

Дискуссии

УДК 550.34

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ. ВОЗМОЖНОСТИ КРАТКОСРОЧНОЙ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

© 2017 И.Л. Гуфельд¹, О.Н. Новоселов²¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, 123995; e-mail: igufeld@korolev-net.ru²Московский Государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005

Рассматривается безбарьерный сейсмический процесс в зоне субдукции, связанный с нарушением аккомодации элементов активной среды относительно друг друга. Используются специальные методы мониторинга сред с внутренними источниками энергии, контролируемые водородной дегазацией. В зонах субдукции обнаружено существование двух основных режимов колебательных процессов. По данным анализа сейсмичности Камчатской зоны, Курильских и Японских о-вов показаны краткосрочные особенности колебательного режима элементов среды, предшествующие вероятным мегасейсмическим событиям. Надежность выводов подтверждается на основе анализа решений уравнения эволюции состояния среды. Результатом работы является диагностика предкатастрофического состояния среды, позволяющая контролировать переход из фонового режима в краткосрочный режим наибольшей вероятности сильнейших сейсмических событий и диагностировать в краткосрочном периоде опасности эпицентральной зоны сильнейших сейсмических событий в зонах субдукции.

Ключевые слова: мегасейсмические события, сейсмический процесс, краткосрочная сейсмическая опасность, зона субдукции.

Статья публикуется в разделе «Дискуссии» по предложению рецензентов.

ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ

Разработка методологии предупреждения о краткосрочной сейсмической опасности в настоящее время остается актуальной проблемой. Сейчас очевидно, что существующие методы мониторинга неэффективны, о чем свидетельствуют пропуски практически всех сильнейших сейсмических событий. Они все были неожиданными по положению эпицентральной зоны и времени. Единичные успехи можно связывать только с исключительными стечениями обстоятельств наблюдений. Особенно неприятным было мегасобытие 11 марта 2011 г. в Японии с $M = 9$, происшедшее в непосредственной близости от систем мониторинга, подготовка которого не была замечена.

Традиционные направления работ по физике землетрясений и их прогнозу не дали

сих пор ожидаемых результатов. Внимание же к исследованиям тектонофизики сейсмических процессов было явно недостаточным (Гуфельд и др., 2011б). В то же время продолжали преобладать, практически без коррекции, представления о подготовке разрушения в геологической среде, аналогичной разрушению монолитных лабораторных образцов, и соответственно этим представлениям строилась стратегия поиска так называемых предвестников. Собственно говоря, это и предопределяло постановку работ по поиску предвестников сейсмических событий и их прогноза. Так, любые возмущения любых полей считались предвестниками, так как разрушение среды было, как в лабораторном эксперименте, предопределено при декларируемом повышении напряжений, то есть полагали (Гуфельд и др., 2011б), что процесс подготовки сейсмического события жестко детерминирован. Однако поста-

новка на этой основе работ по прогнозированию ситуаций была, по нашему мнению, ошибочной, так как любое прогнозирование предполагает знание развития процессов в будущем, исходя из наблюдаемых данных. А этого не было. Кроме того, уже начиная с начала 80-х годов прошлого века, работами В.Н. Николаевского (Николаевский, 1980, 1982) и М.А. Садовского с соавторами (Садовский и др., 1987) были поставлены под сомнение идеи о ведущей роли процессов разрушения различного масштаба в развитии сейсмического процесса.

Если связывать сейсмический процесс с непрерывным разрушением, то «среда давно бы превратилась в песок» (Садовский и др., 1987, стр. 6). Но этого не происходит. В фоновый период идет непрерывная сейсмичность слабой и средней силы, которые, так же, как и «форшоки», не снимают «декларируемое» накопление тектонических напряжений перед сильнейшими событиями. Литостатическая нагрузка, достигающая на глубинах 6–8 км предела упругости, не позволяет вообще говорить о какой-либо разгрузке среды после событий любой силы. В разломно-блоковой структуре подвижной литосферы и в сейсмофокальных областях зон субдукции, выше границы Мохоровичича, среда (блоки) поддерживаются в трещиноватом состоянии за счет действия литостатического давления и флюида (Николаевский, 1980, 1982), а также формирования связанной трещинами пористой структуры, являющейся следствием процессов взаимодействия восходящих потоков водорода и гелия с твердой фазой (Гуфельд, 2012; Гуфельд, Матвеева, 2011а). Среда в естественном состоянии уже находится в предельном по упругой энергии уровне (Николаевский, 1982). Более высокий уровень действующих в трещиноватой среде напряжений уже на малых масштабах невозможен. Причины сильнейших сейсмических явлений не могут быть связаны с накоплением упругой энергии в больших масштабах.

Накопленные данные о строении среды и проявлении сейсмических явлений указывают на значительную роль других процессов, с учетом которых нужно объяснить непрерывную сейсмичность, повторяемость сейсмических событий в одних и тех же конкретных местах, проявление крупномасштабных сейсмических явлений в «разрушенной» среде, не связанные с процессом разрушения.

Непрерывные и разномасштабные вариации объемно-напряженного состояния (ОНС) литосферы, в том числе на разных глубинах, связаны с процессами взаимодействия восходящих потоков водорода и гелия с твердой фазой среды, при которых изменяются параметры кристаллической структуры и соответственно объем эле-

ментов среды (Гуфельд, 2012). На непрерывные вариации объема элементов среды указывают изменения структурно-чувствительных параметров скоростей прохождения сейсмических волн (продольных V_p и поперечных V_s), отражающие колебательный режим движений. Сейсмичность различного масштаба может быть связана именно с разномасштабными вариациями ОНС как следствие изменения объема различных элементов среды. Разномасштабный и непрерывный колебательный режим в среде отражает возбуждение бегущих «деформационных волн», источниками которых являются обратимые структурные преобразования, связанные с прохождением легких газов через твердую фазу (Гуфельд, Новоселов, 2014, 2015).

В разрушенной среде имеется множество граничных структур, вдоль которых возможно скольжение элементов относительно друг друга. При этом необходимо учитывать, что предельные деформации в блоковой структуре литосферы очень малы и имеют порядок 10^{-4} . Учитывая долговременность процесса, деформационные волны индуцируют непрерывную сейсмичность, являющуюся следствием нарушения аккомодации элементов среды относительно друг друга, а не процессов трещинообразования. Нарушение аккомодации проявляется в виде быстрой (сейсмические явления) или медленной («тихие землетрясения») подвижек вдоль готовых граничных структур. Такая непрерывная и долговременная «сейсмичность» не разрушает среду. Существенную роль в этих процессах играет структура граничных слоев, которые диспергированы, аморфизированы и текстурированы за счет контактных деформаций и водородной дегазации (Гуфельд, 2012; Гуфельд, Матвеева, 2011а). Эти особенности структурного состояния могут обеспечивать режим сверхпластичного, то есть почти безбарьерного, деформирования в контактной зоне. При этом реализуется кооперативный процесс нарушения аккомодации отдельных элементов среды путем подвижек в режиме сверхпластичности.

Зона субдукции уникальна по своей структуре и строению, локализации сейсмичности различного уровня и доступности по своей близости для мониторинга. Действительно, зона субдукции не «разрушена» сейсмическими явлениями, а представляет целостную структуру пространственно-связанных элементов в литосфере, испытывающих движения в целом и относительно друг друга. Напомним, что идеи об отсутствии связи сейсмичности с процессами трещинообразования выдвинули М.А. Садовский с соавторами (Садовский и др., 1987). Как представляется структура такой среды, которая «разрушается не разрушаемым образом».

Эту среду можно представить «губкой», состоящей из связанных между собой, но испытывающих движения относительно друг друга, отдельных элементов (аналогов зерен в поликристаллических материалах, испытывающих сверхпластичность). «Сейсмичность» различного уровня связывается с разномасштабными колебаниями ОНС, как следствия изменения объема различных связанных элементов среды, и индуцированием движений (быстрых, сопровождаемых землетрясениями, или медленных) вдоль граничных или готовых разрывных структур. По наблюдениям «сейсмичности» зона субдукции это среда с внутренними источниками энергии. Среда с внутренними источниками не имеет четких границ и у нас отсутствуют средства для контроля взаимодействий внутри системы и системы с внешней «средой» (Гуфельд, Новоселов, 2014; Новоселов, Гуфельд, 2015). Это является главным основанием для разработки новых подходов для мониторинга состояния среды.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе, на основе изложенных физических представлений, мы представляем особенности мониторинга сейсмических режимов в зоне субдукции, позволяющие давать краткосрочную оценку сейсмической опасности в региональном масштабе и в выделенных эпицентральных зонах. При этом необходимо подчеркнуть, какие задачи необходимо было ставить.

