

ТЕХНОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНТРОПИИ

© 2017 г. С. Ц. Акопян^{1, *}, В. Г. Бондур^{2, ***, Е. А. Рогожин^{1, **}}

¹Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

²Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос”, г. Москва

*E-mail: sakopian@yandex.ru

**E-mail: eurog@ifz.ru

***E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 29.09.2015 г.

В статье описывается технология мониторинга и прогнозирования землетрясений, разрабатываемая для территории России на основе метода сейсмической энтропии. Такая технология, основанная на сейсмостатистике, позволяет автоматизировать систему мониторинга и эффективно подключать наземные и наземно-космические сети наблюдений за оперативными предвестниками. Описаны основные сейсмические системы, ответственные за подготовку сильных землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$. Для каждой сейсмической системы построены трековые и энергетические диаграммы, позволяющие делать мониторинг подготовки и прогноз сильных землетрясений в режиме реального времени. Выявлены 44 сейсмические системы, контролирующие практически все сейсмоопасные регионы России, которые были апробированы в реальном масштабе времени с 2010 по 2015 гг. Разработано руководство практического применения результатов мониторинга и прогноза.

DOI: 10.7868/S0002333717010021

ВВЕДЕНИЕ

Технология мониторинга и прогноза землетрясений, для практического применения в идеале должна удовлетворять следующим условиям [Акопян, Попов, 2010]: иметь теоретическое обоснование; должна позволять делать мониторинг на всех стадиях подготовки (долгосрочном, среднесрочном, краткосрочном); быть универсальной и прозрачной; надежной, в заранее оговоренных рамках применимости; позволять со временем увеличивать точность прогнозов и комплексно подключать наземные [Соболев, Пономарев, 2003], наземно-космические методы наблюдений [Бондур и др., 2007; 2009; 2010; Бондур, Зверев, 2005а; 2005б; Бондур, Смирнов, 2005]; апробированной и автоматизированной. Такая технология может быть разработана также на основе метода сейсмической энтропии [Акопян, 1998; Akopian, 2013; Акопян, Рогожин, 2013]. Входной информацией в методе сейсмической энтропии является сейсмостатистика (база данных каталогов землетрясений). Эта информация является самой надежной и универсальной геофизической информацией для организации глобального мониторинга развития сейсмической неустойчивости. Теория сейсмической энтропии, на основе

открытых диссипативных сейсмических систем, позволяет делать мониторинг зарождения сейсмической неустойчивости для любого сейсмоактивного региона, как на суше, так и на океаническом дне без установки дополнительных наземных сетей наблюдений [Akopian, 2015; Акопян, 2016]. Инstrumentальная сейсмология берет начало с конца XIX века и за последние десятилетия по всему миру накоплена огромная информация о сейсмичности, на основе которой были выявлены дискретные структуры литосферы со сложными конфигурациями на поверхности земли, ответственные за подготовку сильных землетрясений [Акопян, 2007]. Такая технология позволяет комплексно и эффективно подключать на разных этапах наземно-космические сейсмопрогностические наблюдения [Бондур и др., 2009; 2010; 2016а; 2016б], региональные сети наблюдений за оперативными предвестниками [Чебров, 2007; Чебров и др., 2011], использовать результаты геолого-геофизических исследований очагов сильных землетрясений, накопленных за многие десятилетия [Рогожин, 2000; 2001; 2002; Акопян, Рогожин, 2013]. Работа посвящена разработке такой технологии для сейсмоопасных регионов РФ.

