

Природа бифокального очага землетрясения и предвестники удара

© В. Н. Николаевский, Л. Е. Собисевич, 2015

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Поступила 28 апреля 2015 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом

На основе принципу витиснення надлишкових об'ємів і використання натурних даних запропоновано біфокальну модель вогнища землетрусу, що включає зони дилатансії і компакції. Перша відповідає визначеному набору передвісників, а друга компенсує зміни об'єму тріщин. Джерела радону оконтурюють зону дилатансії (початок зростання тріщин). Гіпоцентр головного удару знаходиться в перехідній зоні. Існування двох фокусів у вогнищі землетрусу підтверджено експериментально на підставі гравіметричних даних і спостереженнями за рівнем поверхні океану.

Проаналізовано аномальні магнітні збурення у варіаціях магнітного поля Землі, які можна розглядати як короткострокові передвісники. Цей тип збурень нерозривно пов'язаний з тектономагнітними ефектами в літосфері та інших геосферах. Наведено дані експериментальних спостережень магнітних збурень-передвісників, які дають змогу зробити висновок про те, що вони наводяться внутрішніми джерелами, розташованими в нижніх геосферах Землі.

Ключові слова: землетрус, біфокальне вогнище, дилатансія, компакція, флюїди.

Введение. Очаг землетрясения включает эпицентр удара (зона выхода ударных волн на свободную поверхность), гипоцентр (зона излучения сейсмических волн на глубине) и ту часть вмещающих горных массивов, которая реагирует на подготовку и участвует в землетрясении. Основная цель данной работы — проследить за механикой развития деформационных событий в очаге, положив в основу принцип вытеснения избыточных объемов [Николаевский, 2011], появляющихся в процессе предразрушения массива.

В настоящее время эффект дилатансии — приращение объема геоматериала при разрушающем сдвиге — осознан и принят в механике горных пород. Возникающие объемные деформации (за счет раскрывающихся трещин и пор) приводят к вытеснению «лишнего» объема во вмещающую среду. Заметим, что именно дилатансия [Николаевский 1967; Родионов и др., 1971] позволила в свое время количественно согласовать размеры полости подземного ядерного взрыва с излучением упругих волн.

Действительно, сейсмические взрывные волны соответствуют упругой динамике расширяющейся полости заложения заряда. Однако эффективный радиус полости в плотных породах намного больше ее реального размера, а в рыхлых — меньше. Произвол в его выборе

приводил к неопределенности в оценках магнитуды события. «Лишний» объем связан с эффективной сейсмической энергией, которая составляет лишь проценты от полной энергии взрыва. Напомним, что большая часть энергии взрыва идет на преодоление сил трения при смещении разрушенных масс в упругую внешнюю среду [Родионов и др., 1971]. Уплотнение (например, аллювия, лесса) уменьшает излучение сейсмических волн, что и позволяло при гонке вооружений скрывать истинную энергию ядерного взрыва.

Решение проблемы механики очага землетрясения может быть достигнуто методами математической упругопластичности [Николаевский, 1996], которая де-факто включает в себя все развитие очага землетрясения, о котором идет речь. Однако из-за неопределенности в постановке математических условий эта задача крайне сложна.

Активная тектоника. Подвижки в геологической среде квазистатически деформируют массивы земной коры, включая как монотонные изменения напряжений, так и относительно медленные периодические пульсации (так называемые тектонические волны). Так, мониторинг [Swolfs, 1976] тектонических напряжений в Скалистых горах США (давления жидкости во фляге, вставленной в трещину

разлома) показал, что на фоне регионального линейного роста сжатия массива (рис. 1, пунктир) перед землетрясением происходит рыхление массива и только потом — его уплотнение с завершающим ударом.

Обратим внимание, что относительный сдвиг дробящихся бортов разлома также сопровождается его латеральным расширением [Николаевский, 2011], а следовательно, и уплотнением прилегающих массивов, в которых таким образом накапливается упругая энергия сжатия. Очаг землетрясения приобретает бифокальную структуру — разрыхления и уплотнения.

На рис. 1 виден монотонный рост давления в гидравлическом датчике, помещенном внутрь трещины массива, что и отражает внешнее тектоническое нагружение. Однако с 20 мая 1974 г. произошла смена режима на раскрытие трещины (давление в датчике упало), т. е. начала развиваться дилатансия — увеличение объема трещин (пустот) массива. Именно с этим этапом событий в очаге (с его предразрушением) соотносятся среднесрочные предвестники удара. Перед самым ударом давление в датчике превысило уровень, определяемый внешним тектоническим нагружением (так называемый перехлест). Ему, по-видимому, соответствуют краткосрочные предвестники удара.



Рис. 1. Рыхление разлома при общем сжатии. Удар замыкает упругую отдачу (предоставлено Генри Суолфсом [Swolfs, 1976]).

На рис. 2 показаны этапы деформирования образца горной породы при стандартных трехосных испытаниях. Видно, как растяжение сменяется сжатием. Смена знаков деформации заметна и на свободной поверхности перед землетрясением [DalMoro, Zadro, 1999].

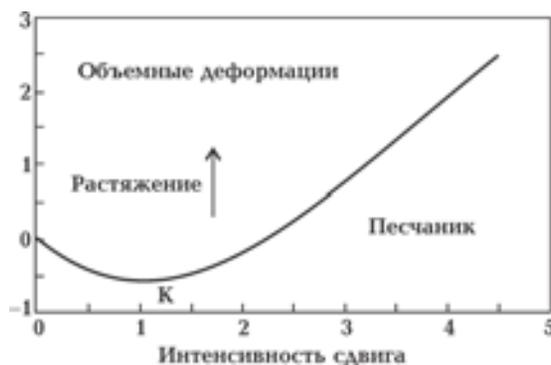


Рис. 2. Упругое уплотнение вмещающего массива сменяется его рыхлением. Количественно зависит от начального состояния (точки 0).

Оценим время подготовки удара. Максимальные землетрясения достигают магнитуды $M > 9$, причем на их подготовку уходит более 30 лет. По данным М. Рейнера о вязком деформировании известковых древнееврейских памятников, искажения форм заметны через тысячу лет. Это означает, что за время подготовки землетрясения (горного удара) вязкость горных массивов не успевает проявиться.

Таким образом, в процессе рассмотрения затронутой проблемы следует использовать модель упругопластичности, в которой время выступает лишь как параметр внешнего нагружения массивов. Тогда фактор внутреннего времени эволюции очага определяется исключительно перетоками подземных вод. И действительно, изменения пространственных масштабов зон очага [Anderson, Whitcomb, 1975] пропорционально $t^{1/2}$ в соответствии с «диффузией» порового давления.

Эффект дилатансии. Если пренебречь упругими составляющими, математически дилатансия — просто пропорциональность приращений объема и сдвига [Николаевский, 1967]. Для скоростей смещения u, v вдоль оси u и поперек разлома это означает:

$$\Lambda \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (1)$$

где Λ — скорость дилатансии (коэффициент дилатансии) [Райс, 1982]. Объем расширения разлома имеет вид

$$V = D \operatorname{tg} \psi u. \quad (2)$$

Здесь D — полная поверхность разлома, и можно оценить вытесненный объем как $V_{inj} = 2hD\psi = 2hD\varepsilon_v$, где $2h$ — толщина разлома, ψ — приобретенная пористость, $\varepsilon_v \approx \psi$ — объемная необратимая деформация (возникшая от-

носительная трещинная пустотность). Угол дилатансии ψ для пористых сред обычно $15\text{--}36^\circ$, причем $\Lambda = \text{tg}\psi$. Приращение ширины разлома $\Delta v = \Lambda \Delta u$ пропорционально его подвижке. Изменения угла трения α и скорости дилатансии Λ согласованы [Николаевский, 1996].

Излучение волн происходит из-за локализации деформирования в материнской полосе сдвига с утратой ее толщины благодаря упругой отдаче (*rebound*) из зоны вытесненного объема (рис. 3).

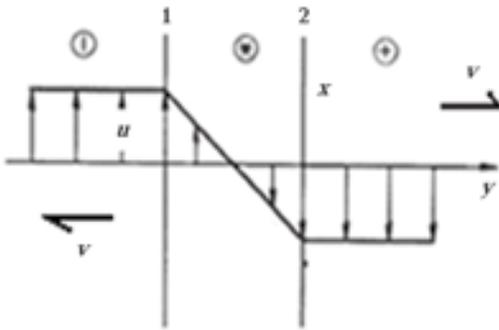


Рис. 3. Пластическое течение со скоростью u дробленого геоматериала между бортами 1 и 2 разлома при его дилатансии.

Вытесненный объем V_{inj} равен наращенному (за счет возникшей пористости ψ) объему V материнской полосы. В момент землетрясения в нем происходит сброс напряжений $\Delta\sigma$, а в зоне дилатансии напряжение увеличивается. Произведенная работа $V_{inj} \Delta\sigma$ совпадает по размерности с так называемым моментом очага M_0 :

$$V_{inj} \Delta\sigma = \psi V \Delta\sigma = \psi 2h_0 D \Delta\sigma = 2h D \Delta\sigma = M_0, \quad (3)$$

который широко используется в расчетах очага землетрясения и определяется как произведение силы $D \Delta\sigma$ на плечо h .

Конечно, в очаге нет ни силы, ни плеча. Термин «момент» мотивирован только его размерностью (ньютон на м). Повороты реперов при землетрясениях обусловлены ротациями блоков коры, согласно механике Коссера [Cosserat, Cosserat, 1909]. Формула (3) дает вторую трактовку «момента» M_0 — как произведенная работа. Можно говорить даже о «натяжении» разлома $\gamma = h \Delta\sigma$. Связь момента M_0 с разгружающимся объемом была известна ранее, но выбор объема не был мотивирован дилатансией. Реальный сброс напряжений оценивается примерно как прочность массива

(половина прочности керна). Это дает для коэффициента сейсмического действия значение порядка $1\text{--}3\%$ [Николаевский, 1983].

Магнитуда — это принятая мера мощности землетрясения, причем достаточно эффективная (см., например, [Добровольский, 2009]), если отвлечься от проблем очага и прогноза. Поскольку магнитуда землетрясения равна энергии сейсмических волн (поверхностных или объемных), измеренных на расстоянии $R=100$ км, то она (как сейсмическая энергия) уже уменьшена практически на все затраты на механическое разрушение горных пород. Потери механической энергии в очаге можно оценить, учитывая де-факто все диссипативные процессы внутри границы $R \leq 100$ км.

Наблюдаемые смещения. Подтверждения принципиальной связи равенства (1) непосредственно видны в полях смещений, которые, как правило, отнюдь не параллельны самому разлому (рис. 4). Их наклон содержит компоненту, ортогональную оси разлома и порождаемую приращением объема при сдвиге, т. е. дилатансией трещиноватости, практически пронизывающей все этажи земной коры [Николаевский, 1979; Милановский, Николаевский, 2009].

Асимптотически дилатансия выводит деформирование с оптимальным внутренним трением, а поэтому зоны уплотнения по латерали не могут разрастаться неограниченно, как это заметил С. М. Капустянский (см. рис. 4). В результате при тектоническом сдвиге во вмещающем массиве появляются полосы локализации сжатия, хорошо известные в геологии [Holcomb et al., 2007]. Конечно, эти полосы мо-

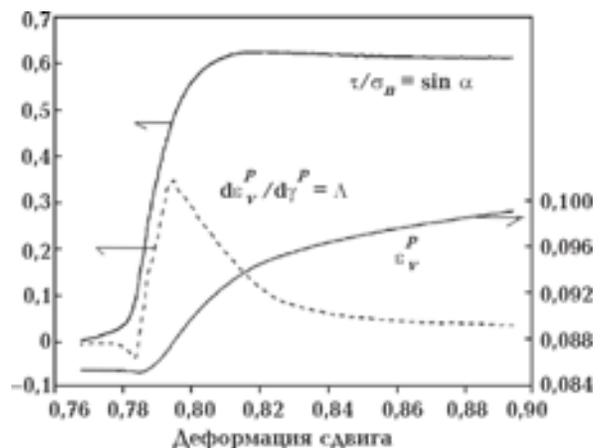


Рис. 4. Экспериментальное подтверждение модели Николаевского [Николаевский, 1967] при сдвиге в образце песчаника [Marone, 1991].

гут проявляться и при тектоническом сдвиге, не связанном с подготовкой землетрясения.

Если из-за разрушения бортов разлома происходит масштабное зацепление, зоны рыхления и уплотнения приводят к известным системам синклиналей и антиклиналей.

На примере простейшей модели земной коры (первоначально однородного изотропно-упругого полупространства) А. С. Алексееву (ВЦ СО РАН) удалось показать «всплывание» к свободной поверхности зон дилатансии. Упрощенные упругопластические расчеты В. Е. Петренко и А. С. Белоносова отождествляют дилатансию с зоной выполнения условия Кулона [Алексеев и др., 2008] (рис. 5).

Параметры упругого полупространства были выбраны следующими: $v_p=6000$ м/с, $v_s = v_p/\sqrt{3}$,

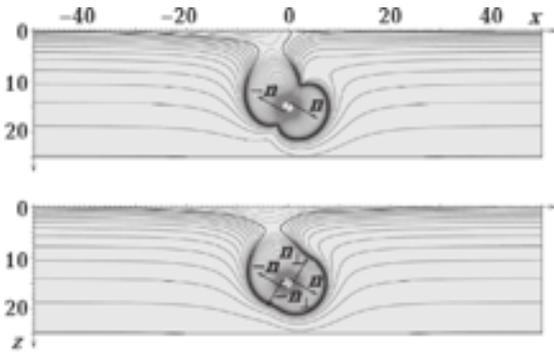


Рис. 5. Изолинии Кулона ($c=\tau-\alpha p$) и зоны дилатансии у поверхности и вблизи источника на глубине $h=15$ км для двух вариантов действия сил [Алексеев и др., 2008].

$$\lambda = \mu = \rho v_s^2 = 3,48 \cdot 10^{10} \text{ Па}, \rho=2900 \text{ кг/м}^3, g=9,8 \text{ м/с}^2, Y=310 \text{ Па}, \alpha=0,5, F=5 \cdot 10^{16} \text{ Н}.$$

Внутри области $D_\tau \geq 0$ касательные напряжения доминируют над сжимающими напряжениями. Интересным фактом оказывается образование двух зон дилатансии: «очаговой» — в окрестности точки приложения силы и «пограничной» — в слое около свободной поверхности. Здесь поле напряжений от источника может содержать сильный вклад касательных напряжений на фоне слабого влияния сжимающих напряжений и гидростатического давления в связи с близостью поверхности, свободной от внешних напряжений.