Во-первых, необходимо диагностировать фоновое состояние среды. Большинство сейсмических событий с магнитудой $\leq 6-7.5$, происходящих в зоне субдукции, не несут для береговой инфраструктуры серьезной опасности (Чебров и др., 2011). Эту ситуацию можно контролировать по особенностям колебательного режима среды.

Для идентификации колебательного режима динамической системы с внутренними источниками и его влияния на особенности сейсмичности мы будем использовать измеряемые параметры (структурно чувствительные скорости продольных V_p и поперечных V_s сейсмических волн и энергетические параметры событий), характеризующие систему — объект, а их анализ описывать на основе решений аналитического уравнения эволюции состояния объекта (Новоселов, 2010а, 2010б, 2014). В данной работе использован анализ решений кубического уравнения второго порядка (Новоселов, Гуфельд, 2015):

$$x_{k+2} = a_0 + ax_{k+1} + bx_k + cx_k^2 + dx_k^3 + gx_{k+1}^3 + hx_k^3,$$
 где x — текущие значения контролируемого параметра (использовались параметры V_p/V_s (Славина и др., 2005) или K_s — здесь и далее,

энергетический класс сейсмического события по С.А. Федотову (1972 г.), a_0 — коэффициент баланса воздействий с размерностью измеряемого параметра. Коэффициенты a и b при первых степенях — параметры функционирования системы, определяющие тип ее колебательного поведения. Они характеризуют устойчивость или неустойчивость функционирования системы, определяемые в безразмерных координатах a и b областями сходящихся (ОСР) или не сходящихся (НСР) решений. Однако нам необходимо учитывать и расходящиеся решения. В целом три типа решений соответственно отражают устойчивое, неустойчивое и распадное (катастрофическое) состояния системы. Координаты точки состояния среды a и b (центр белого кружка показан стрелкой) при устойчивом динамическом режиме лежат в ОСР, а при неустойчивом и распадном — вне ОСР (рис. 1). Белое поле — расходящиеся решения (распадное состояние среды), поле черного цвета показывает области не сходящихся решений — псевдошумовых и периодических (неустойчивое состояние среды), оттенки серого цвета — области устойчивого состояния среды. Причем при распадном состоянии ОСР часто вообще отсутствует. Не сходящиеся решения отражают также хаотические последовательности данных, характерные, как известно, только для нелинейных систем. Коэффициенты c и d при квадратичных членах контролируют энергетические процессы, связанные с воздействиями или сбросом энергии средой. Коэффициенты g и h контролируют процессы более слабые, чем массо- и энергоперенос (Новоселов, 2014). В представленной работе коэффициенты c, d, g и h используются только для решения наиболее общего уравнения состояния, коэффициенты которого могут быть обоснованы. Использование

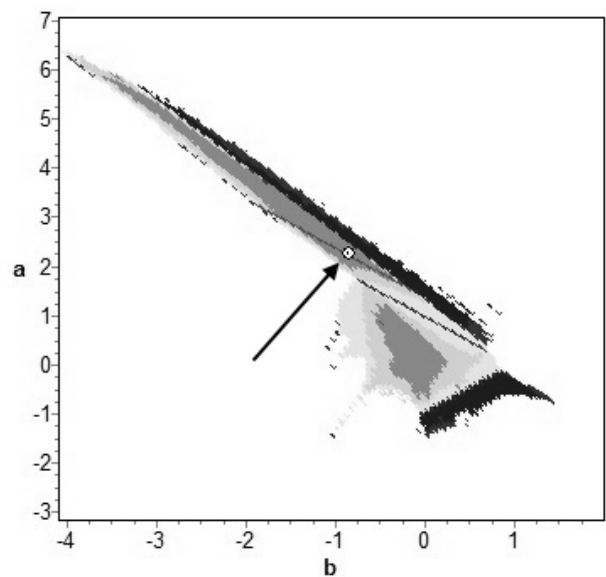


Рис. 1. Области решений уравнения состояния.

коэффициентов c и d показано в работе (Гуфельд и др., 2010). Заметим только, что при анализе данных сейсмофокальной зоны Камчатского региона значений $(c + d) = 0$, $c = 0$ или $d = 0$ не было. Исследования коэффициентов g и h продолжаются.

Качественная оценка состояния объекта дополняется количественной в виде поля решений уравнения эволюции, где в цифрах оценивается степень устойчивости или распадности состояния среды (соответственно от 0 до 1 и от 0 до -1 в четырех градациях) (Новоселов, Гуфельд, 2015).

Реализован новый критерий обнаружения закономерностей функционирования динамического объекта на основе атласа диаграмм Пуанкаре (Новоселов, 2010а). Здесь проводился анализ колебательного состояния системы в конкретном, текущем состоянии, то есть рассматривался ход последовательности контролируемого параметра, генерируемого уравнением системы, и диаграмма Пуанкаре этой последовательности. По виду последовательности и диаграммы можно говорить о типе решений, а отсюда и о состоянии системы в конкретной точке. Последовательность в точке состояния и ее диаграмма Пуанкаре не воспроизводят входную последовательность и ее диаграмму Пуанкаре, то есть здесь уравнение воспроизводит собственное поведение системы в реальных, естественных условиях. Напомним, что диаграмма Пуанкаре представляет точечное множество ряда измеряемых (рассчитанных) величин, где ординатой является N -ое значение последовательности, а абсциссой — предшествующее значение ($N - 1$). Точечное множество образует фигуру, по виду которой определяется тип последовательности, а отсюда — состояние объекта. Диаграммы Пуанкаре позволяют качественно и наглядно показать сложную динамику состояния среды и ее отдельных элементов. Причем мы рассматриваем совместно особенности колебательного режима и картинку визуализации колебательного процесса, то есть диаграмму Пуанкаре, для данного периода.

Во-вторых, необходим мониторинг перехода от фонового состояния среды к предкатастрофическому, когда наиболее вероятны сильнейшие и мегасейсмические событиям. Фактически речь идет о возможностях мониторинга разномасштабного колебательного режима (сейсмического процесса) среды в региональном масштабе.

Возникает вопрос, диапазон каких энергий сейсмических событий в зоне субдукции считать фоновыми? Какие признаки режима говорят о том, что он фоновый? Ответ на этот вопрос оказался простым после представления сейс-

мического режима Камчатского региона в пространстве, то есть в координатах широта и/или долгота — время (рис. 2) (Гуфельд, Новоселов, 2016). Здесь и на аналогичных рисунках каждая точка — сейсмическое событие при равномерной шкале проявления сейсмических событий в отмеченных на рисунках отрезках реального времени: точное время, время сейсмических событий (число, месяц, год) и их энергия K_s , отмечены стрелками. На этих рисунках размытие точек отражает множество сейсмических событий.

Анализ сейсмичности в зонах субдукции Камчатского региона, Курильских и Японских о-вов, а также зоны Чилийского региона (этому региону будет посвящена отдельная работа), показы-