МЕТОД СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНТРОПИИ

Теоретические основы метода изложены в работах [Akopian, 2013; Akopian, Kocharyan, 2014; Akopian, 2015; Акопян, 2016]. Для описания динамики подготовки сильных землетрясений в больших объемах геологических сред была введена концепция сейсмической системы (СС). Сейсмическая неустойчивость “созревает” внутри СС, характеризующейся конфигурацией L на поверхности земли, глубиной H , пороговыми магнитудами M_h и M_{th} , разделяющие землетрясения внутри объема системы на микроземлетрясения с $M < M_h$, на землетрясения индикаторы с $M_h \leq M < M_{th}$ и на сильные землетрясения с $M \geq M_{th}$. В статье везде, где не оговорено, под M понимается магнитуда по объемным волнам (M_v). Для описания состояния СС были введены параметры суммарной сейсмической энергии E_c и числа состояний S

$$E_c(t) = \sum_i E_i, \quad (1)$$

$$S(t) = (t - t_{N-1}) E_c - \sum_i (t_i - t_{N-1}) E_i, \quad (2)$$

где t_i и E_i – времена возникновения землетрясений индикаторов и их энергия излучения; t_{N-1} время последнего сильного землетрясения. Параметры (1), (2) рассчитываются на основе выделенных для объема V данных каталогов землетрясений. Для статистической сейсмологии энтропия W была определена по формуле:

$$W = \lg \frac{S}{h_s}, \quad (3)$$

где S вычисляется по формуле (2), а h_s – величина “кванта” сейсмического действия:

$$h_s = E_h \delta t_h = 1 \text{ Дж с}, \quad (4)$$

зависящая от точности измерения времени и энергии землетрясений. Необходимость “квантования” кумулятивного параметра энергии (1) и числа состояний (2) в сейсмологии следует из ограничений сверху на плотность энергии $\epsilon = 10^{-4} \text{ Дж см}^{-3}$, которую может накопить единица объема горной породы [Tsuboi, 1956; Акопян, 1998]. В рамках СС сильные землетрясения объединяются в ансамбли на основе степенного закона производства энтропии [Akopian, Kocharyan, 2014; Акопян, 2016]. Эти ансамбли со временем стремятся заполнить неоднородности внутри СС. Каждое сильное землетрясение ансамбля в СС имеет подготовку, поэтому в пределах одной системы не могут происходить одновременно два сильных землетрясения.

Энергетическая диаграмма – это зависимость энергии (магнитуды) сильных землетрясений ансамбля ($M \geq M_{th}$) от энтропии. Линейное урав-

нения регрессии для однородной сейсмотектонической зоны на энергетической диаграмме имеет вид:

$$K_s = a_s W + b_s, \quad K_s = \lg E_s, \quad (5)$$

где E_s – энергия излучения сильного землетрясения, определяемая через магнитуду [Касахара, 1985], a_s, b_s – константы однородной сейсмотектонической зоны. Для построения энергетических диаграмм необходимо, чтобы в системе завершились хотя бы два сейсмических цикла. Чем больше сильных землетрясений имели место в СС, тем лучше можно описать энергетическую диаграмму. На энергетической диаграмме отображаются динамические свойства основных сейсмоактивных разломов внутри СС, генерирующих сильные землетрясения. Мониторинг энтропии позволяет по энергетической диаграмме прогнозировать, когда система входит в неустойчивое состояние и магнитуду ожидаемого землетрясения в зависимости от приуроченности к тому или иному разлому.

Место и время ожидаемых сильных землетрясений определяется и прогнозируется на основе трековых диаграмм, которые представляют зависимость суммарной выделившейся энергии землетрясений-индикаторов от энтропии. На трековой диаграмме выделяется протяженная эллипсообразная область (аттрактор), внутри которого СС теряет устойчивость и происходит сильное землетрясение. Линейное уравнение регрессии для аттрактора имеет вид:

$$K_c = a_c W + b_c, \quad K_c = \lg E_c, \quad (6)$$

где a_c и b_c положительные константы, отражающие сейсмотектонические особенности региона в целом. Каждое сильное землетрясение ансамбля на трековой диаграмме изображается ступенчатой траекторией, которая, в конечном счете, притягивается в аттрактор и заканчивается сильным землетрясением.

