

ФЕНОМЕНЫ РАЗЛОМОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ МОНИТОРИНГА

B.B. Фиделис, Г.Ф. Батраков*

Московский государственный
университет имени М.В Ломоносова
Филиал в г. Севастополе,
г. Севастополь,
ул. Героев Севастополя, 7
E-mail: fidelisv@mail.ru
*Морской гидрофизический
институт НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: batrg@alpha.mhi.iuf.net

Приведён анализ основных особенностей тектонических разломов. Показано, что в месте разлома мониторинг за концентрацией радона-222 в приземной атмосфере и измерения механико-электромагнитных эффектов с помощью скважинных и дистанционных комплексов могут стать основой для разработки системы прогноза сильных землетрясений.

Введение. Тектонические разломы являются одной из особенностей сейсмоактивных регионов. Образующиеся вдоль разломов на больших расстояниях (десятки–сотни км) упругие и неупругие напряжения, достигающие значений единиц и десятков бар, могут способствовать образованию афтершоков. Небольшие “теневые” напряжения как последствия землетрясений с большими магнитудами могут существовать десятилетия. Под воздействием этих напряжений границы разломов испытывают скольжения, величины которых могут достигать нескольких мм в год. Тектонические нагрузки, повышающие скорость скольжения, в сочетании с локальными и региональными напряжениями повышают степень сейсмического риска региона. Напряжения могут накапливаться на разломе в течение продолжительного времени без разрядки в виде сильных землетрясений (ЗТ). Разломная система достигает критического состояния, характеризуемого экстремальной чувствительностью к небольшим возмущениям и сильной корреляцией между

различными ее частями. Небольшие увеличения напряжений являются достаточными для запуска процессов подвижки в верхних слоях коры, и разлом может вступить в стадию разрушения на большом своем протяжении через последовательность ЗТ [1]. Генерируемые на разломе напряжения могут деформировать кору с такими ускорениями, что образующиеся ЗТ будут иметь магнитуду большую, чем для аналогичного сейсмического события без разлома.

Особая сейсмическая опасность разломных структур подтверждается событиями последних десятилетий, в течение которых некоторые районы на Земном шаре были подвержены разрушительным ЗТ [2, 3].

Относительно малые размеры отдельных разломов предполагают, что ЗТ на них могут быть умеренными по размерам и временно сгруппированы, их палеоданные могут отражать спокойный период, то есть не выходящие на поверхность разломы могут скрыто лежать под поверхностью.

Все существующее многообразие тектонических разломов можно свести к двум основным классам – вертикально скользящим изломам,двигающимся вбок по отношению друг к другу и наклонно-реверсивным, где вставной блок над разломом движется вверх под давлением надвигообразующих блоков по направлению, перпендикулярному плоскости взброса. Большие касательные напряжения во взаимодействующих разломных границах, обладающих определенной вязкостью и упругостью, создают запас упругой потенциальной энергии, частично освобождаемой при акте ЗТ, а тектонические подвижки, препятствуя релаксации этих напряжений, поддерживают фоновый запас энергии [4].

В предлагаемой работе мы рассмотрим возможности комплексного подхода – мониторинг за концентрацией радона-222 и измерения механико-электромагнитных эффектов для прогноза землетрясений.

Возможности мониторинга. В процессе подготовки ЗТ в земной коре происходят физико-химические процессы,

изменяющие осредненные свойства определенного объема горных пород и сопровождающиеся появлением неоднородностей, размеры которых определяют энергию будущего ЗТ. Эти неоднородности вызывают возмущения в геофизических полях, воспринимаемых как предвестники.

Механико-электромагнитные эффекты, вовлеченные в процесс подготовки ЗТ в общем случае можно разделить на два типа. Первый связан с прямой генерацией электромагнитных волн при сжатии скал вблизи фокальной точки и раздавливании слоев коры в области подготовки ЗТ. Второй связан с перераспределением или образованием электрических зарядов и флюктуаций их результирующего электрического поля [5]. Среди основных механо-электромагнитных механизмов следует упомянуть увеличение скорости эксхаляции радона-222, пьезо- и трибоэлектрические эффекты, электризацию, генерацию плазменных волн и образование двойного электрического слоя (ДЭС). Соответствующие изменения в проводимости и электронной плотности могут быть обнаружены путем детектирования аномальных изменений в распространении электромагнитных волн в атмосфере.