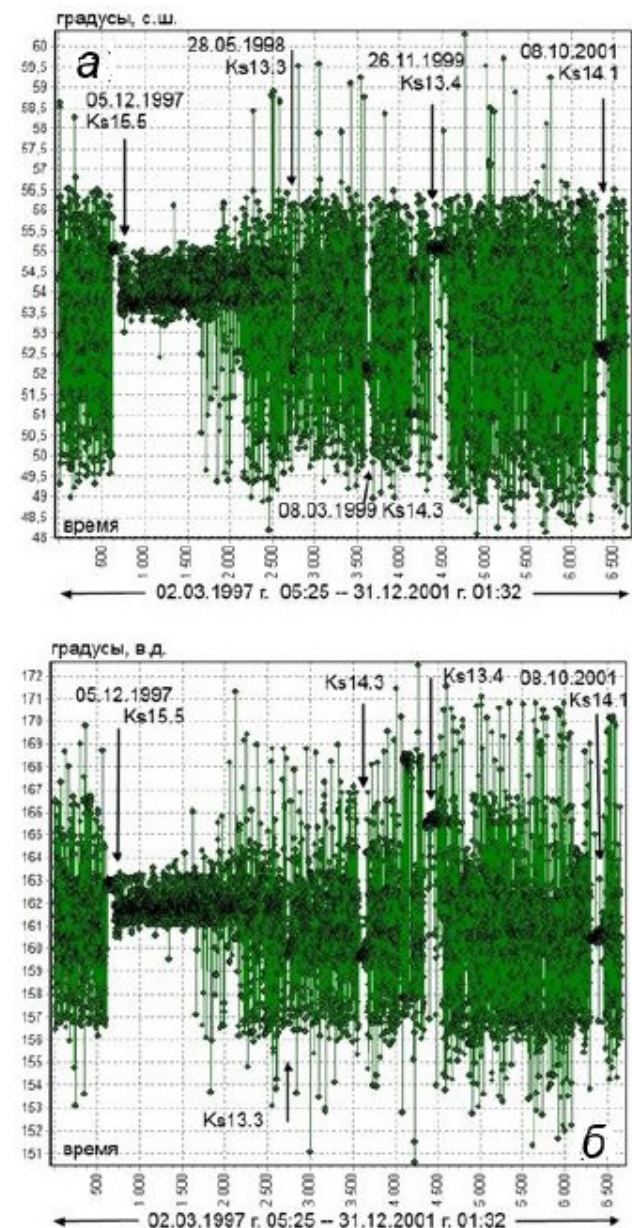


Рис. 2. Колебательный режим сейсмичности в координатах широта (с.ш.) — время (а) и долгота (в.д.) — время (б).

МОНИТОРИНГ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

вает, что наблюдаются два основных режима колебательных процессов. Первый режим отражает сейсмические явления, распределенные длительное время по всей площади каждого из регионов — это период фонового процесса. Здесь могут быть сейсмические события с магнитудой до 6–6.5 и даже до 7. При втором режиме сейсмические явления сосредоточены в короткий период времени вблизи локальных зон. Эти зоны названы локальными сейсмическими узлами (ЛСУ) и в период их существования происходят сильнейшие и мегасейсмические события.

Эти данные предопределили постановку исследований сейсмической опасности на основе непрерывных оценок параметров состояния среды совместно с пространственным анализом сейсмического режима в координатах: пространство (широта и/или долгота сейсмических явлений) — время (а не какой-либо геофизический параметр — время, как это обычно делалось). Причем приоритетной была задача диагностики эпицентральной зоны вероятного сильнейшего или мегасейсмического события.

Покажем иллюстративно характерные примеры различных состояний системы–среды по изменениям V_p/V_s на примере Камчатского региона. Причем разработанная методология позволяет выделить такие особенности измеряемых рядов, которые показывают, что в каждом из рядов может сосуществовать совокупность различных последовательностей, отражающих индивидуальные особенности динамики отдельных частей контролируемой системы (Гуфельд, Новоселов, 2015; Новоселов, 2010а).

Примеры устойчивого колебательного состояния среды. В различные периоды времени последовательности для одной зоны могут иметь одну или более колебательных компонент. Эти последовательности описываются одним уравнением, но с разными параметрами состояния (коэффициентами а и б). Процессы с одним и более колебательными компонентами (рис. 3а, 3б) управ-

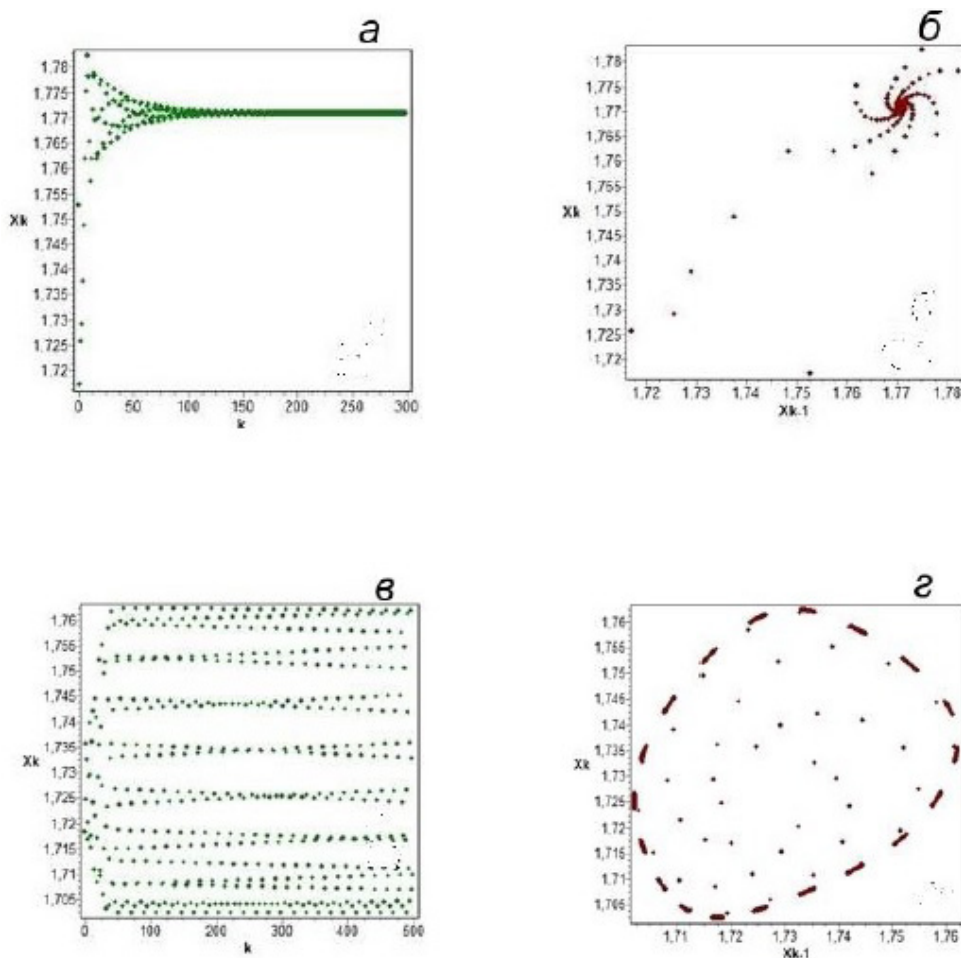


Рис. 3. Примеры сходящихся и не сходящихся последовательностей рядов параметра отношения скоростей продольных и поперечных волн (x_k): а — устойчивое состояние системы с шестью компонентами в колебательных процессах в зоне мониторинга; б — диаграмма Пуанкаре этого процесса; в — неустойчивое состояние системы с рассинхронизированным колебательным процессом множества отдельных областей; г — диаграмма Пуанкаре этого процесса, отражающая здесь циклический характер колебательного процесса.

ляются одним более сильным процессом. Так, режим с одной колебательной компонентой для выбранного периода времени относится ко всей зоне, а одновременные колебательные компоненты — к разным областям зоны мониторинга. С увеличением числа областей, участвующих в общем колебательном синхронном процессе, уровень устойчивости уменьшается. Совместное рассмотрение типа этих последовательностей и диаграмм Пуанкаре позволяет однозначно определить состояние системы.

Неустойчивое и распадное колебательные состояния среды. Наблюдаются различные проявления нестационарных состояний, отражающих по диаграмме Пуанкаре проявления циклических колебаний различных зон среды или «шумовой» характер колебаний большого числа элементов среды независимо друг от друга (рис. 3в, 3г). Шумы могут не иметь внутренней корреляции, что указывает на потерю целостности системы. Это показывают диаграммы Пуанкаре для неустойчивых состояний. Диаграмма Пуанкаре распадного состояния имеет, как правило, всего две — три точки, что говорит о полной потере информации о системе, то есть ее распаде. В этот период происходят быстрые изменения параметров среды во многих локальных зонах (Гуфельд, Новоселов, 2015). Для фонового процесса наиболее длительное время занимает режим распадного колебательного состояния среды.

Представленные данные, а также проведенный анализ региональных сейсмических процессов в зонах Курильских и Японских о-вов и в Чили, позволяет говорить о том, что в зоне субдукции мы имеем земную кору с распределенными локальными источниками энергии, возбуждение которых возможно за счет вертикального переноса энергии восходящим потоком водорода. Колебательный режим этих источников может быть синхронизированным (рис. 3а, 3б) или рассинхронизированным (рис. 3г, 3д) на различных масштабах. Наблюдаемые скорости вариаций параметров среды исключают основное действие медленных тектонических сил, связанных с движением блоков или плит. Движущей силой сейсмичности различной энергии являются процессы разномасштабного колебательного режима элементов среды, наложенные на весьма медленные тектонические движения блоковых систем относительно друг друга. Разномасштабный и непрерывный колебательный режим в среде отражает возбуждение бегущих «деформационных волн». Источниками «деформационных волн» являются обратимые структурные преобразования, связанные с прохождением легких газов через твердую фазу (Гуфельд, Новоселов,

2014, 2015). Именно это указывает на то, что очень трудно или даже невозможно выделить границы того или иного участка коры и соответствующие граничные условия.