Энергетические и трековые диаграммы (5), (6) строятся ретроспективно, используя накопленную сейсмологическую и сейсмотектоническую информацию за прошедшие годы [Акопян, Рогожин, 2013]. Для прогноза сильных землетрясений осуществляется мониторинг параметров (1), (2). Они рассчитываются на основе данных о землетрясениях индикаторах, которые в оперативном режиме (в среднем спустя час после события) поступают из мировых сейсмологических центров по каналам Интернета. Технология мониторинга и прогноза землетрясений, основанная на методе сейсмической энтропии является универсальной, поскольку для всех сейсмоактивных регионов мира существуют восполняемые в реальном масштабе времени каталоги землетрясений. Предлагаемая технология мониторинга и прогноза прошла испытания в реальном режиме в Интернете

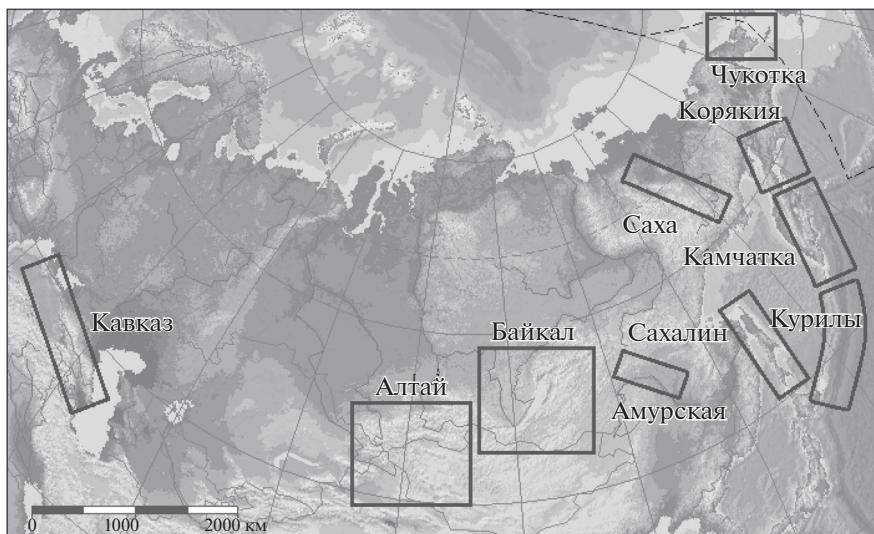


Рис. 1. Сейсмоопасные регионы территории РФ, где выявлены сейсмические системы.

(на сайте www.geoq.ru Центра прогнозирования землетрясений “ГеоКвейк”) для разных регионов мира с 2007 по 2012 гг. и для территории России с конца 2010 по 2015 гг. и показала хороший результат. Достоинства метода заключаются в том, что они позволяют на разных этапах подготовки сильного землетрясения подключать в единую систему мониторинга данные регистрации предвестников по наземно-космическим наблюдениям за деформационными, геолого-геофизическими, геохимическими, метеорологическими и др. полями. В свою очередь, система, разрабатываемая на такой основе, будет иметь и обратный эффект, она позволит поднять эффективность существующих методов мониторинга и прогноза.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ТЕРРИТОРИИ РФ

На рис. 1 приведены 10 сейсмоопасных регионов территории РФ и приграничных стран, где были выявлены СС. Это регионы: Кавказ, Алтай, Байкал, Амурская, Сахалин, Курилы, Камчатка, Корякия, Чукотка и Саха. На рис. 2 схематически приведены СС и сейсмические подсистемы (СПС) (всего 44), выявленные в этих регионах на начало 2015 года. Показаны магнитудные диапазоны сильных землетрясений, за которые они ответственны. Для выявления СС использовались каталоги землетрясений [Новый..., 1977; Поплавская и др., 2006], которые за последние десятилетия дополнялись данными региональных мировых сейсмологических сетей (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>; <http://www.emsc-csem.org/#2>; <http://www.ceme.grsas.ru/index.htm>), а также кинематические плито-блоковые модели регионов. СС считается определенной, если между

кумулятивными параметрами (1) и (2) (или их логарифмами) на стадии подготовки устанавливается зависимость (6), а в конце сейсмических циклов между сильными землетрясениями и землетрясениями индикаторами устанавливается закономерность (5). Это означает, что в конце каждого сейсмического цикла сильное землетрясение (излучением упругой и выделением неупругой энергии) восстанавливает равновесное состояние в объеме геологической среды внутри СС.