В зависимости от параметров (глубины и интенсивности источника, ориентации силы в источнике, сцепления среды) «пограничная» зона дилатансии ведет себя довольно изменчиво. В некоторых случаях «пограничная» зона имеет горизонтальную протяженность 200 км и более, а также сложную форму в проекции на поверхность Земли. В зонах дилатансии достигаются аномальные предвестниковые геофизические поля.

Дилатансионное деформирование происходит в очагах на любой глубине, где допустимы изменения объема. Даже в глубинах мантии удары локализованы в тех зонах субдуктируемых тектонических плит, которые находятся в PT -диапазоне хрупкого разрушения. Принятые траектории субдукции показывают, что в эти зоны сместился геоматериал коры субдуктируемой плиты, подверженный горным ударам [Николаевский, 2014].

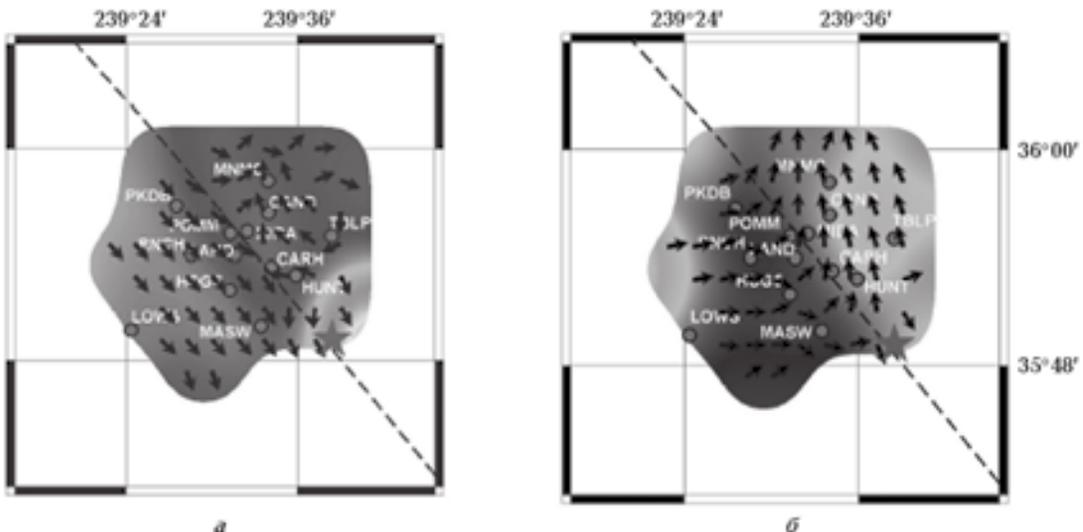


Рис. 6. Смещения по GPS, накопленные за апрель (а) и сентябрь (б) до удара 24.09.2004 [Габсатаров, 2012].

Важно разделять смещения, накопленные за время измерений, на части, относящиеся к подготовке удара (и имеющие прогностический смысл), косейсмические и остаточные. На рис. 6 показано перестроение смещений [Габсатаров, 2012] океанской плиты к моменту удара в Паркфилде (24.09.2004).

А. А. Гусев отмечал, что критерием разуплотнения пород земной коры и верхней мантии служит аномальное затухание коды S -волн [Gusev, 1988]. Очаг землетрясения он изображал в виде купола дилатансионного разуплотнения при сжатии практически всей примыкающей литосферы. Аналогичный прием позволяет выделять кольцевые зоны подготовки землетрясений вплоть до верхов мантии и допускать временный подъем ювенильных вод к границе Мохо перед ударом [Копничев, Солодова, 2010].

Напомним, что по существующим представлениям до границы Мохо сверху проникают метеорные воды [Николаевский, 1979; Милановский, Николаевский, 2009]. Дилатансия может реализоваться и глубже границы Мохо, создавая трещины в сухих породах верхней мантии (не исключено, что вплоть до сейсмической границы N , отмеченной Н. И. Павленковой [Pavlenkova, 2004] в верхней мантии) и стимулируя, в какой-то мере, подъем ювенильных вод и сопутствующих газов, в основном водорода и гелия.

Отсутствие воды в верхах мантии в геологическом масштабе времени приводит к фазовой замене пород более жесткими, мантийными. Здесь смещения свободной поверхности имеют больший смысл для прогноза землетрясений, поскольку приповерхностный горный массив повторяет (как правило, в достаточной степени информативно) деформации, предвещающие землетрясения.

Динамические признаки. На рис. 5 изображен отклик свободной поверхности на дилатансионную подготовку гипоцентра, вычисленный по теории упругости¹ в форме изоклоновых уровней. По этим расчетам условие пластичности (и множественное хрупкое разрушение) достигается, когда константа c станет равной сцеплению. Важно, что возникновение эпицентральной зоны соответствует «подъему» глубинных признаков подготовки землетрясения в интервал технической доступности наблюдений, в частности, радона и

водорода. «Всплывшее» отражение глубинных событий [Алексеев и др., 2008] доступно для нынешних технических средств. Именно это обстоятельство и позволяет фиксировать множество предвестников, которые систематизированы в монографических источниках (диффузия влаги, выходы радона, гидрологические изменения, электромагнитные события и др.).

Глубинные изменения сказываются на скоростях распространения сейсмических волн, обнаруженных впервые на сейсмостанциях в Гарме [Семенов, 1969]. Андерсон и Витком, сопоставляя с Гармом данные землетрясения Сан Фернандо (09.02.1971), эпицентральной зона до 80 км, увидели, что в 1967—1968 гг. изменения разных знаков отношения скоростей распространения продольных и поперечных волн V_P/V_S сменяли (за 2,5 года) друг друга [Anderson, Whitcomb, 1975]. Переменность знаков V_P/V_S по пространству связана с сеткой разломов, определяющей всю серию *объемов взаимного вытеснения* и флюидной насыщенности. При большом интервале измерения среднее значение V_P/V_S будет казаться неизменным, что, кстати, привело к отказу академика М. А. Садовского от дилатансионной теории очага. К отрицательному заключению пришел и Канамори, который не понял, почему при дилатансии массива появляются и локальные зоны компакций [Kanamori, Fuis, 1976].

Среднее значение соотношения V_P/V_S и при подготовке землетрясений, и в статических условиях (волновода — предположительно [Koch, 1992] в гранитах) имеет практически одно значение — приблизительно 1,73. Можно предположить, что и гипоцентры землетрясений также находятся в волноводах — уже разрушенных горизонтах коры, а их «миграция» говорит о росте волновода с продолжением разрушения [Николаевский, 1983].

Радон и краткосрочные предвестники. Принципиально важно, что состояние пережеста на исходном графике Генри Суолфса (см. рис. 1) нашло свое подтверждение в инструментальных наблюдениях [Sebela et al., 2010] в пещерах Динарских гор (Словения). Здесь были зафиксированы расширения и сжатия системы микротрещин, причем как периодические ($T \sim 3$ мес.), так и в предверии землетрясений ($M \sim 3-5$). При $M=3,9$ в течение двух месяцев происходило расширение трещин без изменения уровня радона в пещере, но перед самым ударом в течение семи дней отмечалось сжатие, как и на рис. 1, с выдавливанием новых порций радона.

¹ Правильнее заменять во внутренней зоне уравнения упругости на уравнения пластичности.

Как правило, после основного удара приобретенные деформации трещин исчезают, система возвращается в исходное состояние. Таким образом, основная часть дилатансионных трещин закрывается после землетрясения. Что касается *остаточных* трещин, их типичное распределение приведено во многих работах.

Радоновый сигнал связан как с разрушением массива, так и с переносом в составе флюидных потоков. Рассмотрим сводку [Hauksson, 1981] о высвобождении радона. Радон 222 — радиоактивный газ с периодом полураспада ~3,8 суток — выделяется из кристаллической решетки только на *свежих поверхностях* трещин — на контакте дилатансии и компакти. Поэтому зона радона «отстает» от центра очага на расстояние радиуса зоны дилатансии (рис. 7). Вынос радона реализуется водным потоком или выдавливается в газовой фазе на стадии перехлеста.

Задержка радона во времени обычно поясняется фильтрацией подземных вод. Другими словами, радоновый сигнал свидетельствует также о вступлении воды в вершины трещин со спадом поверхностной энергии согласно разрушению в вершинах трещин по П. Ребиндеру [Траскин, Скворцова, 2006].

Известно, что разрушения впереди разлома по его трассе, приводящие к «прерывистости» разлома, обусловлены удаленными концентрациями напряжений. Отметим численный упругопластический расчет Ю. П. Стефанова зон дилатансии и компакти вблизи активных разломов [Стефанов, 2010].

Поскольку земная кора нарушена разломами, возникшая за счет избыточного объема цепь тектонического деформирования «уплотнение—разуплотнение» (о чем можно судить по росту и спаду порового давления [Manga, Wang, 2007]) простирается далеко за границы

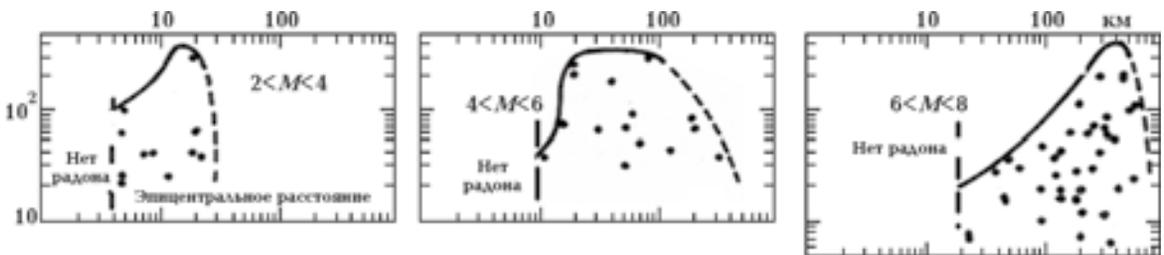


Рис. 7. Приведенная амплитуда радонового сигнала не зависит от магнитуды удара. Радон появляется у внешней границы зоны дилатансии (перестроение данных [Hauksson, 1981]).

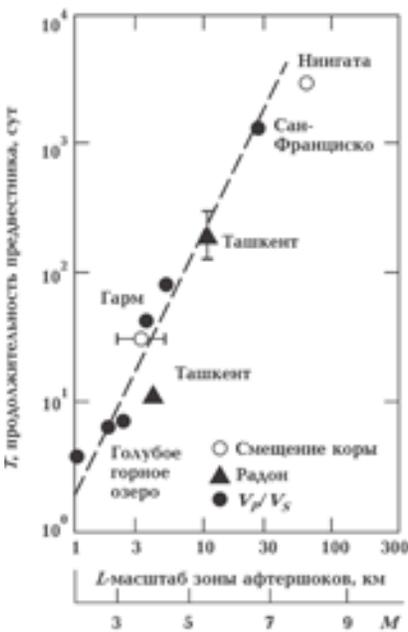


Рис. 8. Стандартная сводка предвестников землетрясений по К. Шольцу со шкалами времени и расстояний (см., например, [Rice, 1979; Райс, 1982]). Здесь показан этап краткосрочного сжатия (перехлеста).

исходного очага. Вытеснение объема при подготовке основного удара генерирует дилатансионные зоны на ближних разломах, которые, по данным для разлома Сан Андреас [Rundle et al., 2006], либо приходят в косейсмическое движение, либо подготавливают афтершоки.

Продолжительность эволюции очага при выборе зоны афтершоков как линейного масштаба удовлетворительно соответствует законам диффузии ($L \sim T^{1/2}$). Это подчеркивает единственность фильтрации воды как временного фактора внутреннего развития очага (рис. 8).

Принципиальная для данной работы идея о разделении очага на зоны дилатансии и компакций/накопления упругой энергии за счет вытеснения избыточного материала (с последующей упругой отдачей) и объясняет цепочку афтершоков.

Динамика зон дилатансии и компакций.

Итак, мы пришли к бифокальной схеме очага землетрясения. Сразу же обратим внимание на их асимметрию. Напомним, если хотя бы одна из компонент напряжений растягивающая, что происходит при смене знака тектонического нагружения, предел прочности по Кулону снижается [Schock, 1982], и это интенсифицирует разрушение. Статическое равновесие по Кулону нарушается, рост трещин ускоряется (как и разгрузка зон сжатия), обостряя несогласованность глобального деформационного равновесия зон. По-видимому, квазистатическое деформирование зон компакций и дилатансии становится далее невозможным.

Зоны растяжения и сжатия прекрасно различаются по гидрогеологическим признакам.