Процесс синхронизации колебательного режима локальных областей в фокальной зоне может быть одним из основных условий реализации сильных сейсмических явлений за счет быстрой подвижки вдоль крупномасштабной граничной структуры. Заметим, что устойчивость системы (среды) отражает весьма важное ее состояние, при котором сложнейшая по распределенным в объеме различным параметрам система становится управляемой действующими процессами на определенный период, и при этом блокируются процессы, поддерживающие неустойчивый и распадный режимы.

Реализация двух основных режимов колебательных процессов, отражающих сейсмические явления, распределенные по всей зоне, и проявляющиеся в короткое время в виде слабых сейсмических явлений в локальной пространственной зоне, отражает особенности процессов в зоне субдукции, обусловленные ее структурой. Первый режим отражает фоновый сейсмический процесс, характеризующийся рассинхронизированными колебательными движениями многих элементов среды в масштабах региона. Второй режим отражает локализацию процессов на весьма короткое время и подтверждает идеи синхронизации колебательных движений многих элементов среды зоны субдукции в региональном масштабе. В период этого режима, как показывает анализ каталогов Камчатского региона (Каталоги, <http://www.emsd.ru/ts/>), Курил (Землетрясения ..., 2006–2009), Японии (JMA Earthquake..., 2011), а также Чили, наиболее вероятны сильнейшие сейсмические события (Гуфельд, Новоселов, 2016).

Анализ данных сейсмического режима Камчатского региона показывает, что в фоновый период сейсмические события с магнитудой 5–6.5 происходили при устойчивом колебательном состоянии в областях с поперечным размером 1.5–2° и после распада колебательного состояния. Переход к режиму ЛСУ также реализуется в период устойчивого колебательного состояния. В переходный период могут происходить сейсмические события разной энергии. Но это не предвестники. Это лишь конец фонового режима. Этот переход очень короткий. По данным Камчатского каталога этот переход лежит в пределах от нескольких часов до суток. Причем сам переход «виден» только через некоторое время, когда установится синхронизированное состояние (плато по времени). Продолжительность ЛСУ состояния наблюдали от нескольких суток до 5–6 недель. Сильнейшие сейсмические

события происходят в период ЛСУ после распада устойчивого колебательного состояния среды. Причем возможен кратковременный инкубационный период. Возможности анализа сеймотектонической ситуации и краткосрочного предупреждения о сейсмической опасности процессов в зоне субдукции проиллюстрируем на примерах. При этом эпицентральная зона возможных событий определяется достаточно точно по координатам ЛСУ.

МОНИТОРИНГ СИЛЬНЕЙШИХ И МЕГАСЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ

Представим ряд ситуаций в период подготовки и протекания сильнейших и мегасейсмических событий, которые мы относим к типичным. При этом мы можем говорить на основе уже накопленного опыта, что спектр ситуаций значительно шире и оценка значимости опасности в различные моменты может делаться с учетом данных мониторинга всей региональной зоны.

Кроноцкие сейсмические события, Камчатка. 5 декабря 1997 г. 11 ч 26 мин, $M = 7.9$, координаты 54.64° с.ш., 162.55° в.д. Средние значения координат ЛСУ — 55.1° с.ш. и 162.8° в.д. (реальные размеры ЛСУ составляли $\pm 0.35^\circ$ по широте и $\pm 0.50^\circ$ по долготе). Период времени между началом ЛСУ и событием ~50 часов. Через несколько часов произошло еще одно событие — 5 декабря 1997 г. 18 ч 48 мин, $M = 6.4$, координаты 53.6° с.ш., 161.84° в.д. Средние значения намечающегося ЛСУ — соответственно 53.8° с.ш. и 161.5° в.д. Переход к режиму ЛСУ сопровождался не значимым сейсмическим событием. Ряды измеряемых параметров V_p/V_s формировали по измерениям на сейсмических станциях Камчатской региональной сейсмологической сети: SPN (Шипунский, координаты 53.06° с.ш., 160.0° в.д.), МКЗ (Мыс Козлова, 54.33° с.ш., 161.43° в.д.) и КВТ (Крутоберегово, 56.12° с.ш., 162.49° в.д.) от сейсмических событий из зоны, ограниченной по широте $53\text{--}57.9^\circ$ с.ш. и по долготе $160\text{--}163.2^\circ$ в.д. Гипоцентры событий здесь и далее выбирались выше 50 км. На рис. 4 показаны особенности развития процессов для Кроноцких событий в течение примерно одного года до них, на рис. 5 — тонкая структура колебательных процессов непосредственно перед событиями по данным этих трех станций. На фоновом периоде идет чередование устойчивого и распадного состояния. Длительное устойчивое состояние среды предшествовало появлению ЛСУ. Здесь и ниже устойчивое состояние лежит в пределах $0\text{--}1$, неустойчивое и распадное состояние — $0\text{--}(-1)$. Параметр неустойчивости всегда был близок к нулю, что видно на рисунках. По оси

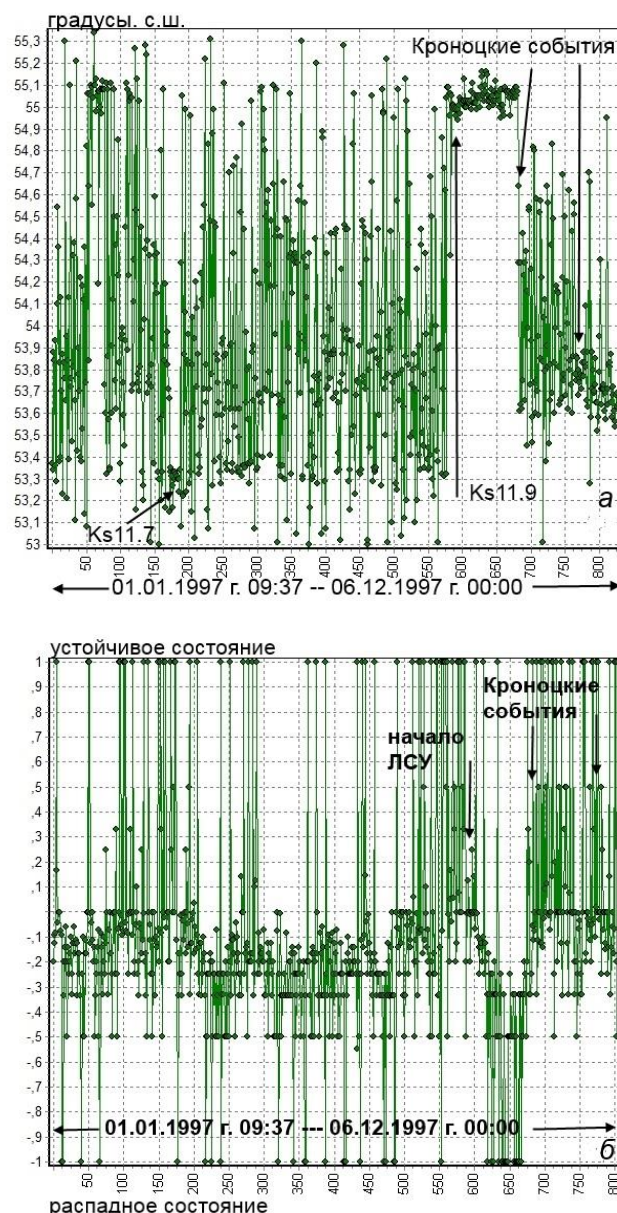


Рис. 4. Колебательный режим сейсмического процесса в период Кроноцких событий и им предшествующий (а) и режим состояния среды по анализу данных станции SPN (б).

абсцисс здесь и ниже обозначены число, месяц, год, часы, минуты. Ситуации по всем станциям почти идентичны, что указывает на однородность параметров среды и идентичность процессов в этот период. Отдельные моменты здесь и на всех других рисунках выделены стрелками с указанием суток, месяца, года, часа, минут, магнитуды, энергетического класса.