В течение катастрофического коллапса пород может возбуждаться немаксвелловская плазма. Это может быть причиной появления ионноакустической нестабильности, генерирующей радиочастотную эмиссию. ДЭС возникает на контактных границах между скальными породами с разными свойствами или скалами и электролитами, формирующими в процессе фракционирования пород. В предположении простой гипотезы развития области дилатансии и механизма скольжения с учетом основных токообразующих процессов – электрокинетического, связанного с образованием электрического потенциала при диффузии воды через неоднородно сжатые скальные породы и процесса микрофракционирования, оценка спектральной плотности тока на последней стадии подготовки ЗТ дает величину $10^{-6} \text{ А}\cdot\text{м}^{-2}\text{Гц}^{-1/2}$, максимальное энергопотребление для образования микротоков 10^{-2} Вт и полную энергию, реализуемую

в всплеске излучения электромагнитной энергии длительностью $10^3 - 10^4$ с порядка полной сейсмической энергии толчка [6] (в предположении, что все тектонические подвижки будут реализованы сейсмически).

Спектрально-энергетические параметры выделяемой электромагнитной энергии зависят от петрологического состава пород и от протекающих в очаге поляризационных процессов. Немаловажную роль в этих процессах, в частности, и в тектонике плит, играет вода, влияющая на механические и электрические свойства пород. Изменение механических напряжений на подготовительной стадии развития ЗТ сопровождается изменением напряженности электромагнитного поля, которое достигает максимального значения во время толчка.

Возникающие при изменении нагрузок в структурах разломов электромагнитные сигналы проникают на поверхность Земли, в атмосферу, ионосферу и несут информацию о протекающих в них процессах. Появление анизотропии проводимости в зоне разлома в период подготовки ЗТ вследствие увеличения напряжения в однородной среде может служить физическим базисом мониторинга электромагнитными методами. Периодическое изменение сопротивления горных пород в зоне дилатансии в процессе подготовки ЗТ подтвердило обнаружение суточных периодических вариаций теллурического поля перед ЗТ [7].

Регистрация изменений электрической проводимости может использоваться для краткосрочного прогноза ЗТ. Локальные изменения проводимости могут быть ассоциированы с напряжениями в среде, региональные – с изменением в фокальной области готовящегося ЗТ. Изменение электрического поля в разломе сопровождается проникновением в околосземное пространство электромагнитной энергии, соответствующие вариации параметров ионосферы и магнитосферы могут быть зарегистрированы из космоса.

Двумерно-проводящая структура разлома определяет возникновение на нем двух типов плоской электромагнитной волны (E и H поляризаций или TM -

и TE - волн), обладающей различными свойствами, определяемыми условиями непрерывности на границе раздела.

Свойства компонент тензора импеданса также различны. Так, $Z_{xy} = E_x/H_y$ (E -поляризация) непрерывна на разломе, а $Z_{yx} = E_y/H_x$ (H -поляризация) терпит разрыв. В точках наблюдения, находящихся над глубинным разломом, его присутствие приводит к неравенству $Z_{xy}(0)$ и $Z_{yx}(0)$ [8]. Двум компонентам тензора импеданса соответствуют два типа кажущегося удельного сопротивления $\rho_{yx} = (1/\omega\mu_0)\cdot|Z_{yx}|^2$ и $\rho_{xy} = (1/\omega\mu_0)\cdot|Z_{xy}|^2$. Два типа кажущегося удельного сопротивления широко используются в практике МТЗ для определения его геоэлектрических параметров. Двумерный разрез искажает кривые кажущегося сопротивления относительно псевдоодномерного. Эффектом второго порядка малости может являться искажение этих кривых сейсмоэлектрическими процессами в стадии подготовки ЗТ. Здесь необходимо учитывать, что при подготовке ЗТ в разломах морского типа индуцируемые электрические токи могут шунтироваться морской водой, а магнитные поля искажаться вследствие берегового эффекта.

Интенсивности появляющихся на земной поверхности и ионосфере электромагнитных полей существенно зависят от конфигурации источника, его типа, частоты и поляризации, размеров и глубины залегания. Амплитуды излучений с частотой выше 10 Гц будут подавлены на поверхности Земли вследствие затухания электромагнитных колебаний в проводящей среде.

В ионосферу без учета нелинейных эффектов может проникать только УНЧ излучение, причем только волны, генерируемые азимутальным источником магнитного типа (TE моды), распространение TM радиации ограничено волноводом Земля – ионосфера [6].

Поступающая в плазмосферу УНЧ энергия трансформируется в наклонно-распространяющиеся магнитозвуковые и Альвеновские волны, первые распространяются в верхнюю ионосферу, вторые могут проникать в магнитосферу. В результате нелинейной конверсии Аль-

веновской волны в ионосфере могут возникать сейсмогенные СДВ излучения.