При сжатии уровень (напор) в скважинах возрастает, при растяжении — убывает. После разгрузки (в том числе главного удара) в скважинах виден соответственно сброс уровня воды или подъем [Manga, Wang, 2007]. Заметим, что если зоны разгружаются/нагружаются одновременно, то очаг тектонического события действительно может быть представлен двойной парой сил. В работе [Rudnicki, 1988] — в изложении Джеймса Райса [Райс, 1982] — рассматривался неустойчивый сдвиг δ в дилатирующем включении внутри неограниченного упругого массива. На рис. 9, а приведены прямые Эшелби [Rice, 1979], связывающие диаграмму деформирования включения $\tau = \tau(\delta)$ с упругим состоянием на бесконечности и при точке неустойчивости ($A \rightarrow B'$) на крутом откосе. На рис. 9, б приведен вариант пересечения кривых состояний, соответствующих возмущениям от двух источников [Марон, 2012]. Марон изучал гидравлические удары (вертикальные шаги на рис. 9, б; Q — расход) в системе трубопроводов и в вулканах. Каждый удар приближает систему либо к неустойчивому состоянию А — с глобальным разрушением (пример — авария на Саяно-Шушенской ГЭС), либо к устойчивому состоянию В — новому стационарному распределению потоков (что было невозможно из-за отсутствия/невозможности отключения компенсаторов).

В очаге землетрясения шаги — это форшоки из-за перераспределения напряжений в бифокальной системе дилатансии и компакций. Форшок порождается появлением новой трещины разрушения. Примечательно, что фор-

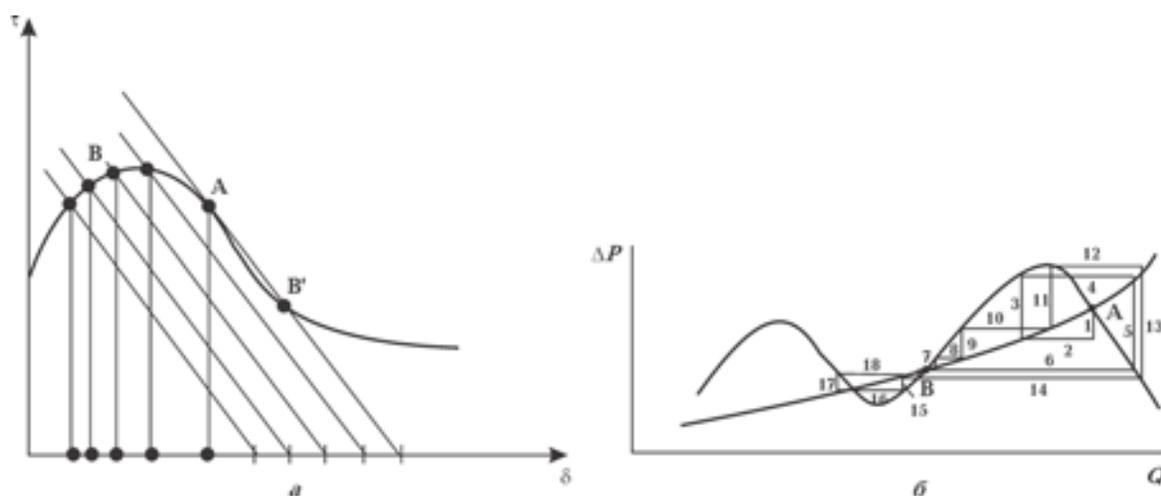


Рис. 9. Устойчивые (В, В') и неустойчивые (А) равновесия для одного включения (а) и двух (б). АВ' — разрушение с выпуском ударной волны.

шоки наблюдаются на заключительной стадии (перехлесте), когда происходит дополнительный рост напряжений сдвига.

Обычно при $M=5$ гипоцентры форшока и главного удара отстоят друг от друга на 10 км; при $M=6$ — на 40 км; при $M=7$ — на 100 км, что дает оценку линейных масштабов подземного разрушения при землетрясении.

Электрические предвестники (см. рис. 8) сопутствуют перетокам природных соленых вод (как слабых электролитов). Действительно, дилатансионные приращения объемов в разломе снижают поровое давление вплоть до вакуума, как это видно на примере датчика на рис. 1. В этой связи интересны измерения, проведенные в зоне Мацуширо (Япония), которые когда-то привели к начальной дилатансионно-диффузной модели очага землетрясения [Nur, 1974]. В настоящее время глубинная проницаемость оценена [Ohtake, 1974] в 0,01—0,1 Дарси (1 Дарси = 10^{-8} см²), причем скорость заполнения очага водой составляла от 4 до 10 дней, что сравнимо с этапом перехлеста.

Отмечалась вовлеченность газов в миграцию вод. Поступление вод в систему свежераскрытых трещин облегчает их дальнейшее спонтанное расширение, согласно эффекту Ребиндера, а полученная оценка времени объясняет временной разрыв (несколько дней) между срочными предвестниками и собственным ударом.

Краткосрочные события. На первом этапе упругой разгрузки смена квазистатического деформирования на относительно быстрое неравновесное обжатие системы дилатансионных трещин хорошо видна как «перехлест» напряжения на рис. 1. Такое дополнительное обжатие приводит к превращению полос сдвига в ромбическую систему трещин, судя по [Crampin, Gao, 2010]. Причем скорости P -волн сохраняются, тогда как S -волн — спадают. Тем самым аномалия соотношения скоростей утрачивается [Соболев, Пономарев, 2003].

Дополнительное обжатие объясняет выдавливание радона и других флюидов из трещин и появление высоких перепадов порового давления, которые необходимы, по оценкам [Fenoglio et al., 1995], для генерирования магнитного возмущения в вариациях магнитного поля Земли [Собисевич и др., 2012]. Эти процессы отмечались, начиная с землетрясения в Лома-Приете [Fraser-Smith et al., 1990], за несколько часов до сильных ударов ($M > 6$), по-видимому, за счет конвективного тока в системе кластеров дилатансионных трещин.

Расположение точки излучения сейсмического удара вне блока излучения магнитного сигнала [Dudkin et al., 2011] вновь указывает на то, что зоны уплотнения и дилатансии разделены десятками километров.

Магнитный сигнал излучателя эллиптической формы, заполненного соленой водой, был рассчитан в работе [Merzer, Klempereger, 1997]. Он может излучать магнитное поле ультранизких частот (УНЧ) за счет пульсаций теллурических токов. Эгберт предложил дополнительно пульсации проводимости [Egbert, 2002]. Согласно работе [Merzer, Klempereger, 1997], в законе электропроводности $\sigma = \sigma_0 \psi^n$ для горного массива степенной показатель должен быть $n=1$ (как в трещинах, а не в изолированных порах, где $n=2$).

При значении $\sigma_0 = 75$ См/м, типичном для соленой воды (brines), электропроводность массива достигнет уровня $\sigma = 5$ См/м, что существенно превосходит обычные [Николаевский, 2014] для литосферы значения — не более 1 См/м.

Принятые размеры излучателя (90 км длины при осях эллипса 18 и 4,5 км) соответствуют геодезическим данным [Arnadottir, Segall, 1994] и достаточны для появления заметного магнитного возмущения. В то же время размеры настолько грандиозны, что кажутся нереальными.

Однако именно дилатансионные процессы (вдоль 100-километрового разлома с развивающимися зонами дилатансии и компакций) создают в гипоцентре очага антенну, обеспечивающую появление возмущений в вариациях магнитного поля Земли. Впрочем, и сама эпицентральная зона разрушения может претендовать на роль излучателя. Напомним, что предвестниковые сейсмические шумы охватывают даже большие по масштабу зоны. Кластеризация системы токов при одновременных наращиваниях и преобразованиях трещин обеспечивает форму магнитного сигнала, замеренного при землетрясении в Лома-Приета и при других сейсмических событиях.

Глобальность магнитного возмущения, охватывающего все геосферы, включая и ионосферу Земли, подтверждена экспериментально [Собисевич, 2011, 2013; Собисевич и др., 2012]. Регистрируемые квазипериодические возмущения в вариациях магнитного поля Земли, полученные на базе Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН и наблюдательных пунктах ИЗМИРАН перед цунамигенными и другими событиями, весьма показательны. Они подтверждают, что наблю-

даемые волновые формы аномальных магнитных возмущений имеют характерные отличия, которые отражают условия трансформации индивидуальных геологических образований в очаговых зонах [Собисевич и др., 2012, 2014].

Анализ аномальных магнитных возмуще-

ний начнем с данных по цунамигенному Суматра-Андаманскому землетрясению. Эпицентр сейсмического события располагался на фланге Зондской сейсмической области, огибающей с запада о-в Суматра, Никобарские и Андаманские острова. Этот участок Зондской

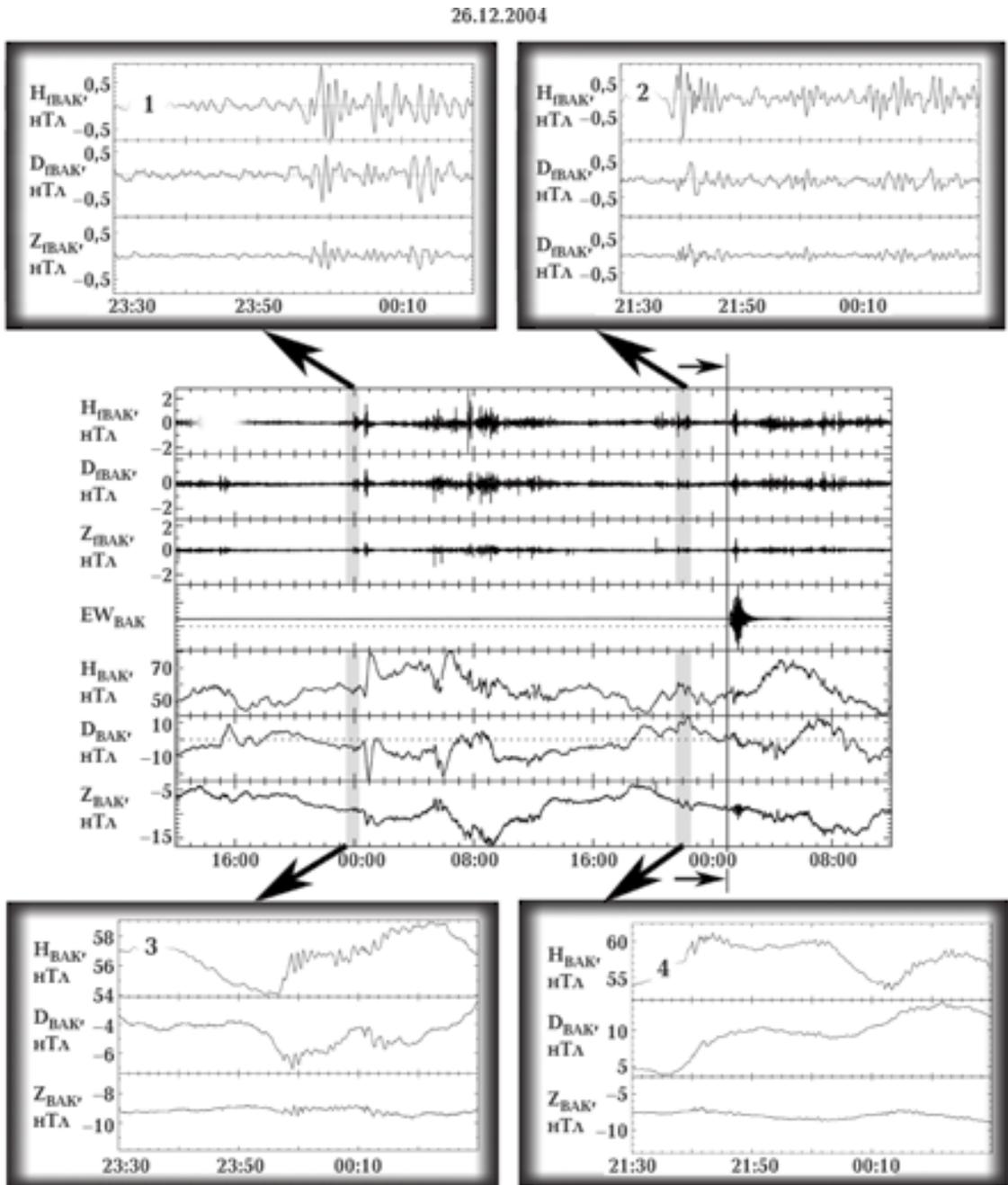


Рис. 10. Запись вариаций магнитного поля и наклонов земной поверхности на этапах подготовки и развития землетрясения в районе Суматры 26 декабря 2004 г. Лаборатория № 1 Северокавказской геофизической обсерватории. Врезки 1, 3 — характерные волновые формы аномальных УНЧ квазигармонических магнитных возмущений, которые наблюдались на этапах подготовки и развития землетрясения, врезки 2, 4 — волновые формы аномальных УНЧ магнитных возмущений, проявившихся за час до землетрясения. EW_{BAK} — показания наклономера (восток-запад), H_{BAK} , D_{BAK} , Z_{BAK} — вариации магнитного поля Земли, H_{fBAK} , D_{fBAK} , Z_{fBAK} — вариации магнитного поля Земли, профильтрованные в диапазоне 18—300 с.

дуги геотектоники определяют как область косой субдукции. Здесь Индо-Австралийская плита движется на север, а Бирманская — вдоль Андамано-Никобарского и Центрально-Суматранского правосдвиговых разломов на юго—юго-восток. Образованная структура, по нашему мнению, является определяющей с точки зрения генерации аномальных УНЧ геомагнитных возмущений.

Механизм очага, по данным сейсмического центра Гарвардского университета, оказался достаточно типичным для данного участка субдукционной зоны. Моделирование этого сейсмического события, выполненное учены-

ми ИФЗ РАН под руководством д-ра физ.-мат. наук Ю. Л. Ребецкого, показывает, что в качестве разрыва здесь реализована субполюгая нодальная плоскость. По мере продвижения вдоль западного фланга Зондской субдукционной зоны с юга на север здесь удается наблюдать последовательную смену режимов напряженного состояния от субдукционного (горизонтальное сжатие) до горизонтального растяжения. Области высоких и низких напряжений, являющихся одним из определяющих факторов проявления сложных геолого-геоэлектрических процессов и сопутствующих магнитных возмущений, расположены близко.