Четко выделяется короткий период перехода фонового режима к режиму ЛСУ. Первое Кроноцкое событие можно было ожидать после распада устойчивого колебательного режима. Предупреждение о его возможности по данным трех станций можно было дать примерно через 15–20 часов после начала режима ЛСУ с указанием положения эпицентральной зоны.

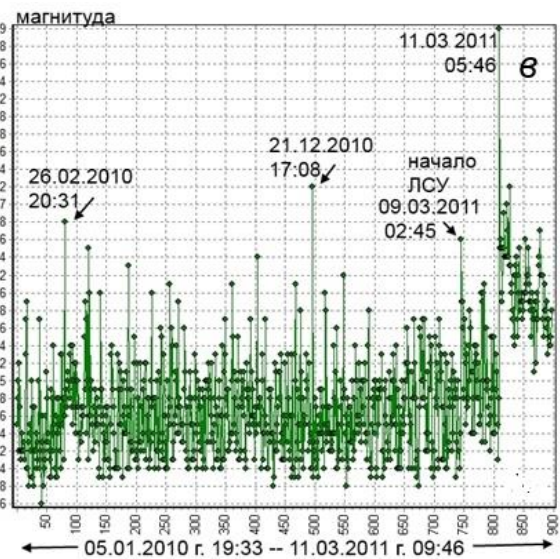
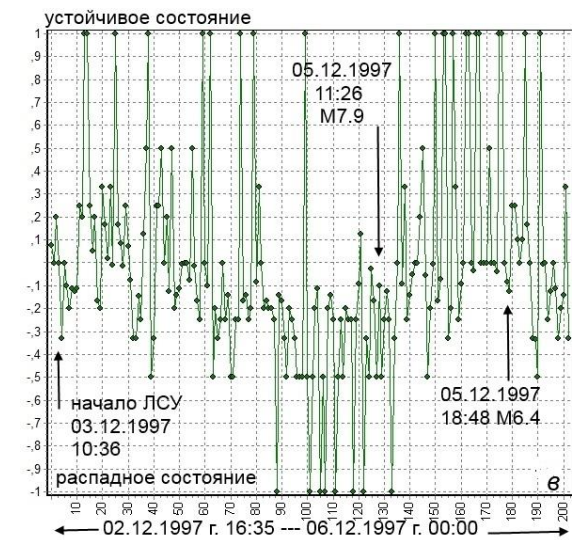
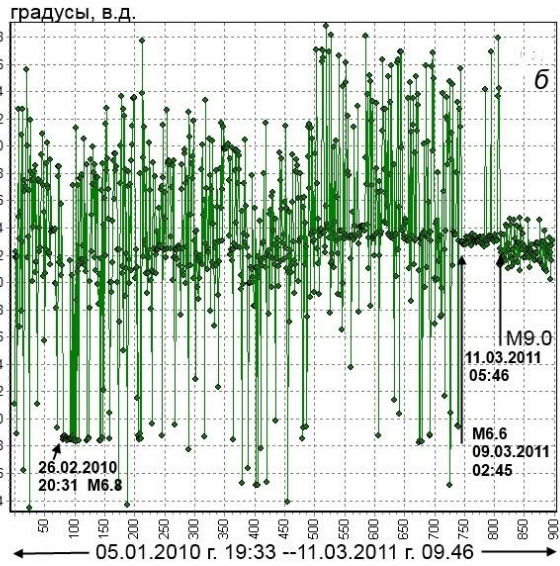
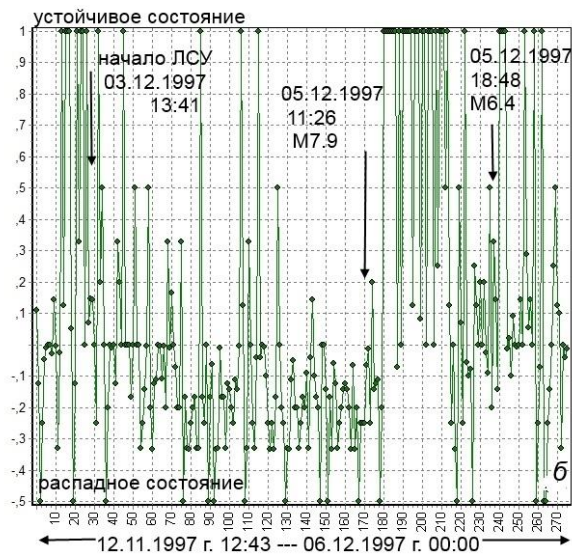
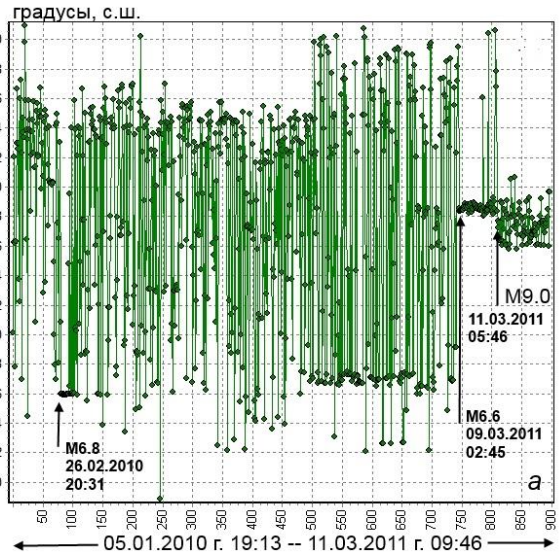
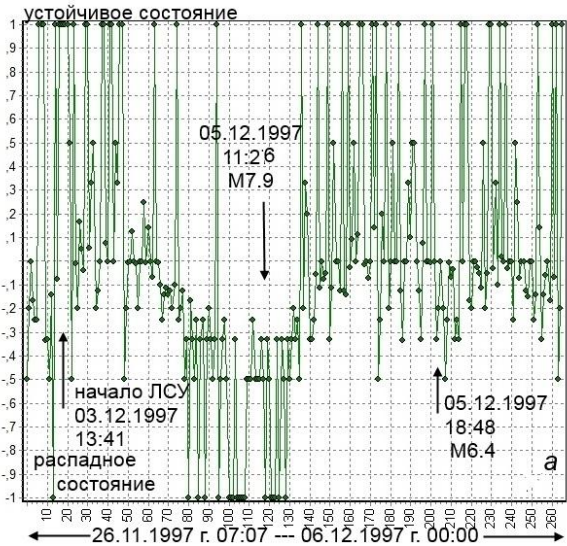


Рис. 5. Тонкая структура устойчивого и распадного состояния среды непосредственно перед и в период существования ЛСУ соответственно по данным станций SPN (а), МКЗ (б) и КВТ (в).

Рис. 6. Колебательный режим сейсмического процесса в период мегасобытия в Японии 11 марта 2011 г.: а — широта-время; б — долгота-время; в — сейсмический процесс в этот период.

Необходимо обратить внимание на положение эпицентральной зоны второго Кроноцкого события и отсутствие афтершокового процесса в зоне первого события.

Великое Японское событие (Тохоку). Время: 11 марта 2011 г., 11 ч 03 мин, $M = 9$, координаты события 38.56° с.ш., 142.51° в.д. Среднее значение координат ЛСУ 38.5° с.ш. и 143.2° в.д. Переход из фонового режима к режиму ЛСУ сопровождался событием с $M = 6.6$ 9 марта 2011 г. в 02 ч 45 мин. Его координаты 38.56° с.ш. и 143° в.д. От начала ЛСУ до главного события прошло около 50 часов (рис. 6). Предупреждение об опасности можно было дать примерно через 15–20 часов после начала режима ЛСУ с указанием на положение эпицентральной зоны. Однако заметим, что реально главное событие, также как и первое Кроноцкое событие, могли произойти и раньше и позже в период ЛСУ. Период ожидания может

уточняться по параметрам устойчивости состояния среды.

