитные пульсации // Геофизический журнал. 2014. Т. 36. № 6. С. 143–152. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i6.2014.111053>.
3. Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.
4. Костерин Н.А., Пилипенко В.А., Дмитриев Э.М. О глобальных ультразвуковых частотных электромагнитных сигналах перед землетрясениями // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 1. С. 24–34.
5. Липеровский В.А., Похотов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
6. Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Дилатансные структуры и электромагнитные возмущения УНЧ диапазона на этапах подготовки и развития крупного сейсмического события // Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2010. Т. 2. NZ6027. С. 202–213]. <https://doi.org/10.2205/2010NZ000045>.
7. Соболев Г.А. Основы прогнозирования землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
8. Закржевская Н.А., Соболев Г.А. Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных регионах // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 63–75.

Литература

9. Bernardi A., Fraser-Smith A.C., McGill P.R., Villard O.G. Jr., 1991. ULF magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 68 (1–2), 45–63. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(91\)90006-4](https://doi.org/10.1016/0031-9201(91)90006-4).
10. Fraser-Smith A.C., Bernardi A., McGill P.R., Ladd M., Helliwell R.A., Villard O.G. Jr., 1990. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. *Geophysical Research Letters* 17 (9), 1465–1468. <https://doi.org/10.1029/GL017i009p01465>.
11. Hattori K., 2004. ULF geomagnetic changes associated with large earthquakes. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences* 15 (3), 329–360.
12. Hayakawa M. (Ed.), 1999. *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 996 p.
13. Hayakawa M., Molchanov O.A., 2002. *Seismo-Electromagnetics Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 477 p.
14. Kopytenko Y.A., Matiashvili T.G., Voronov P.M., Kopytenko E.A., Molchanov O.A., 1993. Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 77 (1–2), 85–95. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(93\)90035-8](https://doi.org/10.1016/0031-9201(93)90035-8).
15. Molchanov O.A., 1990. Discovering of Ultra-Low-Frequency Emissions Connected with Spitak Earthquake and its Aftershock Activity on Data of Geomagnetic Pulsations Observations at Dusheti and Vardzija. Preprint No. 3 (888). IZMIRAN, Moscow, 27 p.
16. Sobolev G.A., Zakrzhevskaya N.A., Kharin E.P., 2001. On the relation between seismicity and magnetic storms. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 37 (11), 917–927.
17. Thomas J.N., Love J.J., Johnston M.J., 2009a. On the reported magnetic precursor of the 1989 Loma Prieta earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 173 (3–4), 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.11.014>.
18. Thomas J.N., Love J.J., Johnston M.J., Yumoto K., 2009b. On the reported magnetic precursor of the 1993 Guam earthquake. *Geophysical Research Letters* 36 (16), L16301. <https://doi.org/10.1029/2009GL039020>.

Вопросы по закреплению содержания лекции 5

- История исследований электромагнитных явлений, предваряющих и сопровождающих землетрясения.
- Исходный материал и методы анализа электромагнитных предвестников. УНЧ вариации электромагнитного поля Земли. Корреляция сигналов с с данными каталога землетрясений.
- Распределение электромагнитных сигналов- предвестников. Характер и период проявления сигналов.
- Примеры электромагнитных откликов на сейсмические события.
- Свойство проявления электромагнитной активности – повторяемость предвестников в землетрясениях. Характеристики спектров серий-предвестников.
- Характеристики спектральных форм электромагнитных сигналов. Индукционный эффект при резких и заметных перемещениях пород.
- Повторяемость предвестников. взаимосвязь электромагнитных и сейсмических явлений.
- Дискретность спектра для случаев распространения пульсаций в ионосферном МГД-волноводе.

Благодарю за внимание!

Thank you for your attention!

Назарларыңызға рахмет!