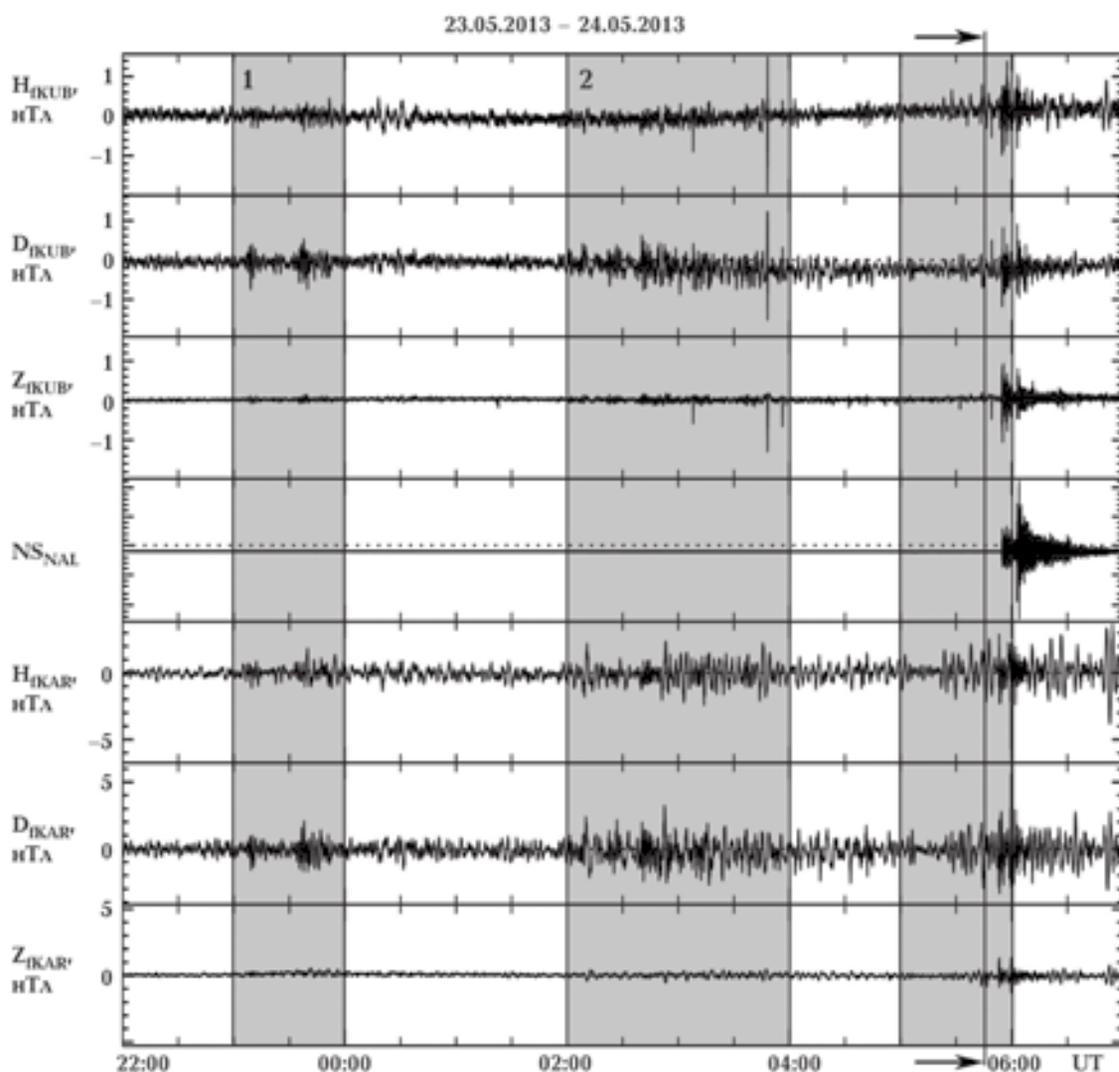


Рис. 11. Волновые формы аномальных магнитных возмущений в вариациях магнитного поля Земли (H, D, Z) и запись наклонов земной поверхности (NS) в районе Камчатки по данным Северокавказской геофизической обсерватории (лаборатория № 4) и научного стационара «Карпогоры». Сигналы профильтрованы в диапазоне периодов 10—300 с. Стрелками и вертикальной линией отмечено время в очаге [Собисевич и др., 2014].

Энергия этих движений — движущий фактор основных сильных событий в сейсмоактивных объемах земной коры, вызывает масштабную электризацию флюидонасыщенных разломно-блоковых структур и образований дилатансного типа в океаническом дне в зонах подготовки и развития цунамигенных землетрясений.

Магнитограммы, отражающие все этапы развития Суматра-Андаманского землетрясения, приведены на рис. 10. Время здесь и по тексту мировое.

В качестве другого характерного примера на рис. 11 приведена развернутая структура предвестниковых магнитных сигналов, зафиксированных в период подготовки и развития Охотоморского землетрясения, которое произошло в районе Камчатки 24 мая 2013 г. на глубине более 600 км. Магнитуда этого уникального, самого сильного глубокофокусного сейсмического события в истории инструментальных наблюдений составила по разным оценкам порядка 7,7—8,1. В течение четырех последующих суток Геофизической службой РАН были зарегистрированы семь афтершоков с магнитудами от 4,2 до 4,7. Сильнейший по силе афтершок с магнитудой 7 был зафиксирован в этом районе через 9 часов после основного толчка. Все события предварялись магнитными возмущениями.

Так, за 3 часа до главного удара были аппаратно выделены отчетливые магнитные УНЧ возмущения ультранизких частот, волновые

формы которых приближаются к квазигармоническим (рис. 12, а).

Анализируя полученные экспериментальные данные, отметим, что развитие характерных аномальных магнитных возмущений УНЧ диапазона началось за пять с половиной часов до главного удара. На приведенных записях (рис. 11, 12) вариаций магнитного поля Земли и наклонов земной поверхности представлены волновые формы зафиксированных возмущений, начиная с 22 часов (время мировое). Наиболее отчетливо аномальные возмущения в вариациях магнитного поля Земли проявились примерно за 5 ч 30 мин до главного удара (серая область 1 на рис. 11). Затем последовали следующие характерные участки, в том числе и область 2.

Приведенные данные отражают условия развития в магнитном поле Земли сложных электродинамических процессов, зарождающихся в зоне подготовки глубокофокусного сейсмического события, и окончательно формирующегося аномального магнитного возмущения-предвестника в системе литосфера—атмосфера—ионосфера—магнитосфера.

Отметим, что достаточно спокойная магнитная обстановка в этот временной период предоставила возможность отчетливо выделить изучаемый класс наведенных аномальных УНЧ магнитных возмущений в вариациях магнитного поля Земли на всех этапах подготовки и развития глубокофокусного землетрясения.

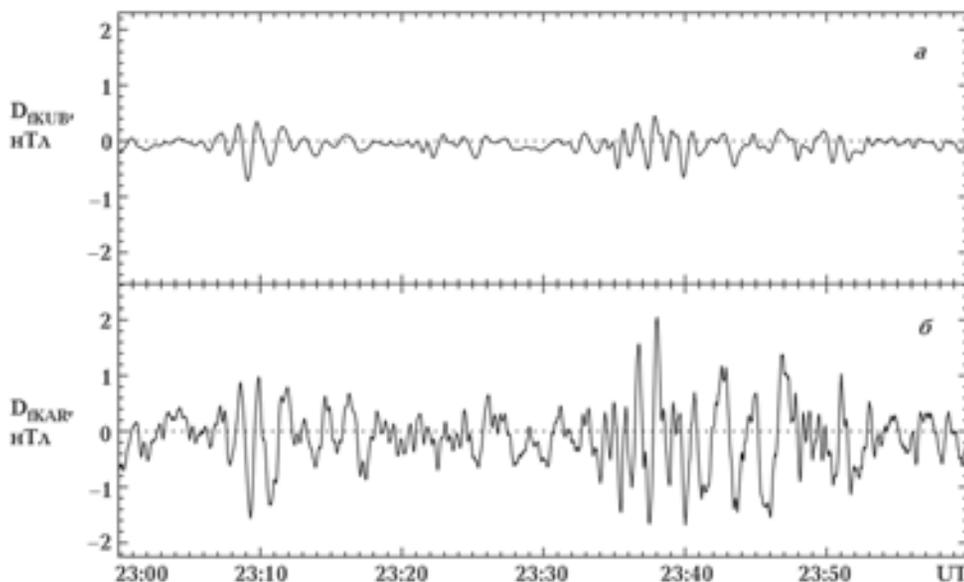


Рис. 12. Развернутая структура характерных волновых форм в вариациях магнитного поля Земли по данным Северокавказской геофизической обсерватории (а) и научного стационара «Карпогоры» (б), субавроральная зона.

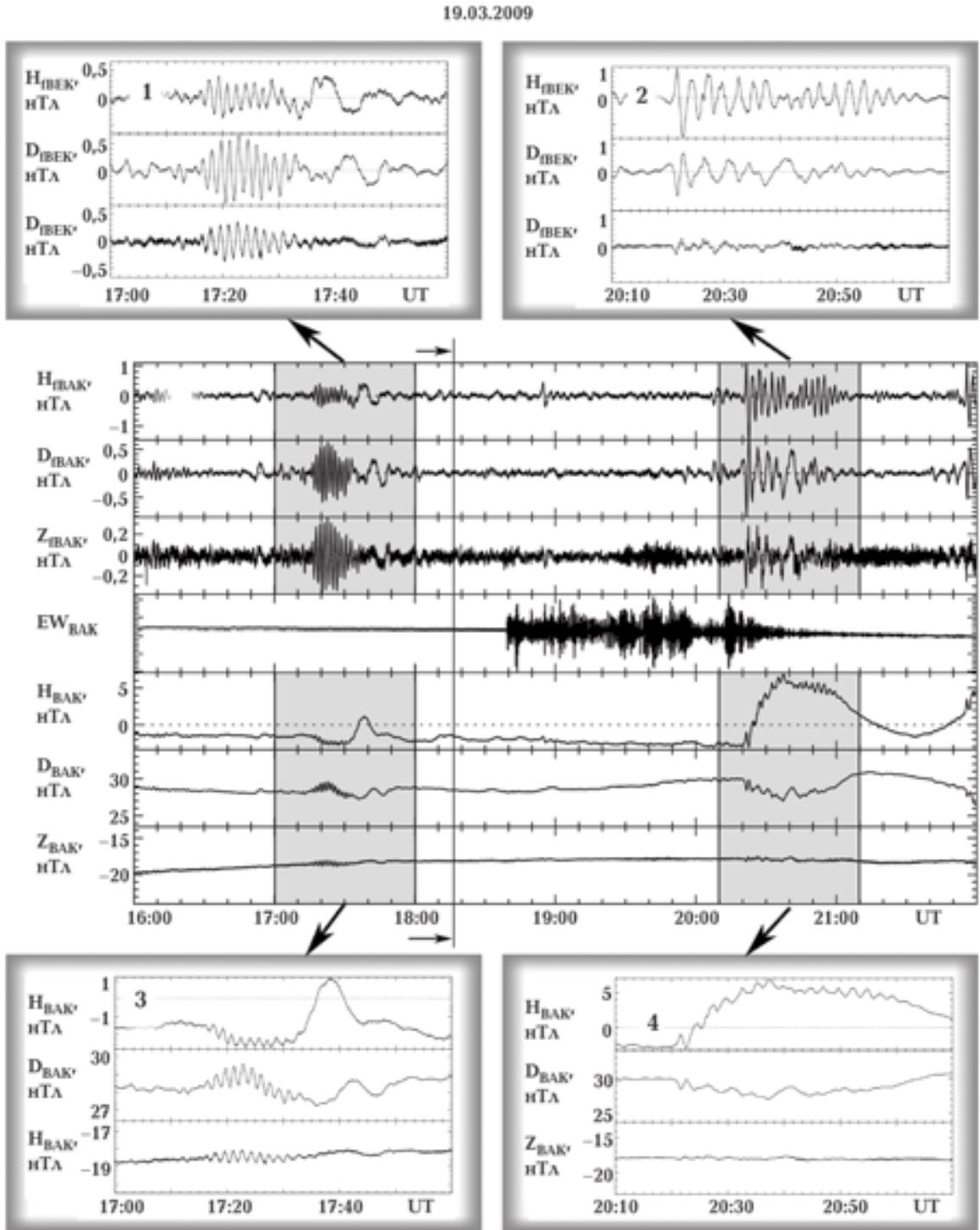


Рис. 13. УНЧ возмущения на этапе подготовки и развития цунамигенного землетрясения в районе о-вов Тонга 19.03.2009 г., зарегистрированные магнитными вариометрами (H, D, Z) и наклономерами (E-W) в лаборатории № 2 Северокавказской геофизической обсерватории. На врезках показана тонкая структура зарегистрированных волновых форм магнитных вариаций до (врезки 1 и 2) и после (врезки 3 и 4) фильтрации в диапазоне периодов 20—300 с. Стрелками и вертикальной линией отмечено время в очаге.

Это вселяет уверенность, что данные аппаратного мониторинга аномальных магнитных

возмущений, наведенных в глубинных структурах дна Охотского моря и фиксируемых совре-

менными аппаратными комплексами в масштабах всей Земли, являются качественными.

Итак, полученные экспериментально формы наведенного широкофокусным землетрясением в районе Камчатки аномального УНЧ волнового процесса в геосферах (серые области 1 и 2 на рис. 11), отражают структуру аномальных магнитных возмущений. Отчетливые сигналы зафиксированы по каналам Н и D. По каналу Z магнитное возмущение слабое.