Серии сейсмических событий мая–июня 1998 г. (рис. 7а). Камчатка. Речь идет о четырех сейсмических событиях: 1. 27.05.1998 г., 20 ч 45 мин, $K_s = 12.1$, 52.04° с.ш.; 2. 28.05.1998 г., 04 ч 50 мин, $K_s = 13.3$, 51.81° с.ш.; 3. 01.06.1998 г., 05 ч 34 мин, $K_s = 13.8$, 52.81° с.ш.; 4. 15.06.1998 г., 09 ч 26 мин, $K_s = 11.8$, 52.76° с.ш.. Особенностью этой ситуации является «перескок» более сильного события в зону, где намечается новый ЛСУ. Такая ситуация является типичной для этого региона. Еще раз обратим внимание на реализацию второго Кроноцкого события. Ситуация схожа (особенности такого режима и их природа являются предметом будущих исследований). На рис. 7б показана тонкая структура колебательных процессов для этого периода. Колебательный режим оценивался по измерениям

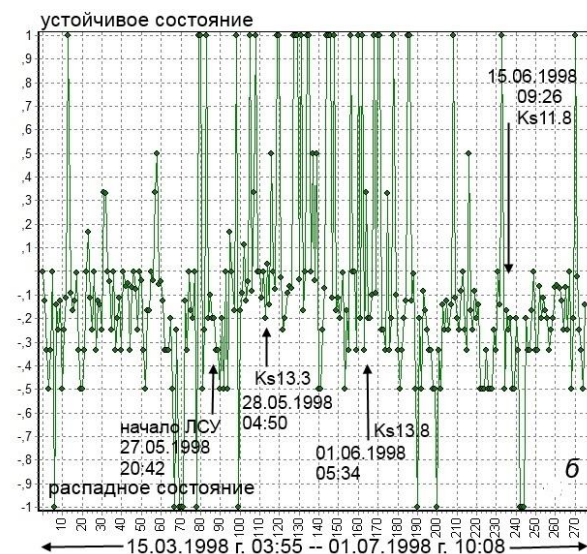
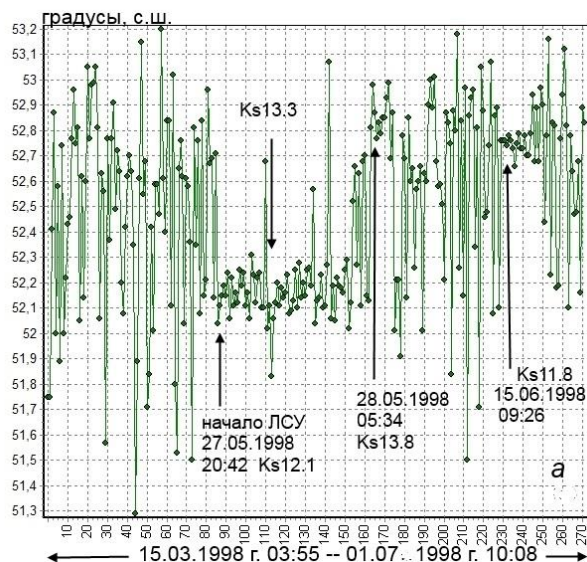


Рис. 7. Колебательный режим сейсмического процесса с серией сейсмических событий (а) и картина состояния среды (б). Камчатский регион.

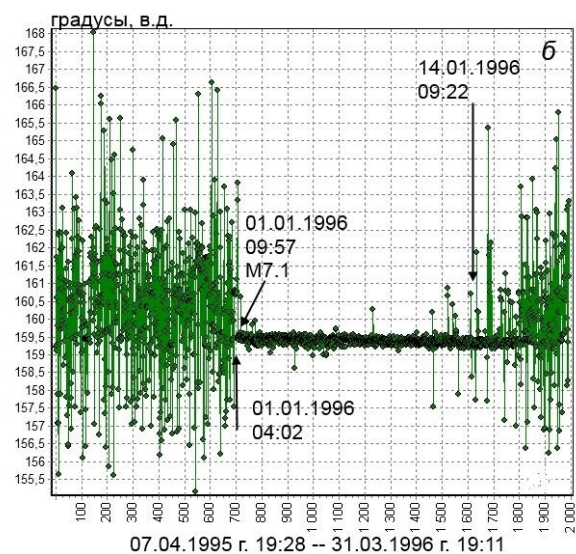
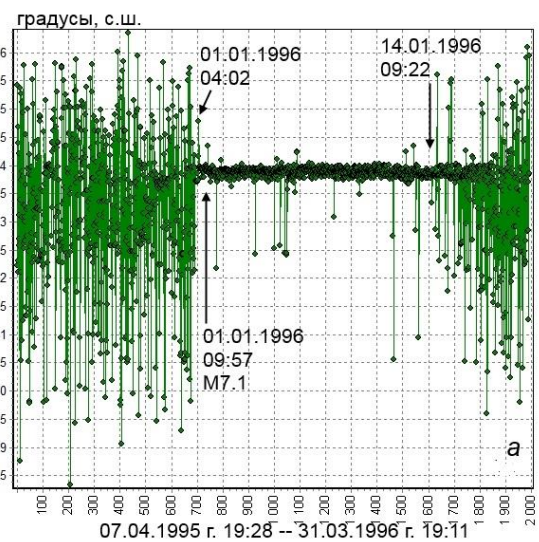


Рис. 8. Региональные особенности колебательного режима сейсмического процесса с эпицентральной зоной на Камчатке. Длительный режим ЛСУ: а — широта–время; б — долгота–время.

V_p/V_s на сейсмической станции Камчатской сети РЕТ (Петропавловск). Устойчивый колебательный режим с перерывами характерен отдельным периодам ЛСУ и сильнейшего сейсмического события. Распадный колебательный режим наблюдался в предшествующий фоновый период и продолжился после окончания серии событий. Учитывая появление устойчивого состояния среды с началом режима ЛСУ, предупреждение, по нашему мнению, можно было дать уже через несколько часов с указанием положения возможной эпицентральной зоны и отменить его в период 1–3 июня 1998 г.

Сейсмическое событие на Камчатке. Время 01.01.1996 г. 09 ч 57 мин, $M = 7.1$, 53.88° с.ш., 159.44° в.д., глубина 40 км (рис. 8, 9). Отметим, что продолжительность ЛСУ более 14 суток.

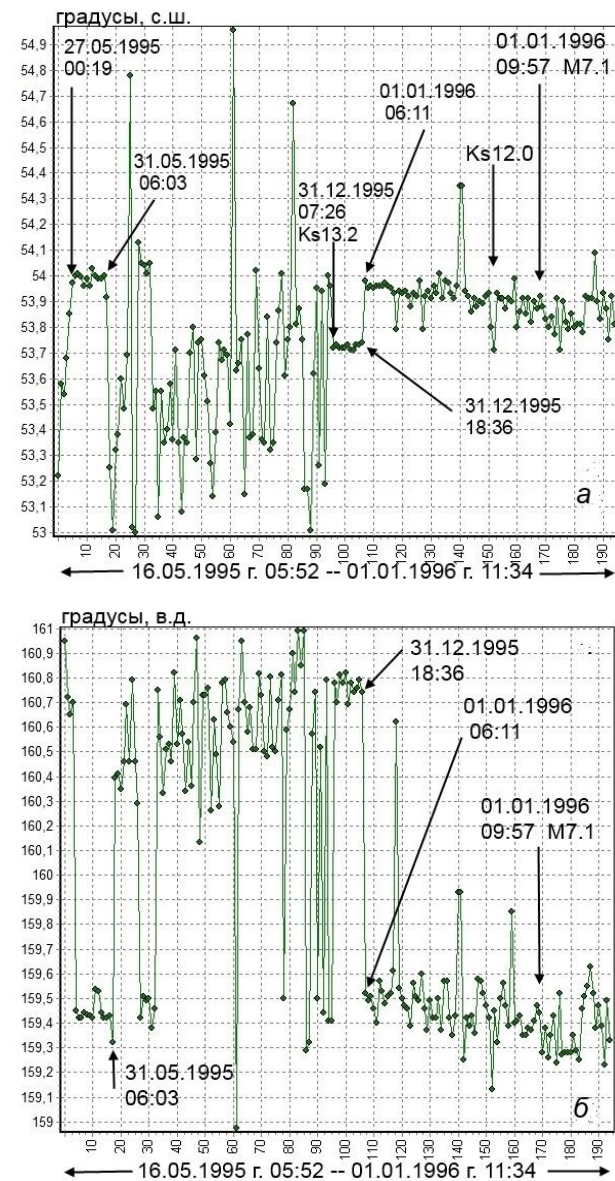


Рис. 9. Детальная структура колебательного режима сейсмического процесса в переходный период от фонового состояния к режиму ЛСУ (по рис. 8): *а* — широта–время; *б* — долгота–время.