В зависимости от изученности регионов, полноты и длительности временных данных каталогов землетрясений, СС (по надежности прогнозов) подразделяются на четыре уровня (табл. 1).

На рис. 2 для каждой системы показан уровень надежности прогнозов на начало 2015 г. Видно, что в основном СС территории России относятся к III и IV уровням надежности. Только на Камчатке и Курилах имеются системы II уровня. Это с одной стороны объясняется относительно слабой сейсмической активностью регионов России, а с другой – отсутствием (неполнотой) данных каталогов землетрясений за инструментальный период (начиная с 1900 г.).

Таблица 1. Надежность прогнозов в СС. N – число завершившихся сейсмических циклов

Уровень надежности прогнозов		N – число циклов
I	надежный	$N \geq 15$
II	хороший	$N \geq 10$
III	посредственный	$N \geq 5$
IV	плохой	N от 2 до 5

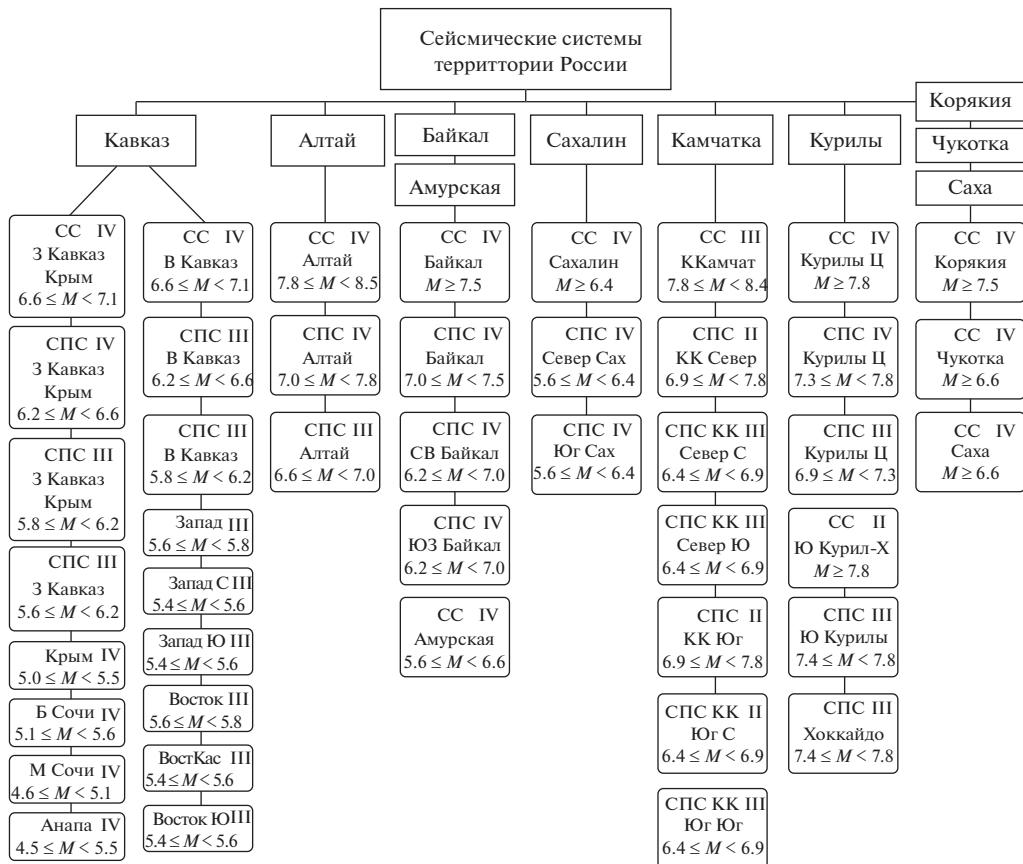


Рис. 2. Сейсмические системы (СС) и подсистемы (СПС), выявленные в 10 регионах на рис. 1 территории РФ. Указан диапазон магнитуд сильных землетрясений, за подготовку которых ответственна система, и уровень надежности прогнозов.