Согласно развиваемым представлениям, подобные проявления в структуре магнитных возмущений обусловлены особенностями динамических взаимодействий на этапе зарождения и развития зон дилатансии и компакции, формирующих глубинный сейсмический очаг.

Заметим, что подобного рода аномальные возмущения возникают спонтанно и перед многими другими сильными сейсмическими событиями.

Полученные данные натуральных наблюдений магнитных возмущений-предвестников показывают, что их детальное изучение позволяет уточнить условия в зоне подготовки землетрясений в сложнопостроенных структурах морского дна.

Чтобы убедиться в этом, рассмотрим структуру геомагнитного возмущения, зафиксирован-

ного приборами Северокавказской геофизической обсерватории на этапе подготовки и развития сейсмического события 19 марта 2009 г. в районе о-вов Тонга (рис. 13). Здесь краткосрочный магнитный предвестник отличается характерным квазигармоническим сигналом, что свидетельствует о наличии в развивающейся очаговой зоне землетрясения флюидонасыщенных дилатантных образований с выраженными резонансными особенностями.

Анализируя запись наклономера ($E-W_{\text{ВАК}}$), отметим, что само событие продолжалось более полутора часов. По мере затухания сейсмических процессов в очаге частота аномальных магнитных возмущений стала понижаться.

Сопоставляя полученные экспериментальные результаты с данными о геологическом строении дна в районе землетрясения, можно отметить, что здесь имеют место мощные деформационные процессы, трансформирующие дилатантные образования, активизация которых неразрывно связана с флюидодинамическими особенностями и дегазацией земных недр [Собисевич, 2013].

Аналогичные возмущения-предвестники характерны и для мелкофокусных землетрясений, которые происходят на суше. Примером может служить событие в Турции 03.08.2010,

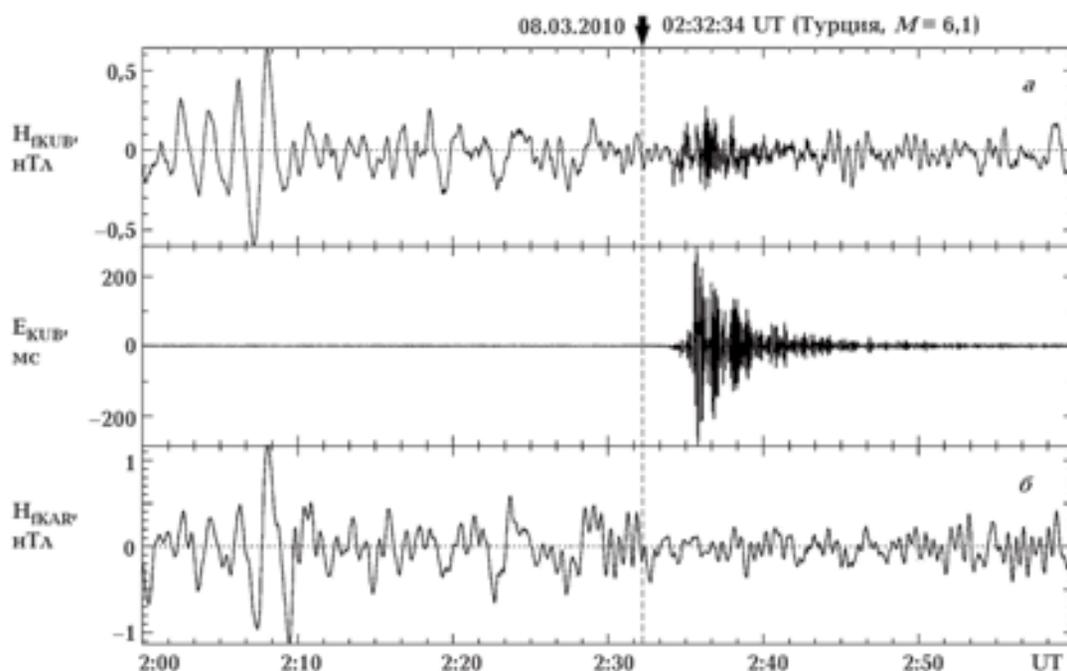


Рис. 14. Структура квазипериодических возмущений в вариациях Н-компоненты и наклонов земной поверхности (E , восток-запад) в лаборатории № 4 Северокавказской геофизической обсерватории (а), а также вариации магнитного поля по данным стационара «Карпогоры» в период подготовки и развития землетрясения в Турции 03.08.2010 г. (б). Данные профильтрованы в диапазоне периодов 20—300 с. Стрелками и вертикальной линией отмечено время в очаге.

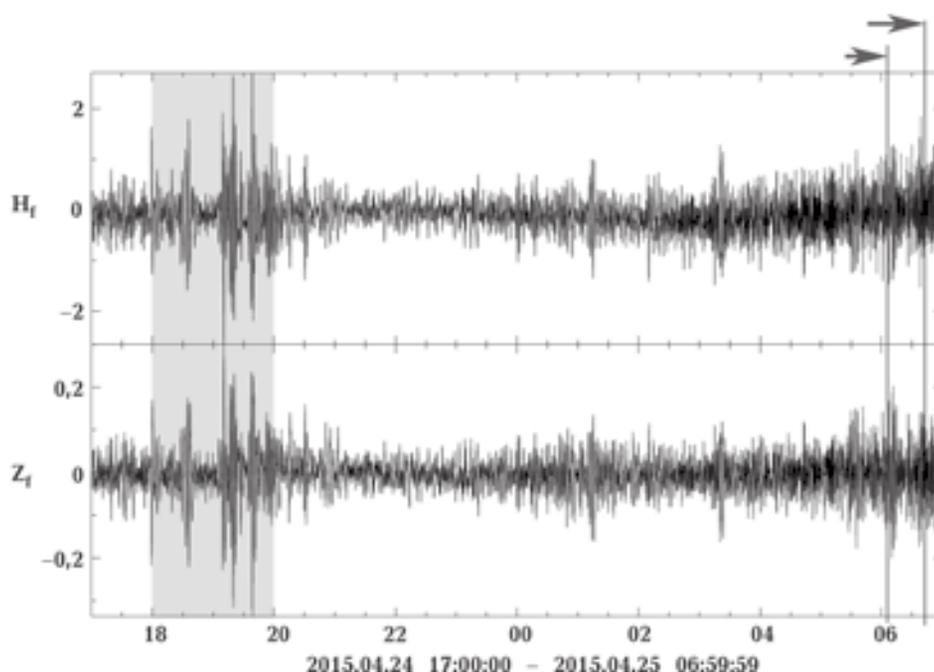


Рис. 15. УНЧ магнитные возмущения, наблюдаемые на этапе подготовки и развития землетрясения в Непале 25.04.2015 г. Сигналы зарегистрированы магнитными вариометрами (каналы Н и Z) в авроральной зоне (Архангельская область, с. Карпогоры). Стрелками и вертикальной линией отмечено время в очаге для первого события и последовавшего афтершока. Данные магнитных вариометров профильтрованы в диапазоне периодов 20—300 с.

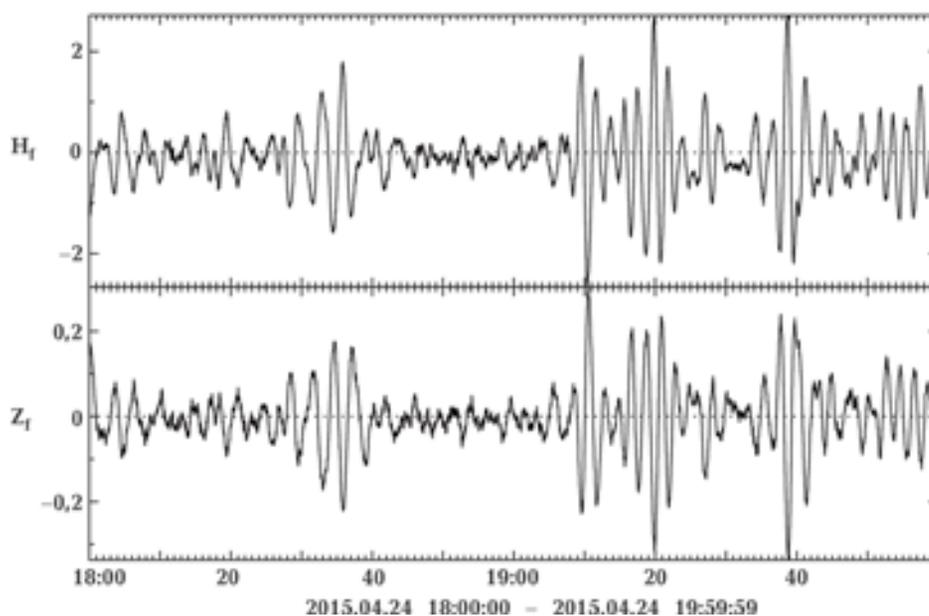


Рис. 16. Развернутая структура характерных возмущений-предвестников в вариациях магнитного поля Земли (Н и Z-компоненты) по данным научного стационара «Карпогоры» в период подготовки и развития землетрясения в Непале 25.04.2015 г. Данные магнитных вариометров профильтрованы в диапазоне периодов 20—300 с.

магнитный сигнал которого был четко зафиксирован аппаратными комплексами Северокавказской геофизической обсерватории, включая и пункт наблюдений в субавроральной зоне (Архангельская область, Карпогоры). Возмущение начало проявляться в записанных

волновых формах вариаций магнитного поля Земли за два с половиной часа до первого удара (рис. 14). Амплитуда сигнала на Северном Кавказе составила 1,4 нТл, а в субавроральной зоне она выросла до 2,0 нТл.

В заключение остановимся на мелкофо-

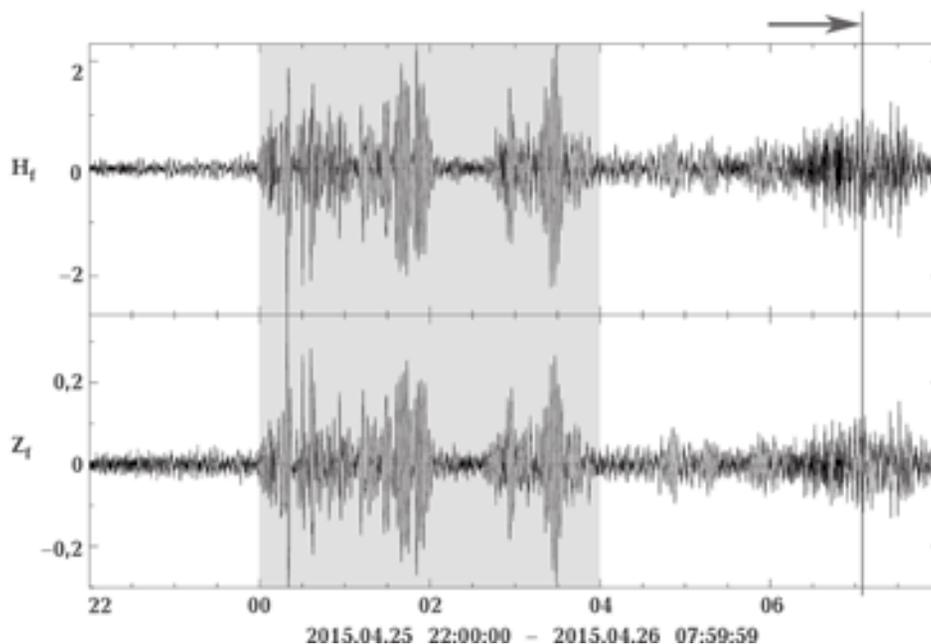


Рис. 17. Характерные УНЧ магнитные возмущения (выделено серым), наблюдаемые на этапе подготовки и развития землетрясения в Непале 26.04.2015 г. Сигналы зарегистрированы магнитными вариометрами (каналы Н и Z) в авроральной зоне (Архангельская область, с. Карпогоры). Стрелкой и вертикальной линией отмечено время в очаге для первого события и последовавшего афтершока. Данные магнитных вариометров профильтрованы в диапазоне периодов 20—300 с.

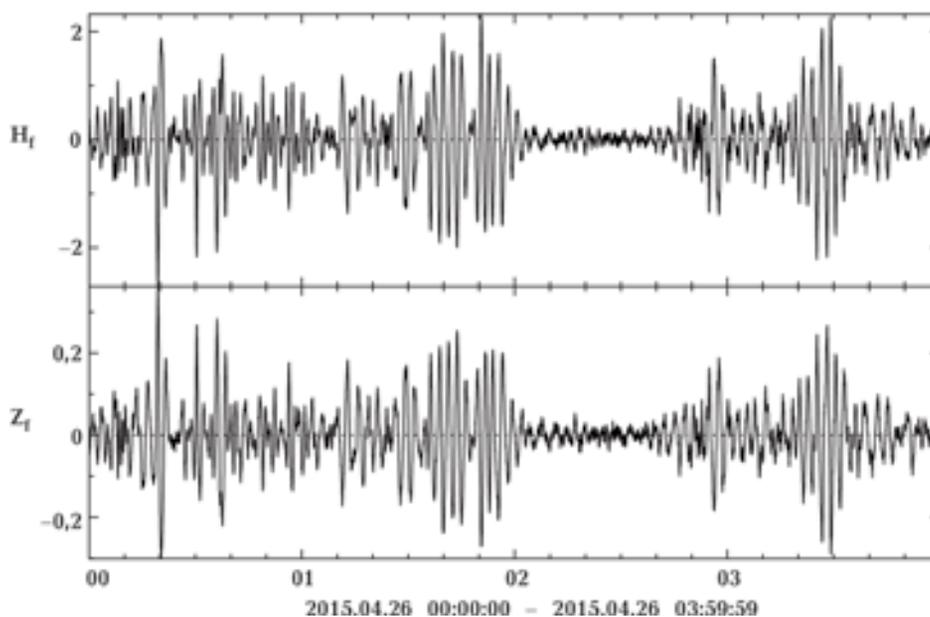


Рис. 18. Развернутая структура характерных возмущений-предвестников в вариациях магнитного поля Земли (Н- и Z-компоненты) по данным научного стационара «Карпогоры» в период подготовки и развития землетрясения в Непале 26.04.2015 г. Данные магнитных вариометров профильтрованы в диапазоне периодов 20—300 с.