По-видимому, формирование ЛСУ было предопределено процессами в конце мая 1995 г. (рис. 9). Оценка колебательного режима в зоне ЛСУ, рассчитанная по данным V_p/V_s для станций SPN и РЕТ (Петропавловск, координаты 53.01° с.ш., 158.39° в.д.), показана соответственно на рис. 10. По станции РЕТ (рис. 10*б*) до начала ЛСУ фиксируется распадный режим, то есть чисто фоновый процесс. Колебательный режим процесса по станции SPN (рис.10*а*) в фоновый период не указывал на серьезную сейсмическую опасность, что было видно по параметрам сейсмичности. Начало же ЛСУ совпадало по данным двух станций. Учитывая данные о колебательном состоянии среды по станции РЕТ и вероятного попадания в эпицентральной зону (если это было бы) серьезной инфраструктуры, то предупреждение, по нашему мнению, необходимо

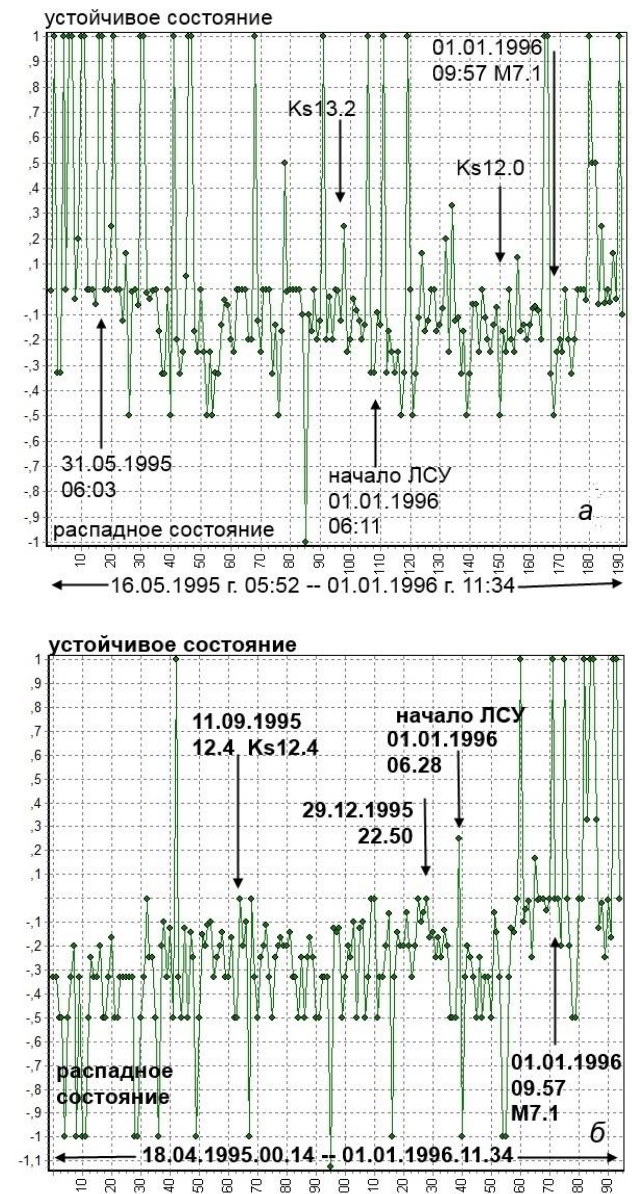


Рис. 10. Динамика изменений состояния среды по данным станций SPN (*а*) и РЕТ (*б*).

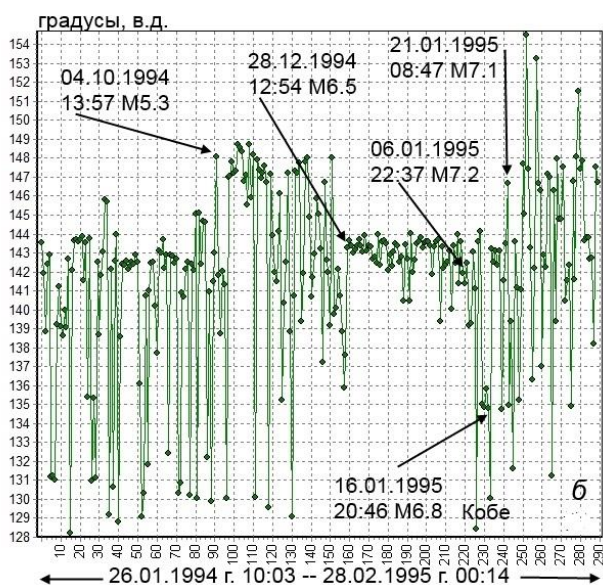
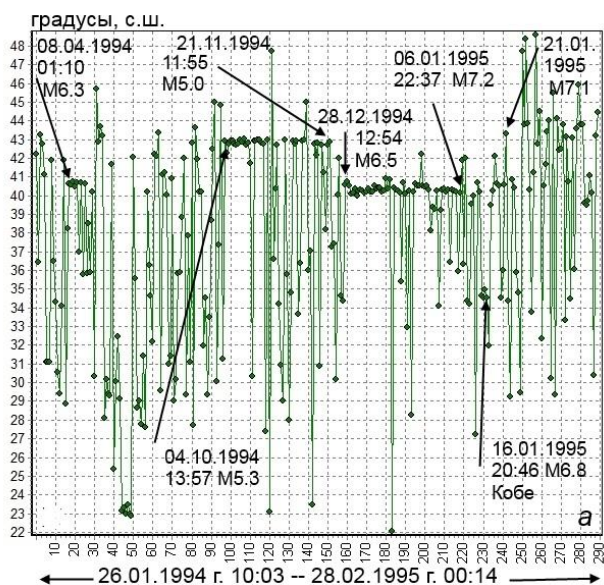


Рис. 11. Особенности колебательного режима сейсмического процесса в г. Кобе (Япония): а — широта-время; б — долгота-время.

было бы давать в пределах одного часа после начала режима ЛСУ. Основное сейсмическое событие произошло через 3.5 часа. Фактически речь идет о необходимости оперативной реакции на сейсмическую опасность.

Для сравнения покажем развитие сейсмического процесса в районе г. Кобе в Японии на о. Хонсю (16.01.1995 г. 20 ч 46 мин, $M = 6.8$, 34.65° с.ш., 134.99° в.д., глубина 17 км (рис.11). Заметим, что ряд зон по широте прорабатывался достаточно долго.

Событие в зоне г. Кобе на первый взгляд выглядит случайным, если не учитывать разномасштабный колебательный процесс всей зоны. Такой перескок сейсмического события в

соседнюю зону наблюдается в Камчатской зоне. Необходимо учитывать, что здесь приведены лишь качественные представления без учета событий меньшей силы и не делались оценки состояния среды по уравнению эволюции.

Анализ данных Камчатского каталога сейсмических событий за 1962–2012 гг. (Каталоги, <http://www.emsd.ru/ts/>) показывает, что сеймотектонические ситуации могут быть очень разными. Так, наблюдалось появление зоны с ЛСУ, в период которого значимых событий не происходило. Или, сильнейшим событием начиналась сама зона ЛСУ. Последнее наблюдали чаще для событий в зоне $55.5\text{--}56.5^\circ$ с.ш., то есть в зоне границ Тихоокеанской и Североамериканской плит.

Представленные примеры показывают всю сложность развития и протекания сейсмического процесса в зоне субдукции. Для их идентификации необходим непрерывный мониторинг параметров динамики среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что на основе физических представлений о сеймотектоническом процессе в зоне субдукции могут быть реализованы алгоритмы диагностирования состояния среды. В приведенных примерах сильнейшие сейсмические события, в том числе мегасобытия, не стали бы неожиданными и предупреждения о них для вероятных эпицентральных зон могли быть использованы. При этом необходимо понимать, что период окончания опасности нельзя заранее указать точно, однако положение вероятной эпицентральной зоны может быть указано почти точно. Нельзя определенно говорить также о возможной магнитуде событий. Однозначно можно говорить о вероятности событий с магнитудой большей шести, являющихся опасными только для материковой части. Однако можно утверждать, что появление периода ЛСУ уже является признаком наиболее вероятной серьезной сейсмической опасности. Обнаружение положения зоны ЛСУ и мониторинг параметров колебательного режима среды в переходный период и период ЛСУ позволит ограничить интервал времени максимальной сейсмической опасности в конкретной зоне, а не в регионе в целом. Причем необходимо учитывать, что развитие процесса не может быть детерминированным. Также здесь становится понятной так называемая проблема «форшоков». Сейсмические события различной энергии в переходный к ЛСУ период являются типичными, поэтому прогнозирование по такому «форшоку» возможного сильнейшего или мегасобытия не является обоснованным. Энергия «форшока» случайна.