После каждого нового сильного землетрясения в СС число сейсмических циклов N увеличивается, следовательно, улучшается и качество прогноза. Со временем, по мере накопления статистики сильных землетрясений, все СС перейдут на первый уровень надежности. Менее активные СС Амурская, Корякия, Чукотка, Саха имеют всего два завершившихся цикла, причем первый из них ненадежный, поэтому при описании СС они не приводятся.

С 2011 года раз в квартал (а при необходимости и чаще) Бюллетени по прогнозу землетрясений в СС территории РФ, дополненные другими сейсмопрогностическими данными [Рогожин и др., 2011; Славина и др., 2004; Завьялов, 2006] представлялись в Национальный центр управления в кризисных ситуациях (НЦУКС) МЧС РФ. За все время наблюдений в этих Бюллетенях (2010–2015 гг.) три землетрясения были предсказаны (Тувинское, 27.12.2011, $M = 6.7$; Курильское, 16.11.2012, $M = 6.6$; Анапское, 10.12.2012, $m_b = 4.9$). В связи с сейсмическим роем 16–22 мая 2013 г. на Камчатке, был дан (так называемый) отрицательный прогноз. В МЧС РФ было оперативно сооб-

щено (письмо от 23 мая 2013 г.), что сильное землетрясение с $M \geq 7.8$ до глубин 100 км, которое может представить опасность для Петропавловска-Камчатского, не ожидается. Как известно, сильное землетрясение произошло 24 мая 2013 г. вне рамок СС на безопасном расстоянии 400 км Северо-Западнее от Камчатки на глубине 600 км с магнитудой $M = 8.3$. В период с февраля по март 2014 г. был организован детальный ежедневный мониторинг сейсмичности района Большого Сочи, охватывающий период проведения Олимпийских (с 7 по 23 февраля) и Паралимпийских (с 7 по 16 марта) зимних игр. Сейсмическая безопасность Сочи во время Олимпиады была под надежным контролем. Результаты мониторинга и прогноза регулярно докладывались на Российском экспертном совете по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (РЭС). Переходим к подробному описанию СС.

Кавказский регион. На рис. 3 приведена кинематическая плито-блочная модель Тавро-Кавказского региона (векторы скоростей движений и вращений плит указаны по отношению к Евразийской), построенная на основе комплексного