Оценка эффектов СНЧ радиации (30 – 300 Гц) от случайно распределенных дипольных источников вблизи поверхности Земли при подготовке ЗТ континентального и океанического типов показала величины напряженности магнитного поля, соответствующие наблюденным в Ито, центральная Япония, при ЗТ 1995 г. [9]. В центре наблюдений, оказавшемся в пределах 1 – 2 км от морского эпицентра за 4 месяца до ЗТ были зарегистрированы горизонтальные магнитные предвестники амплитудой до $10 \text{ пT}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$.

Форма фокальной области ЗТ существенно влияет на проникающие способности излучения. Это можно пояснить на простом физическом примере. Если поле от точечного дипольного источника затухает обратно пропорционально кубу расстояния, то поле от бесконечной линии диполей или однородного бесконечного цилиндрического дипольного источника затухает обратно пропорционально квадрату длины линии, проведенной от наблюдателя перпендикулярно к источнику.

Вследствие эволюции сейсмо-геофизических событий в литосфере, земной коре и на земной поверхности в ионосфере возникают возмущения, которые могут влиять на условия распространения радиоволн и изменять фазу и амплитуду навигационных сигналов, распространяющихся в волноводе Земля–ионосфера.

В настоящее время имеются экспериментальные подтверждения, что индуцируемые перед ЗТ электромагнитные поля имеют импульсный характер, их амплитуды увеличиваются и достигают максимального значения перед главным толчком [10]. Подобного рода излучения наблюдались на поверхности Земли и со спутников. В последнем случае шум был более интенсивным и “шумовые пояса” достигали размера 3° по широте и 60° по долготе.

Изменения отражающих свойств ионосферы и поверхностного импеданса перед ЗТ приводят к изменению частотных параметров волновода Земля –

ионосфера. Локальные горизонтальные неоднородности ионосферы могут модифицировать фазу низкочастотных радиосигналов. Это может служить основой для дистанционного мониторинга сейсмичности разломов радиочастотными методами.

В СДВ методе наблюдаются амплитуда и фаза передаваемых радионавигационных сигналов, распространяющихся в волноводе Земля-ионосфера. При фиксированном расстоянии между передатчиком и приемником наблюдаемые СДВ-параметры главным образом определяются высотой ионосферного отражающего слоя, который зависит от профиля электронной плотности в слое D [11]. Наблюдения СДВ-сигналов от передатчика "Омега" в Японии, трасса которых проходила вблизи г. Кобе, показало наличие значительных прогностических эффектов, предшествующих ЗТ. Измерение характеристик распространения по методу СДВ-сигнала показало также необычное поведение амплитуды и, особенно, фазы за несколько дней перед главным толчком ЗТ 1995 г. в Хайго-Кен Нанди, Япония [11].

Путем компьютерного моделирования было предположено, что наблюденный эффект может быть объяснен либо увеличением проводимости атмосферы, либо увеличением плотности заряженных частиц, что могло оказаться на уменьшении высоты СДВ-отражающего слоя. Применение метода СДВ-сигнала в шельфовых зонах, аналогичных Крыму, может иметь свои особенности. Над поверхностью раздела морской среды, в воздухе, вертикальная компонента электрического сигнала в этом диапазоне в тысячи раз больше горизонтальной, а в морской среде это соотношение имеет противоположный характер. Поэтому СДВ сигнал в воздухе принимают на вертикальные антенны, а в море – на горизонтальные [12]. В рамочных антенных детектируемый сигнал в воздухе и море будет иметь одинаковую амплитуду. Поэтому одновременный прием СДВ сигнала на горизонтальную антенну на морском шельфе и на вертикальную на берегу, в скважине, может дать более полную картину о предвестниках.

Заключение. Исследование геофизических явлений, связанных с сейсмической активностью в месте разлома с помощью комплекса аппаратуры для мониторинга за концентрацией радона-222 и поверхностных, скважинных и дистанционных электромагнитных измерений могут стать основой для разработки системы прогноза сильных ЗТ. Составляющими системы могут стать измерения поверхностных электрических потенциалов, импульсных вертикальных электрических колебаний, эффектов модуляции и ухода фазы принимаемых низкочастотных радиосигналов, обусловленных изменением условий распространения радиоволн вследствие осциллированных возмущений в слоях ионосферы над зоной подготовки ЗТ [13, 14]. Регулярное глубинное зондирование в контрольных точках разреза по методу МГЗ с оперативным контролем кривых кажущегося удельного сопротивления может дополнять картину сейсмоэлектрической обстановки на разрезе.