Фактически пространственное положение плато показывает вероятную эпицентральною зону на краткосрочный период опасности. Формирование такой зоны еще не означает, что обязательно может произойти мегасобытие. Мы полагаем, что для зоны субдукции, судя по результатам нашего анализа многолетних данных, необходимо оценивать только возможность мегасобытий с магнитудой ≥ 8 . Естественно возникает вопрос о времени ожидания такого события в период ЛСУ. Время ожидания в несколько суток вполне приемлемо для принятия решений об опасности (на примере проявления первого Кроноцкого события и мегасобытия в Японии 11 марта 2011 г.). Существенно же большие времена, например, для Симуширских событий (Гуфельд, Новоселов, 2016), требуют соответствующих уточнений. Диагностирование сейсмической опасности на краткосрочный период в конкретной зоне ЛСУ представляется обоснованным на нынешнем уровне наших знаний о среде.

В то же время фоновая ситуация в зоне субдукции может диагностироваться достаточно надежно. Для каждой локальной зоны (по широте не более $2\text{--}2.5^\circ$) Камчатского региона могут использоваться для оценки ситуаций не меньше двух–трех сейсмических станций, контролируя в разных направлениях волновое поле структурно-чувствительных скоростей сейсмических волн. Как показал анализ, это существенно уменьшит время тревог. Однако «внезапность» формирования ЛСУ показывает необходимость непрерывного пошагового мониторинга ситуаций, то есть оценку ситуаций после каждого фонового сейсмического события.

Отдельно нужно говорить о коровых сейсмических событиях на Камчатке (1 января 1996 г.), на Курильских островах, в Японии (например, событие в Кобе 16 января 1995 г. или события на Кюсю 14–15 апреля 2016 г.) и на Тайване (6 февраля 2016 г.). Эти зоны объединяет один тип коры — континентальный. Предупреждение о таких событиях остается серьезной проблемой. В настоящее время сеть мониторинга (деформация, гидрорежим, геохимия, геофизические поля и др.), расположенная на коре континентального типа, мало что дает для мониторинга краткосрочной сейсмической опасности в зоне субдукции. Многолетний наблюдательный опыт это подтверждает. Исключением является сейсмологический мониторинг. Вопрос не в том, что локальные геофизические или другие методы мониторинга не адекватны. Вопрос в другом. Какие крупномасштабные процессы в областях, расположенных на коре континентального типа, например, на Камчатке или Японских о-вах, мы могли бы контролировать. Сейчас же контро-

лируются возмущения различных локальных полей, связь которых с тектоническими процессами в среде зоны субдукции не прослеживается. Для нас же очевидно, что континентальная кора островов и зона субдукции оказывают друг на друга небольшое влияние. Иначе мониторинг областей, расположенных на коре континентального типа (деформация, гидрорежим, геохимия, геофизические поля), был бы в большей мере информативен для краткосрочной оценки ситуаций в зоне субдукции.

Благодарности. Авторы благодарны рецензентам, взявшим на себя непростой труд по оценке совершенно новых представлений о сейсмическом процессе в зоне субдукции, и их замечания мы будем учитывать в дальнейшей работе. Особую признательность выражаем ФИЦ ЕГС РАН и его Камчатскому филиалу, каталоги которых мы использовали в работе. Наша особая благодарность А.Ю. Чебровой за подготовку каталогов по различным сейсмическим станциям Камчатского региона. Авторы благодарны руководителю сейсмологической службы Чили Sergio Barrantos (Серхио Баррентос), любезно предоставившего материалы сейсмического мониторинга за 2013–2015 гг.

Список литературы

- Вертикальная аккреция земной коры: факторы и механизмы / Под ред. М.Г. Леонова. М.: Наука, 2002. 462 с.
- Гуфельд И.Л., Афанасьев А.В., Афанасьева В.В., Новоселов О.Н. Триггерные эффекты сейсмотектонического процесса в динамически меняющейся геологической среде // ДАН. 2010. Т. 433. № 1. С. 92–96.
- Гуфельд И.Л., Матвеева М.И. Барьерный эффект дегазации и деструкция земной коры // ДАН. 2011а. Т. 438. № 2. С. 253–258.
- Гуфельд И.Л., Матвеева М.И., Новоселов О.Н. Почему мы не можем осуществить прогноз сильных коровых землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2011б. Т. 2. № 4. С. 378–415.
- Гуфельд И.Л. Геологические следствия аморфизации структуры литосферы и верхней мантии, вызванные водородной дегазацией // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 4. С. 417–435.
- Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Сейсмический процесс в зоне субдукции. Мониторинг фонового режима. М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2014. 100 с.
- Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Безбарьерный сейсмический процесс в зоне субдукции и принципы его мониторинга // ДАН. 2015. Т. 464. № 6. С. 716–721.

- Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н.* Диагностирование предкатастрофических состояний среды зоны субдукции, предшествующих сильнейшим и мегасейсмическим событиям // ДАН. 2016. Т. 468. № 6. С. 694–698.
- Землетрясения России в 2006–2009 годах / Главный редактор А.А. Маловичко. Обнинск: ГС РАН, 2006. 112 с.; 2007. 220 с.; 2008. 140 с.; 2009. 216 с.
- Каталоги Камчатского филиала Геофизической службы РАН. <http://www.emsd.ru/ts/>.
- Летников Ф.А.* Флюидный режим эндогенных процессов в континентальной литосфере и проблемы металлогении / Проблемы глобальной геодинамики / Под ред. Д.В. Рундквиста. М.: ГЕОС, 2000. С. 204–225.
- Николаевский В.Н.* Дилатансия и теория очага землетрясения // Успехи механики. 1980. Т. 3. № 1. С. 70–101.
- Николаевский В.Н.* Земная кора, дилатансия и землетрясения // Дж. Райс. Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. С. 133–215.
- Новоселов О.Н.* Идентификация и анализ динамических систем. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2010а. 424 с.
- Новоселов О.Н.* Идентификация состояния динамических объектов по измеряемым параметрам: от теории к практике // Измерительная техника. 2010б. № 2. С. 20–23.
- Новоселов О.Н.* Общие свойства динамических систем: от измерений к уравнению // Измерительная техника. 2014. № 2. С. 24–27.
- Новоселов О.Н., Гуфельд И.Л.* Прогнозирование состояния динамической системы по результатам измерений // Измерительная техника. 2015. № 10. С. 11–15.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
- Славина Л.Б., Мячкин В.В., Левина В.И.* Опыт применения кинематических предвестников сейсмического поля для прогноза землетрясений на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки / Отв. ред. Е.И. Гордеев и В.Н. Чебров. М.: Наука, 2005. С. 216–227.
- Чебров В.Н., Салтыков В. А., Серафимова Ю.К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке. М.: Светоч плюс, 2011. 304 с.
- JMA Earthquake Catalog (Japan Meteorological Agency, 1926.1.1–2011.1.1). 2011.

THE MONITORING OF MEDIA STATE IN THE SUBDUCTION ZONE. POSSIBILITIES FOR SHORT-TERM SEISMIC HAZARD ESTIMATION

I.L. Gufeld¹, O.N. Novoselov²

¹*Schmidt Joint Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, 123995*

²*Moscow State Technical University named for N.E. Bauman, Moscow, 105005*

The paper considers the non-barrier seismic process in the subduction zone associated with the violation of accommodation of elements in the active medium relative to each other. The authors use special methods for the monitoring of media with internal sources of energy controlled hydrogen degassing. Two main modes of oscillatory processes were revealed in subduction zones. Based on the analysis of the seismicity of the Kuril-Kamchatka area and the Japanese Islands the authors show short-term features of the oscillatory mode of the environmental elements prior to possible megaseismic events. The reliability of conclusions is confirmed by the solutions analysis of the evolution equation of the medium state. The investigation resulted in diagnosis of pre-catastrophic state of the medium, which allows controlling the transition from the background into the short-term mode with the highest probability of the strongest seismic events as well as detecting in short-term hazard the epicentral area of the strongest seismic events in subduction zones.

Keywords: megaseismic events, seismic process, short-term seismic hazard, subduction zone.