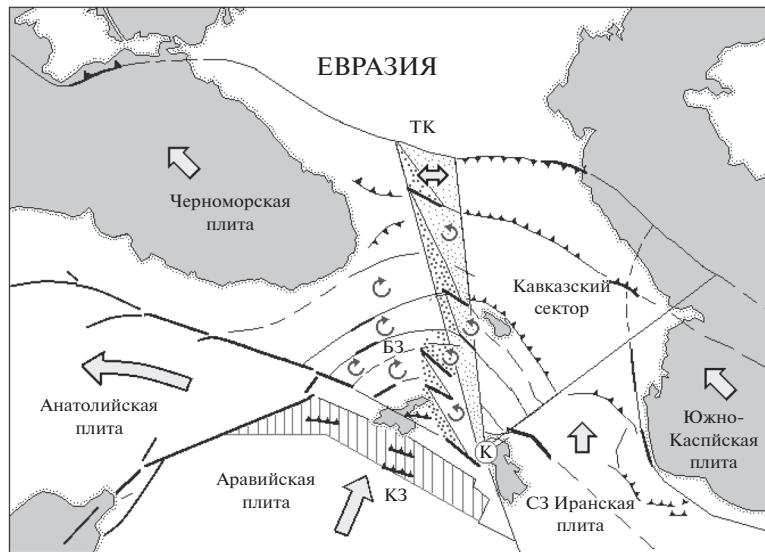


Рис. 3. Схема кинематической модели Тавро-Кавказского региона. Точками отмечена Транскавказская зона растяжения. ТК – Транскавказское поднятие, БЗ – Буферная зона, КЗ – контактная зона (заштрихованная область), К – Курдистанский узел. Стрелками обозначены движения плит по отношению к Евразии. Показаны тенденции вращательных движений микроблоков по и против часовой стрелки. Жирными линиями показаны разрывы в очагах землетрясений с $M > 6.5$.

изучения сейсмичности, механизма очагов землетрясений с $M \geq 5.0$ с привлечением данных сейсмотектоники, линеаментов и распределения сейсмоскоростей в верхней мантии [Акопян, Джагинян, 1992; Асланян и др., 1982; Рогожин, 2002; Jackson, McKenzie, 1984; Copley, Jackson, 2006]. Эта кинематическая модель ответственна за сильные землетрясения с $M > 6.5$. Ключевую роль в перераспределении региональных напряжений, образующихся из-за вклинивания Аравийской плиты в Тавро-Кавказский регион, играет Курдистан-Ван сейсмоактивная контактная зона и Транскавказское поднятие. Механика этой кинематической модели подробно описана в работе [Акопян, Рогожин, 2013].

Максимум региональных напряжений в такой модели концентрируется в Курдистанском узле и затем перераспределяется в Кавказском секторе. Кавказский сектор охватывает большую площадь, включая восточную часть большого Кавказа и малый Кавказ. Блоки внутри этого сектора на севере почти не имеют горизонтальных составляющих скоростей и взаимодействуют в близвертикальном направлении. Система разломов ЮВ–СЗ ориентации внутри этого сектора в районе Армении имеют правосторонние сдвиговые компоненты. Они образуют блоки, имеющие тенденцию вращения против часовой стрелки (рис. 3).

Приведенная на рис. 3 кинематическая модель Тавро-Кавказского региона объясняет с единых позиций механизм перераспределения региональных напряжений и передачу их на большие расстояния. Ранее, на основе этой модели были

выявлены СС верхнего энергетического уровня, позволяющие делать мониторинг сильных землетрясений Армянского нагорья в трех диапазонах магнитуд: $6.6 \leq M < 7.1$, $7.1 \leq M < 7.5$ и $M \geq 7.5$ [Akopian, 1998; Акопян, Рогожин, 2013]. Более детальные исследования сейсмоактивных структур позволили выявить иерархию СС низшего энергетического уровня на Большом и Малом Кавказе. Транскавказское поднятие является западной границей Кавказского сектора. Оно делит Армянское нагорье и Б. Кавказ на две, существенно отличающиеся друг от друга, системы блоков – западную и восточную. На восточном Кавказе в основном происходят сжатия и утолщения коры. В зоне пересечения Кавказа с Транскавказским поднятием происходит деформация Кавказского хребта из-за растяжений в широтном направлении. В работе [Milyukov et al., 2015] выявлено общее укорочение Кавказского региона в размере 1–2 мм/год по отношению к фиксированной Евразии. Это приводит к деформациям и сильным землетрясениям на западном Кавказе и вытеснению в СЗ направлении Черноморской плиты, зажатой между Северо-Анатолийским разломом, Буферной зоной и Евразиатской плитой. Такой процесс периодически откликается в Крыму сильными землетрясениями (Ялтинское землетрясение 1927 г.). Распределение гипоцентров землетрясений индикаторов позволяет найти глубину и конфигурацию СС на поверхности Земли. На западе была выявлена СС З Кавказ–Крым, а на востоке СС В Кавказ с пороговыми магнитудами $M_{th} = 6.2$ и глубинами $H = 60$ км. На рис. 4 по-