кусных землетрясениях, которые произошли в Непале, начиная с 25 апреля 2015 г. Первое землетрясение (25 апреля 2015 г.), магнитодиграмма которого приведена на рис. 15, оказалась сильнейшим в этом регионе. Магнитуда сейсмического события по разным оценкам

составила 7,5—7,9. Удар стихии был зафиксированы в 11 ч 24 мин по местному времени (07:05:17 по мировому), широта 27,82°, долгота 86,21°, глубина 15 км. За ним последовал афтершок ($M=6,8$). Эпицентр землетрясения располагался в 82 км к северо-западу от сто-

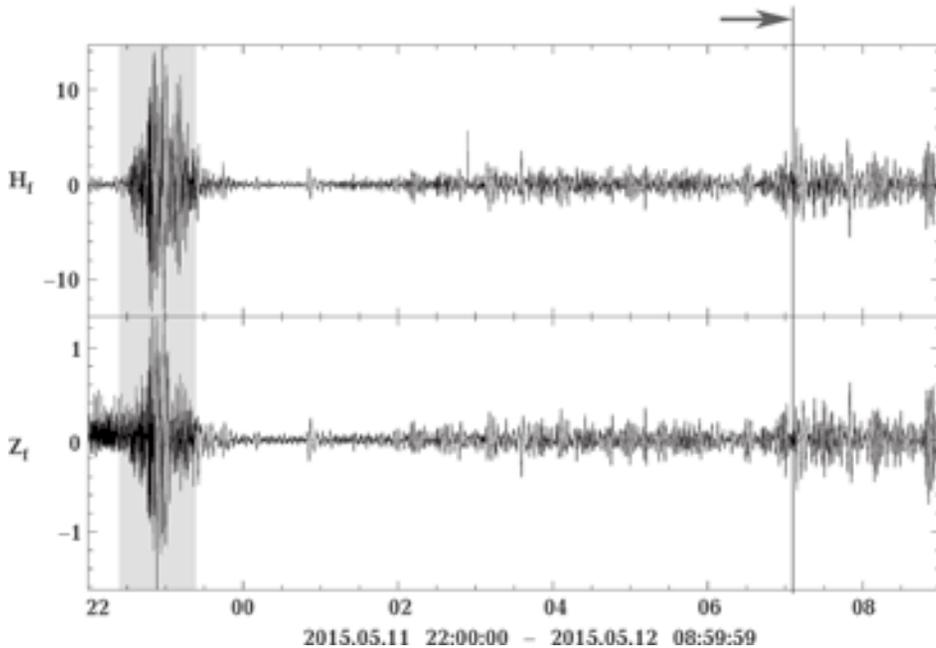


Рис. 19. Характерные УНЧ магнитные возмущения (выделено серым), наблюдаемые перед землетрясением в Непале 05.12.2015 г. Сигналы зарегистрированы магнитными вариометрами (каналы Н и Z) в авроральной зоне (Архангельская область, с. Карпогоры). Стрелкой и вертикальной линией отмечено время в очаге для первого события и последовавшего афтершока. Данные магнитных вариометров профильтрованы в диапазоне периодов 20–300 с.

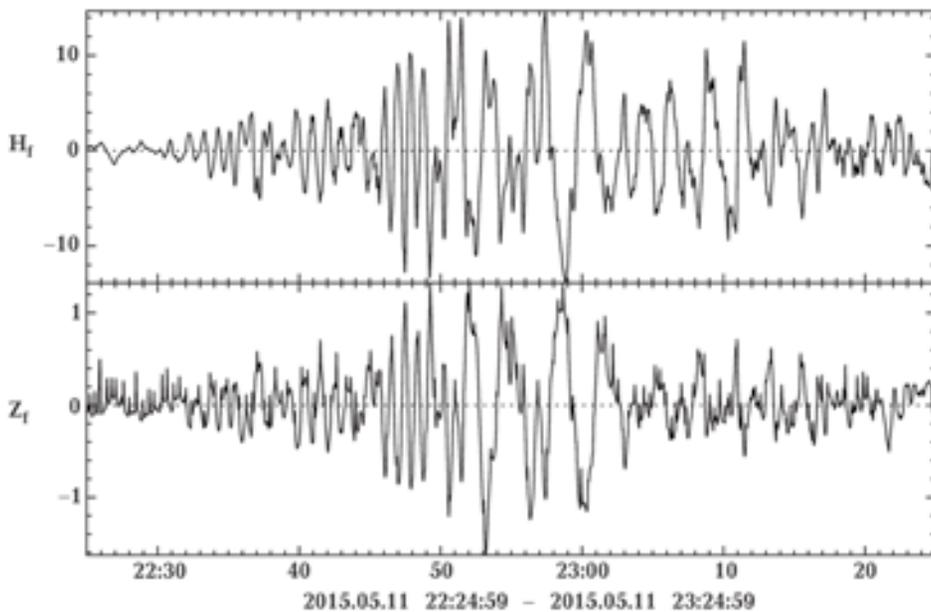


Рис. 20. Развернутая структура характерных магнитных возмущений-предвестников в вариациях магнитного поля Земли по двум компонентам (Н- и Z-компоненты). Данные научного стационара «Карпогоры», субавроральная зона.

лицы Катманду на глубине 15 км. Напомним, что сейсмическая катастрофа произошла здесь через 81 год после приблизительно равного по мощности стихийного бедствия, которое потрясло регион в 1934 г.

Анализируя результаты натурных наблю-

дений, следует обратить внимание на некоторые характерные особенности, проявившиеся в процессе развития сейсмического процесса перед главным ударом (рис. 16). Если обратиться к данным, приведенным на рис. 19, то можно заметить, что магнитное возмущение-

предвестник длительностью около двух часов, величина которого составила 3,8 нТл, проявилась за 10 час перед главным ударом.

Наблюдения сейсмических событий в других регионах Земли указывают, что чаще магнитные возмущения-предвестники появляются за 2—4 часа. В то же время, непосредственно перед сейсмическим ударом, магнитный фон в регионе начал монотонно возрастать.

Перед сильным афтершоком, последовавшим за первым ударом ранним утром 26.04.2015 г., магнитное возмущение-предвестник начало фиксироваться за 7 часов (с 00 часов и продолжалось до 04 часов по мировому времени), при этом амплитуда магнитного возмущения-предвестника по каналу H_f достигла 4 нТл (рис. 17). Последующие магнитные возмущения-предвестники не превышали по величине значение 1,5 нТл (рис. 18).

Следующее сильное землетрясение произошло в Непале 05.12.2015 г. в 7.00 по мировому времени (широта 27,78°, долгота 86,09°, глубина 10 км, $m_s=7,0$). Обращаясь к данным натурных наблюдений, представленным на рис. 19, отметим появление четкого магнитного возмущения-предвестника за 7 часов до главного удара.

Развернутая структура характерных магнитных возмущений-предвестников в вариациях магнитного поля Земли по двум компонентам (Н- и Z-компоненты) представлена на рис. 20. Видно, что по каналу H_f магнитное возмущение-предвестник по уровню превысило 10 нТл. Что касается структуры сигналов по отдельным каналам, то оба анализируемых сигнала могут быть охарактеризованы как квазигармонические, частота которых снижается по мере приближения первого удара. Причиной тому, как уже указывалось, стали резонансные свойства трансформирующихся дилатансных структур.

Изучение большого числа полученных экспериментальных данных позволяет утверждать, что тонкая структура наблюдаемых аномальных геомагнитных возмущений определяется в первую очередь геологическими особенностями среды в очаговой зоне и отражает характерные свойства наблюдаемых геолого-геофизических процессов развивающегося сейсмического события, а фиксируемые магнитные сигналы явно зависят от условий в очаге землетрясения [Собисевич, 2013]. Это подтверждают и графики прерывистого скольжения (stick-slip) в кварците в условиях водонасыщения контактной зоны разреза и при

отсутствии воды. Они коррелируют с тонкой структурой магнитных сигналов, а разница объясняется заводнением эпицентрального выхода разлома при морских землетрясениях [Николаевский, 2011; Собисевич и др., 2012].

Отметим, что спутниковая аномалия силы тяжести частично связана с дилатансионным разуплотнением литосферы в области катастрофического цунамигенного землетрясения 2004 г. у берегов Суматры [Panet et al., 2007].

У морских событий излучение, скорее всего, формируется в эпицентре очага, поскольку морская вода вряд ли достигнет гипоцентра. И еще, развитие системы трещин [Fenoglio et al., 1995] на стадии перехлеста тесно связано с прерывистым скольжением. Известно и несколько иное толкование магнитного УНЧ сигнала: форшок ($M=7,1$), вызвавший цунами, также мог излучать подобный сигнал перед Великим японским землетрясением ($M=9,1$) за счет поднявшихся соленых морских волн [Ichihara et al., 2013].

Итак, для излучения сверхсрочных (часы) предвестников нужна та самая анизотропная трещиноватость в горном массиве, которая характерна для локализации в условиях сжатия. Динамика событий внутри этой зоны сложна, но их комбинации могут обеспечить наблюдаемые амплитуды предвестников, которые включают форшоковые удары с перераспределением напряжений и порового давления в горных массивах в зависимости от знаков предварительного деформирования. В настоящее время считается, что магнитные сигналы при прогнозе землетрясения достоверны, но не дают привязки грядущего очага землетрясения к территории. Поэтому они должны быть дополнены системой локальных предвестников и в первую очередь — форшоков и радоновых сигналов.

Согласно геодезическим данным, разлом Лома-Приета расположен между зонами дилатансии (подъема поверхности) и островков ее опускания, а гипоцентр находился на глубине 20 км. Здесь после землетрясения отмечалась компакция разлома (на поверхности в 10 см), что вновь подтверждает временный характер дилатансионных трещин. Система дилатансионных трещин закрывается, а разлом (в ходе отдачи упругой энергии) вырождается, чаще всего, в тонкую полосу скольжения. Вместе с тем следует помнить, что события в очаге землетрясения локальны. Они относятся к вершине активного разлома или даже линеамента.

То, что дилатансионно возникшая геострук-

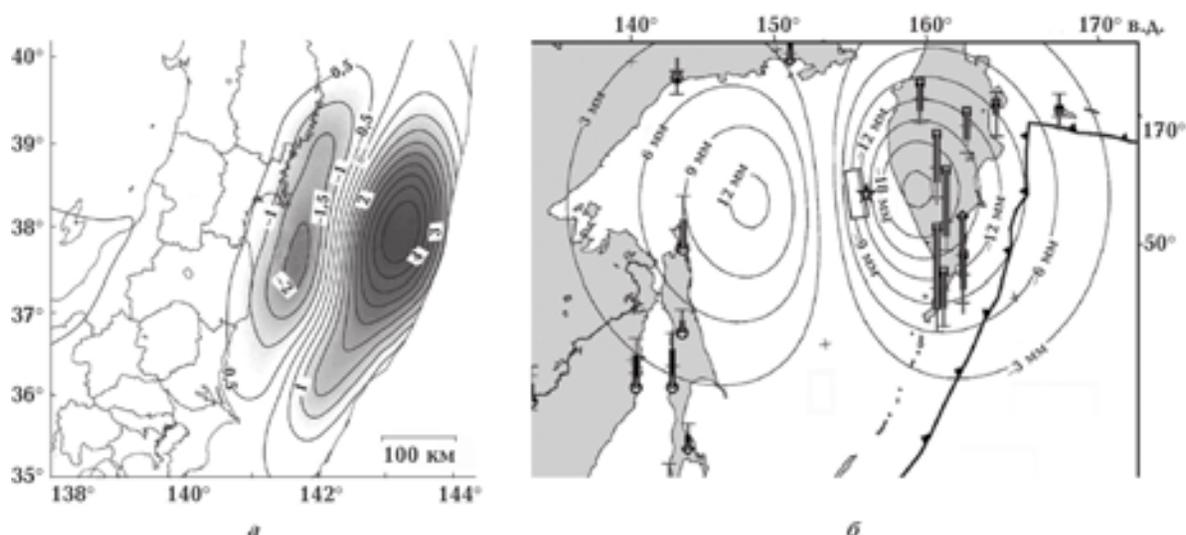


Рис. 21. Бифокальное строение очага землетрясения видно в измерениях подъема уровня моря «Великой Японской катастрофы» в Тохоку (а) и в Охотском море (глубина гипоцентра 630 км) (б).

тура (очаг землетрясения) действительно соответствует упругопластической модели с дилатансией [Николаевский, 1996], подтверждают и упругопластические расчеты И. А. Гарагаша, приведенные в работе [Николаевский, 2014]. При этом использовалось значение скорости дилатансии $\Lambda=0,996$, типичное для ненарушенных гранитов как внутри, так и вне разлома. Заметим, что столь высокая скорость Λ означает практическую ортогональность смещений бортов и оси разлома.

Относительное смещение разлома обращалось в нуль на его краях. Например, исходный

разлом в 1 км расширяется до 10×20 км. Этим эффект дилатансии обеспечивает размеры, требуемые для достоверности излучателя магнитного сигнала, по [Merzer, Klempere, 1997]. При этом эллипс моделирует гипоцентр, т. е. дилатирующий разлом.