Для СДВ сигнала первая зона Френеля для плоской Земли, соединяющей точки на дистанции d имеет максимальную ширину $S=(\eta d)^{1/2}$ [14]. Для трассы Краснодар – Севастополь ($\lambda=30$ км, $d=425$ км) очевидно, что $S=112$ км. Следовательно, лимит чувствительности СДВ сигнала на этой трассе будет $S/2=56$ км [15].

Регистрация электромагнитных предвестников с учетом тенденции к сейсмической разрядке деформирующих напряжений является признаком появления тектонического сигнала, указывающего на вероятность рекуррентного сейсмического события на разломе. Наличие низкочастотных излучений в ионосфере над глубокими литосферными разломами уже подтверждено спутниковыми данными [16].

Время повторения ЗТ на разломе изменяется в широком диапазоне от декад до тысячелетий. Следовательно, отсутствие сравнительно недавних серьезных сейсмических событий на разломе не может не подтверждать и не опровергать его сейсмическую опасность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hubert-Ferary A. et al. Seismic hazard in the Marmara Sea region following the 17 August 1999 Izmit earthquake // Nature. – 2000. – V. 404. – P. 269 – 273.
2. Sato T., Imanishi K., Kosuga M. Three-stage rupture process of the 28 December 1994 Sanriku-Oki earthquake // Geophys. Res. Lett. – 1996. – V. 23, №1. – P. 33 – 36.
3. Shaw J. H. Cracking Los Angeles // Nature. – 1998. – V. 394. – P. 320.
4. Добровольский И.П. Теория подготовки сильного землетрясения // Физика Земли. – 1992. – № 6. – С. 31 – 47.
5. Peddel J.B., Freeman E.M. Electromagnetic anomalies associated with seismic events // Proceedings of International Conference on Marine Electromagnetics, 23 – 26 June 1997. – London. – P. 45 – 46.
6. Molchanov O., Hayakawa M., Rafalsky V. Penetration characteristics of electromagnetic emissions from an underground source into the atmosphere, ionosphere, and magnetosphere // J. Geophys. Res. – 1995. – V. 100, № A2. – P. 1691 – 1712.
7. Myer K., Teisseyer R. Observation and qualitative modeling of some electrotelluric earthquake precursors // Phys. Of the Earth and Planet. Int. – 1989. – V. 57. – P. 45 – 46.
8. Orange A. Magnetotelluric exploration for hydrocarbons // Proceedings of the IEEE. – 1989. – V. 77, № 2. – P. 287 – 313.
9. Tian X., Hata M. Analysis of seismogenic radiation and transmission mechanisms // Journal of Atmospheric Electricity. – 1996. – V. 16, № 3. – P. 227 – 235.
10. Ruzhin Yu., Depueva A. Seismoprecursors in space as plasma and wave anomalies // Journal of Atmospheric Electricity. – 1996. – V. 16, № 3. – P. 271 – 288.
11. Hayakawa M., Molchanov O., Ondoh T., Kawai E. Precursory signature of the Kobe earthquake on VLF subionosphere signal // Journal of Atmospheric Electricity. – 1996. – V. 16, № 3. – P. 247 – 257.
12. Фиделис В.В. Глубоководная связь и некоторые особенности распространения радиоволн // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1996. – № 8. – Р. 59 – 71.
13. Фиделис В.В. О возможности предсказания землетрясений по комплексным электромагнитным предвестникам // Доповіді Національної академії наук України. – 1998. – 11. – Р. 163 – 166.
14. Wait J.R. On the phase changes in Very-Low-Frequency propagation induced by an ionospheric depression of finite extent // J. Geophys. Res. – 1964. – V. 69, No 3. – P. 441 – 445.
15. Fidelis V. On the practicability of VLF ionosphere sounding in the seismo-active regions on the basis of RNS // International Workshop on Seismo-Electromagnetics of NASDA. IWSE2000. September 19 – 22, 2000. – Chofugaoka, Chofu – city, Tokyo. – 2000. – P. 5.
16. Larkina V.I., Sergeeva N.G., Senin B.V. Low-frequency emissions and related phenomena in the ionosphere above the lithosphere deep faults by satellite data // International Workshop on Seismo-Electromagnetics of NASDA. IWSE2000. September 19 – 22, 2000. – Chofugaoka, Chofu-city, Tokyo. – 2000. – P. 4.