По заданной ширине разлома и объемной деформации внутри него вычислялись максимальные значения интенсивности деформации сдвига и смещения бортов разлома. В эпицентральной зоне достигался предел Кулона—Мора (коэффициент трения $\alpha=0,34$) и прочность на отрыв $\sigma_r=50$ кг/см² по напряжениям, причем соответственно раскрывались трещины сдвига и трещины растяжения (на свободной поверхности).

Приведем примеры фиксации бифокальной природы очага землетрясений по косейсмическим наблюдениям за уровнем моря (рис. 21, 22). Эти данные подтверждают природу бифокального очага.

Глубокофокусные события в этом районе Охотского моря закономерно происходили и ранее. Так, в 2008 г. были зафиксированы два события: 5 июля с магнитудой 7,2 и 24 ноября с магнитудой 6,9. Согласно современным представлениям наших ученых Курило-Камчатская зона субдукции разделяется по простиранию на два сегмента: Курило-Южно-Камчатский и Северо-Камчатский. Граница между ними проходит в районе Авачинского залива и далее по падению погружающейся Тихоокеанской плиты. Многочисленные геологические и сейсмологические данные указывают на различие в возрасте возникновения субдукции для этих

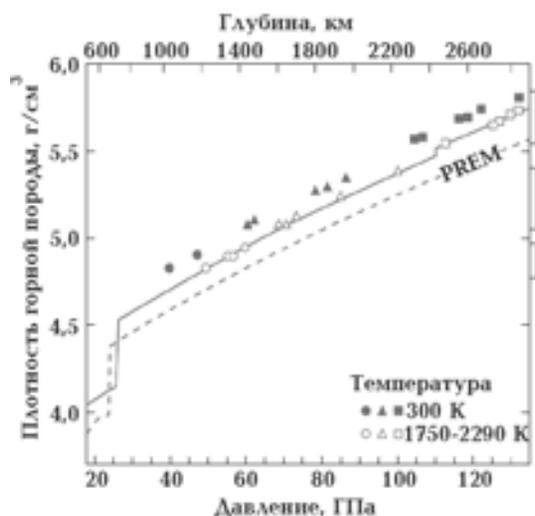


Рис. 22. Фазовый переход на 660 км в мантии [Жарков, 2012] к более жесткому геоматериалу. Здесь происходят и фазовые переходы в серпентинах по модели [Каракин и др., 1982].

двух сегментов [Lander, Shapiro, 2013].

Свидетельством отмеченного факта является существование на Камчатке севернее поперечной Авачинской границы двух вулканических поясов: почти потухшего Западного и активного молодого Восточного. Наблюдаемые сейсмофокальные зоны достигают в южном и северном сегменте вулканических поясов принципиально разных глубин, соответственно 650—700 км на юге и только 350—400 км на севере. Скачкообразное изменение на 300 км максимальной глубины зоны происходит на поперечной Авачинской границе.

Согласно представлениям А. В. Ландера, А. В. Букчина и Н. Н. Титкова (Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН), глубокофокусное землетрясение 24 мая 2013 г. произошло практически на указанной поперечной границе, точнее на северо-восточном торцевом крае Курило-Южно-Камчатского сегмента погружающейся Тихоокеанской плиты, в нижней части сейсмофокальной зоны. Севернее гипоцентра на соответствующих землетрясению глубинах современная погружающаяся плита, по-видимому, отсутствует, поскольку проявления сейсмичности здесь заканчиваются значительно ближе к земной поверхности.

Оценки размеров и механизма очага, полученные по стандартным алгоритмам [Ландер и др., 2013], приведены на рис. 23 (выбрана плоскость разрыва, близкая по положению к облаку афтершоков).

Поверхность разрыва полого (15°) падает на запад—северо-запад (285°). Согласно оценкам вторых пространственных моментов очага, его протяженность составляет 110 км, а ширина разрыва — 50 км. Большая ось разрыва направлена приблизительно на юг, а главная ось сжатия сброшенных напряжений — прибли-

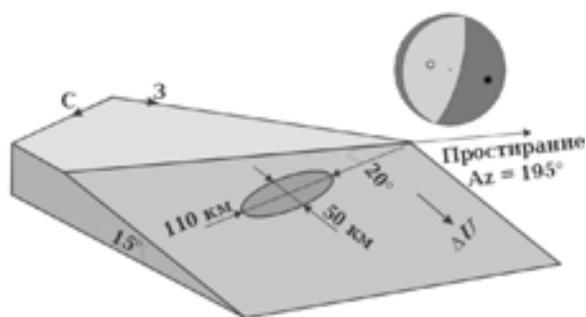


Рис. 23. Оценки механизма и формы очага по записям длиннопериодных поверхностных волн [Ландер и др., 2013].

зительно по падению погружающейся плиты.

Исходя из расположения главного гипоцентра, облака афтершоков и анализа структуры аномальных магнитных возмущений, наблюдаемых на этапе подготовки глубокофокусного Охотоморского землетрясения, «разрыв» в геологической среде был обусловлен «столкновением» субдуцируемой плиты с горизонтом более жесткого перовскита (фазовый переход к которому изображен на рис. 22). К этим процессам следует добавить еще изменения в структуре геологической среды, которые происходят в результате флюидной активности в мантии Земли, на которую не всегда обращают внимание.

Закключение. Приведенный в статье анализ геофизических процессов позволил с новых позиций оценить условия подготовки землетрясений. Показано, что трансформация геологических образований дилатансного типа находит свое отражение в структуре аномальных магнитных возмущений — предвестников. Поэтому в настоящее время следует направить усилия на выявление локально-территориальных особенностей в структуре магнитных возмущений.

Список литературы

Алексеев А. С., Глинский Б. М., Имомназаров Х. Х., Ковалевский В. В., Собисевич А. Л., Собисевич Л. Е., Хайретдинов С. М., Цибульчик Г. М. Мониторинг геометрии и физических свойств «поверхностной» и «очаговой» дилатантных зон методом вибросейсмического просвечивания сейсмоопасных участков земной коры. В кн.: *Изменение природной среды и климата. Природные катастрофы*. Т. 1. Москва: Изд. ИФЗ РАН, 2008. С. 179—222.

Габсатаров Ю. В. Анализ деформационных процессов в литосфере по геодезическим наблюдениям

на примере разлома Сан Андреас. *Geodynamics & tectonophysics*. 2012. Т. 3. № 3. С. 275—287.

Добровольский И. П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. Москва: Физматлит, 2009. 240 с.

Жарков В. Н. Физика земных недр. Москва: Наука и образование, 2012. 384 с.

Каракин А. В., Лобковский Л. И., Николаевский В. Н. Образование серпентинитового слоя океанской коры и некоторые геолого-геофизические явления. *Докл. АН СССР*. 1982. Т. 265. № 3. С. 527—576.

- Копничев Ю. Ф., Соколова И. И. О корреляции характеристик сейсмичности и поля поглощения волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями. *Вулканология и сейсмология*. 2010. № 6. С. 1—18.
- Ландер А. В., Букчин Б. Г., Титков Н. Н. Тектоническая позиция глубокого землетрясения в Охотском море 24 мая 2013 г., $M_w = 8.3$. Четвертая научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Петропавловск-Камчатский, 30 сентября—4 октября 2013 г.
- Марон В. И. Механизмы неустойчивости извержения вулкана и работы скважины. Причина аварии 2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС. *Геофизические исследования*. 2012. Т. 13. № 4. С. 51—59.
- Милановский С. Ю., Николаевский В. Н. Роль трещиноватости в эволюции земной коры. В кн.: *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле*. Т. 2. Москва: Изд. ИФЗ РАН, 2009. С. 71—103.
- Николаевский В. Н. Геомеханика. Современные главы. Москва: Изд. ИФЗ РАН, 2014. 484 с.
- Николаевский В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. Москва: Недра, 1996. 448 с.
- Николаевский В. Н. Граница Мохоровичича как предельная глубина хрупко-дилатансионного состояния горных пород. *Докл. АН СССР*. 1979. Т. 249. № 4. С. 817—821.
- Николаевский В. Н. Механика геоматериалов и землетрясения. *Итоги науки и техники. Сер. Механика твердого деформируемого тела*. 1983. Т. 15. С. 149—230.
- Николаевский В. Н. О связи объемных и сдвиговых деформаций и об ударных волнах в мягких грунтах. *Докл. АН СССР*. 1967. Т. 117. № 3. С. 542—545.
- Николаевский В. Н. Очаг землетрясения — события и предвестники удара. В кн.: *Экстремальные природные явления и катастрофы*. Т. 2. Москва: Изд-во РАН, 2011. С. 316—330.
- Райс Дж. Механика очага землетрясения. Москва: Мир, 1982. 217 с.
- Родионов В. Н., Агушкин В. В., Костюченко В. Н., Николаевский В. Н., Ромашов А. С., Цветков В. М. Механический эффект подземного взрыва. Москва: Недра, 1971. 221 с.
- Семенов А. Н. Изменение отношения времен пробега поперечных и продольных волн перед сильным землетрясением. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1969. № 4. С. 72—77.
- Собисевич А. Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Москва: Изд. ИФЗ РАН, 2011. 510 с.
- Собисевич А. Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Северокавказская геофизическая обсерватория. Создание, анализ результатов наблюдений. Москва: Изд. ИФЗ РАН, 2013. 512 с.
- Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л., Канониги К. Х. Аномальные геомагнитные возмущения, навденные катастрофическими цунамигенными землетрясениями в районе Индонезии. *Геофиз. журн*. 2012. Т. 34. № 3. С. 22—37.
- Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л., Канониги К. Х. О механизме формирования очагов глубокофокусных землетрясений. *Докл. РАН*. 2014. Т. 459. № 1. С. 1391—1396.
- Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. Москва: Наука, 2003. 270 с.
- Стефанов Ю. П. Численное исследование формирования разрывов в геоматериалах. Режимы развития деформаций. В сб.: *Триггерные эффекты в геосистемах*. Москва: Геос, 2010. С. 238—246.
- Траскин В. Ю., Скворцова З. Н. Эффект Ребиндера в геодинамических процессах. В сб.: *Флюиды и геодинамика*. Москва: Наука, 2006. С. 147—164.
- Anderson D. L., Whitcomb J. H., 1975. Time-dependent seismology. *J. Geophys. Res.* 80, 1497—1503.
- Arnadottir T., Segall P., 1994. Loma Prieta earthquake imaged from inversion of geodetic data. *J. Geophys. Res.* 99, 2183—2185.
- Cosserat E., Cosserat F., 1909. *Theorie des corps deformables*. Paris: A. Hermann et fils, 226 p.
- Crampin S., Gao Y., 2010. A review of the new understanding of fluid-rock deformation in the crack-critical Earth. In: *Rock stress and Earthquakes*. London: Taylor & Francis, 235—240.
- Dal Moro G., Zadro M., 1999. Remarkable tilt-strain anomalies preceding two seismic events in Friuli (NEItaly): their interpretation as precursors. *Earth Planet. Sci., Lett.* 170, 119—129.
- Dudkin F., Korepanov V., Yang D., Leontyeva O., 2011. Analysis of the local lithospheric magnetic activity before and after Panzhihua $M = 6.0$ earthquake (30 august 2008, China). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 3171—3180.
- Egbert G. D., 2002. On the Generation of ULF Magnetic variations by Conductivity Fluctuations in a Fault Zone. *Pure Appl. Geophys.* 159, 1205—1227.
- Gusev A. A., 1988. Two dilatancy-based models to explain coda-wave precursors and P/S spectral ratio. *Tectonophysics* 152, 227—237.
- Fenoglio M. K., Johnston M. J. S., Byerlee J. D., 1995. Magnetic and Electric Fields Associated with

- Changes in Pore Pressure in Fault Zones: Application to the Loma Prieta ULF Emissions. *J. Geophys. Res.* 100, 12,951—12,958.
- Fraser-Smith A. C., Bernardi A., McGill P. R., Ladd M. E., Helliwell R. A., Villard Jr O. G., 1990. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the M_S 7.1 Loma Prieta earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 17(9), 1465—1468.
- Hauksson E., 1981. Radon content of groundwater as an earthquake precursor. Evaluation of worldwide data and physical basis. *J. Geophys. Res.* 86, 9397—9410.
- Holcomb D., Rudnicki J. W., Issen K. A., Sternlof K., 2007. Compaction localization in the Earth and the laboratory: state of the research and research directions. *Acta Geotechnica* 2, 1—15.
- Ichihara H., Hamano Y., Baba K., Kasaya T., 2013. Tsunami source of the 2011 Tohoku earthquake detected by an ocean-bottom magnetic. *Earth. Planet. Sci. Lett.* 382, 117—124.
- Kanamori H., Fuis G., 1976. Variation of P-wave velocity before and after the Galway Lake earthquake ($M=5.2$) and the Goat Mountain earthquakes ($M=4.7$) 1975 in the Mojave desert, California. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 66(6), 2017—2037.
- Koch M., 1992. Bootstrap inversion for vertical and lateral variations of the S wave structure and V_p/V_S ratio from shallow earthquakes in the Rhinegraben seismic zone, Germany. *Tectonophysics* 210, 91—115.
- Lander A. V., Shapiro M. N., 2013. The Origin of the Modern Kamchatka Subduction Zone. In: *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region*. American Geophysical Union, Washington, D.C.
- Manga M., Wang C.-Y., 2007. Earthquake hydrology. In: *Treatise on geophysics*. Ch. 4.10. Amsterdam: Elsevier, P. 293—320.
- Marone Ch., 1991. A note on the stress-dilatancy relation for stimulated fault gouge. *Pure Appl. Geophys.* 137(4), 410—419.
- Merzer M., Klempner S. L., 1997. Modeling Low-frequency Magnetic-field Precursors to the Loma Prieta Earthquake with a Precursory Increase in Fault-zone Conductivity. *Pure Appl. Geophys.* 150, 217—248.
- Nur A., 1974. Matsushiro, Japan, earthquake swarm: Confirmation of the dilatancy-fluid diffusion model. *Geology* 2, 217—221.
- Ohtake M., 1974. Seismic activity induced by water injection at Matsushiro, Japan. *J. Phys. Earth* 22, 163—176.
- Panet I., Mikhailov V., Diamant M., Pollitz F., King G., De Viron O., Holschneider M., Biancale R., Lemoine J.-M., 2007. Co-seismic and post-seismic signatures of the Sumatra December 2004 and March 2005 earthquakes in GRACE satellite gravity. *Geophys. J. Int.* 171, 177—190.
- Pavlenkova N. I., 2004. Low velocity and low electrical resistivity layers in the middle crust. *Annals of geophysics* 47(1), 157—169.
- Rice J. R., 1979. Theory of precursory processes in the inception of earthquake rupture. *Gerlands Beitr. Geophys.* 88(2), 91—127.
- Rudnicki J. W., 1988. Physical models of earthquake instability and precursors processes. *Pure & Appl. Geophys.* 126(2), 534—554.
- Rundle J. B., Rundle P. B., Donnellan A., Li P., Klein W., Morein G., Tarcotte D. L., Grant L. 2006. Stress transfer in earthquake, hazard estimation and ensemble forecasting: interference from numerical simulations. *Tectonophysics* 413, 109—125.
- Sebela S., Vaupotic J., Kostak B., Stemberk J., 2010. Direct measurement of present-day tectonic movement and associated radon flux in Postojna cave, Slovenia. *J. Cave Karst Stud.* 72(1), 21—34.
- Schock R. N., 1982. Strain behavior of a granite and a graywacke sandstone in tension. *J. Geophys. Res.* 87(B9), 7817—7823.
- Swolfs H. S., 1976. Stress-monitoring system for earthquake prediction. Salt Lake City: Terra-Tek, Report TR, 76—55.

The nature of bifocal source of the earthquake and precursors of the blow

© V. N. Nikolayevskiy, L. E. Sobisevich, 2015

On the base of ousting principle and application of the data on location bifocal model of earthquake source is proposed, which includes zones of dilatancy and compaction. The first one corresponds to the recognized set of precursors and the second one compensates the changes of the fissures volume. The sources of radon delineate dilatancy zone (the beginning of fissures growth). Hypocenter of the main blow is in the transitional zone. Existence of two foci in the source of earth-

quake is confirmed experimentally on the base of gravity data and observations of the ocean surface level. Anomalous magnetic disturbances in variations of magnetic field of the Earth are being analyzed, which can be considered as a short-term precursor. This type of disturbances is inseparably connected with tectonomagnetic effects in lithosphere and other geo-spheres. The data of experimental observations of magnetic disturbances-precursors have been presented, which allow to draw a conclusion that they are induced by internal sources located in the lower geo-spheres of the Earth.

Key words: earthquake, bifocal source, dilatancy, compaction, fluids, destruction, magnetic disturbances-precursors.

References

- Alekseev A. S., Glinskiy B. M., Imomnazarov Kh. Kh., Kovalevskiy V. V., Sobisevich A. L., Sobisevich L. E., Khairtdinov S. M., Tsibulchik G. M., 2008. Monitoring geometry and physical properties of the «surface» and «focal» dilatancy zones by vibroseismic seismic areas of the earth's crust. In: *The changes of environment and climate. Natural disasters*. Vol. 1. Moscow: IPE RAS Publ., P. 179—222 (in Russian).
- Gabsatarov Yu. V., 2012. Analysis of deformation processes in the lithosphere of geodetic observations on the example of the San Andreas Fault. *Geodynamics & tectonophysics* 3(3), 275—287 (in Russian).
- Dobrovolskiy I. P., 2009. Mathematical theory of training and forecasting tectonic earthquake. Moscow: Fizmatlit, 240 p. (in Russian).
- Zharkov V. N., 2012. Physics of the Earth's interior. Moscow: Nauka i obrazovanie, 384 p. (in Russian).
- Karakin A. V., Lobkovskiy L. I., Nikolayevskiy V. N., 1982. Education serpentinite layer of oceanic crust and some geological and geophysical phenomena. *Doklady AN SSSR* 265(3), 527—576 (in Russian).
- Kopnichenov Yu. F., Sokolova I. I., 2010. Correlation characteristics of seismic wave absorption and fields in areas of ring structures formed before strong earthquakes. *Vulkanologiya i seismologiya* (6), 1—18 (in Russian).
- Lander A. V., Bookchin B. G., Titkov N. N., 2013. Tectonic position of deep earthquake in the Sea of Okhotsk 24 May 2013, $M_w=8.3$. *Fourth scientific and technical conference «Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East»*. Petropavlovsk-Kamchatsky. September 30—October 4, 2013 (in Russian).
- Maron V. I., 2012. Mechanisms of instability volcanic eruption and working well. Cause of the accident in 2009 at the Sayano-Shushenskaya hydropower plant. *Geofizicheskie issledovaniya* 13(4), 51—59 (in Russian).
- Milanovskiy S. Yu., Nikolayevskiy V. N., 2009. The role of the fracture in the evolution of the earth's crust. In the book: *Tectonophysics and topical issues of the Earth Sciences*. Vol. 2. Moscow: IPE RAS Publ., 71—103 (in Russian).
- Nikolayevskiy V. N., 2014. Geomechanics. Modern head. Moscow: IPE RAS Publ., 484 p. (in Russian).
- Nikolayevskiy V. N., 1996. Geomechanics and fluid dynamics. Moscow: Nedra, 448 p. (in Russian).
- Nikolayevskiy V. N., 1979. Moho depth of the marginal-fragile state of the dilatancy of rocks. *Doklady AN SSSR* 249(4), 817—821 (in Russian).
- Nikolayevskiy V. N., 1983. Mechanics geomaterials and earthquakes. *Itogi nauki i tehniki. Ser. Mehanika tverdogo deformiruemogo tela* 15, 149—230 (in Russian).
- Nikolayevskiy V. N., 1967. On the relationship between volume and shear deformations and shock waves in the soft soil. *Doklady AN SSSR* 117(3), 542—545 (in Russian).
- Nikolayevskiy V. N., 2011. The earthquake — the harbingers of events and stroke. In: *Extreme natural events and disasters*. Vol. 2. Moscow: Publ. RAS, P. 316—330 (in Russian).
- Rice J., 1982. The mechanics of the earthquake source. Moscow: Mir, 217 p. (in Russian).
- Rodionov V. N., Adushkin V. V., Kostyuchenko V. N., Nikolaevskiy V. N., Romashov A. S., Tsvetkov V. M., 1971. Mechanical effect of the underground explosion. Moscow: Nedra, 221 p. (in Russian).
- Semenov A. N., 1969. Changing attitudes travel times of transverse and longitudinal waves before the strong earthquake. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli* (4), 72—77 (in Russian).
- Sobisevich A. L., 2011. Selected problems of mathematical geophysics, volcanology and and geocology. Moscow: IPE RAS Publ., 510 p. (in Russian).
- Sobisevich A. L., 2013. Selected problems of mathematical geophysics, volcanology and and geocology. North Caucasian Geophysical Observatory. Create, analyze the results of observations. Moscow: IPE RAS Publ., 512 p. (in Russian).
- Sobisevich L. E., Sobisevich A. L., Kanonidi K. Kh., 2012. Abnormal geomagnetic disturbances induced catastrophic tsunamigenic earthquakes in the area of Indonesia. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(3), 22—37 (in Russian).

- Sobisevich L. E., Sobisevich A. L., Kanonidi K. Kh., 2014. On the mechanism of formation of pockets of deep-focus earthquakes. *Doklady RAN* 459(1), 1391—1396 (in Russian).
- Sobolev G. A., Ponomarev A. V., 2003. Physics of earthquakes and precursors. Moscow: Nauka, 270 p. (in Russian).
- Stefanov Yu. P., 2010. Numerical study of the formation of discontinuities in geomaterials. Modes of deformation. In: *Trigger effects in the ecosystems*. Moscow: Geos, P. 238—246 (in Russian).
- Traskin V. Yu., Skvortsova Z. N., 2006. Reh binder effect in the geodynamic processes. In *Sat.: fluids and geodynamics*. Moscow: Nauka, P. 147—164 (in Russian).
- Anderson D. L., Whitcomb J. H., 1975. Time-dependent seismology. *J. Geophys. Res.* 80, 1497—1503.
- Arnadottir T., Segall P., 1994. Loma Prieta earthquake imaged from inversion of geodetic data. *J. Geophys. Res.* 99, 2183—21855.
- Cosserat E., Cosserat F., 1909. *Theorie des corps deformables*. Paris: A. Hermann et fils, 226 p.
- Crampin S., Gao Y., 2010. A review of the new understanding of fluid-rock deformation in the crack-critical Earth. In: *Rock stress and Earthquakes*. London: Taylor & Francis, 235—240.
- Dal Moro G., Zadro M., 1999. Remarkable tilt-strain anomalies preceding two seismic events in Friuli (NEItaly): their interpretation as precursors. *Earth Planet. Sci., Lett.* 170, 119—129.
- Dudkin F., Korepanov V., Yang D., Leontyeva O., 2011. Analysis of the local lithospheric magnetic activity before and after Panzhihua $M = 6.0$ earthquake (30 august 2008, China). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 3171—3180.
- Egbert G. D., 2002. On the Generation of ULF Magnetic variations by Conductivity Fluctuations in a Fault Zone. *Pure Appl. Geophys.* 159, 1205—1227.
- Gusev A. A., 1988. Two dilatancy-based models to explain coda-wave precursors and P/S spectral ratio. *Tectonophysics* 152, 227—237.
- Fenoglio M. K., Johnston M. J. S., Byerlee J. D., 1995. Magnetic and Electric Fields Associated with Changes in Pore Pressure in Fault Zones: Application to the Loma Prieta ULF Emissions. *J. Geophys. Res.* 100, 12,951—12,958.
- Fraser-Smith A. C., Bernardi A. McGill P. R., Ladd M. E. Helliwell R. A., Villard Jr O. G., 1990. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the M_S 7.1 Loma Prieta earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 17(9), 1465—1468.
- Hauksson E., 1981. Radon content of groundwater as an earthquake precursor. Evaluation of worldwide data and physical basis. *J. Geophys. Res.* 86, 9397—9410.
- Holcomb D., Rudnicki J. W., Issen K. A., Sternlof K., 2007. Compaction localization in the Earth and the laboratory: state of the rerserch and research directions. *Acta Geotechnica* 2, 1—15.
- Ichihara H., Hamano Y., Baba K., Kasaya T., 2013. Tsunami source of the 2011 Tohoku earthquake detected by an ocean-bottom magnetic. *Earth. Planet. Sci. Lett.* 382, 117—124.
- Kanamori H., Fuis G., 1976. Variation of P-wave velocity before and after the Galway Lake earthquake ($M=5.2$) and the Goat Mountain earthquakes ($M=4.7$) 1975 in the Mojave desert, California. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 66(6), 2017—2037.
- Koch M., 1992. Bootstrap inversion for vertical and lateral variations of the S wave structure and V_p/V_S ratio from shallow earthquakes in the Rhinegraben seismic zone, Germany. *Tectonophysics* 210, 91—115.
- Lander A. V., Shapiro M. N., 2013. The Origin of the Modern Kamchatka Subduction Zone. In: *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region*. American Geophysical Union, Washington, D.C.
- Manga M., Wang C.-Y., 2007. Earthquake hydrology. In: *Treatise on geophysics*. Ch. 4.10. Amsterdam: Elsevier, P. 293—320.
- Marone Ch., 1991. A note on the stress-dilatancy relation for stimulated fault gouge. *Pure Appl. Geophys.* 137(4), 410—419.
- Merzer M., Klempere S. L., 1997. Modeling Low-frequency Magnetic-field Precursors to the Loma Prieta Earthquake with a Precursory Increase in Fault-zone Conductivity. *Pure Appl. Geophys.* 150, 217—248.
- Nur A., 1974. Matsushiro, Japan, earthquake swarm: Confirmation of the dilatancy-fluid diffusion model. *Geology* 2, 217—221.
- Ohtake M., 1974. Seismic activity induced by water injection at Matsushiro, Japan. *J. Phys. Earth* 22, 163—176.
- Panet I., Mikhailov V., Diamant M., Pollitz F., King G., De Viron O., Holschneider M., Biancale R., Lemoine J.-M., 2007. Co-seismic and post-seismic signatures of the Sumatra December 2004 and March 2005 earthquakes in GRACE satellite gravity. *Geophys. J. Int.* 171, 177—190.
- Pavlenkova N. I., 2004. Low velocity and low electrical resistivity layers in the middle crust. *Annals of geophysics* 47(1), 157—169.
- Rice J. R., 1979. Theory of precursory processes in the

- inception of earthquake rupture. *Gerlands Beitr. Geophys.* 88(2), 91—127.
- Rudnicki J. W., 1988. Physical models of earthquake instability and precursors processes. *Pure & Appl. Geophys.* 126(2), 534—554.
- Rundle J. B., Rundle P. B., Donnellan A., Li P., Klein W., Morein G., Tarcotte D. L., Grant L., 2006. Stress transfer in earthquake, hazard estimation and ensemble forecasting: interference from numerical simulations. *Tectonophysics* 413, 109—125.
- Sebela S., Vaupotic J., Kostak B., Stemberk J., 2010. Direct measurement of present-day tectonic movement and associated radon flux in Postojna cave, Slovenia. *J. Cave Karst Stud.* 72(1), 21—34.
- Schock R. N., 1982. Strain behavior of a granite and a graywacke sandstone in tension. *J. Geophys. Res.* 87(B9), 7817—7823.
- Swolfs H. S., 1976. Stress-monitoring system for earthquake prediction. Salt Lake City: Terra-Tek, Report TR, 76—55.