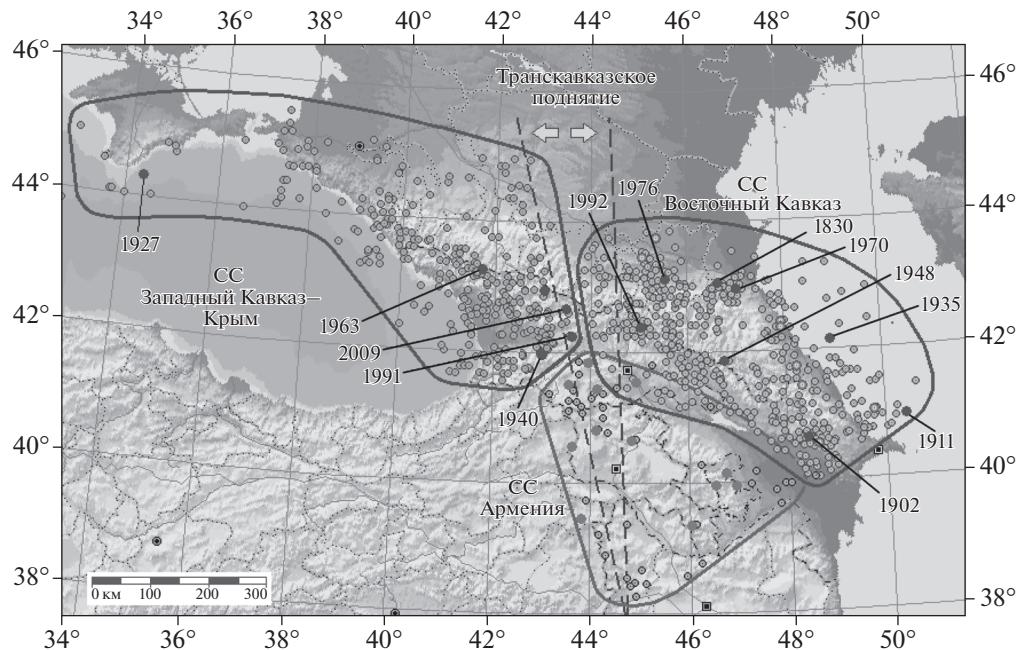


Рис. 4. Конфигурации СС З Кавказ–Крым, В Кавказ и Армения. Светлыми кружочками показаны землетрясения индикаторы, а темными – сильные землетрясения. Пунктирными линиями отмечено Транскавказское поднятие.

казаны конфигурации этих СС, включающие эпицентры, как землетрясений индикаторов, так и сильных землетрясений. СС З Кавказ–Крым охватывает контактную зону между Черноморской и Евразиатской плитами. СС В Кавказ занимает северную часть Кавказского сектора. Эти системы с юга граничат с СС Армения ($M_{th} = 6.2$), охватывающая южную часть Кавказского сектора. Три СС на рис. 4 охватывают всю сейсмоактивную территорию на севере Аравийской плиты и ответственны за подготовку местных сильных землетрясений с магнитудами $6.2 \leq M_{th} \leq 6.7$. Одновременно, землетрясения в системе Армения и в системе В Кавказ являются индикаторами для сильных землетрясений с $M \geq 6.6$ Армянского нагорья и Северо-Анатолийского разлома.

На рис. 5 приведены трековые и энергетические диаграммы СС З Кавказ–Крым и В Кавказ с пороговыми магнитудами $M_{th} = 6.2$. Там же показаны уравнения (5) и (6) для этих систем, коэффициенты которых рассчитаны методом регрессии по точкам неустойчивости сильных землетрясений. На рис. 5а, 5б видно, что наибольшие усилия СС З Кавказ–Крым тратят на подготовку землетрясений на западе системы, в районе Крыма. Ялтинское землетрясение 1927 г. имеет наибольшую энтропию. Схема передачи напряжений от зоны ТК поднятия в сторону Крыма приведена на рис. 6. Такая передача напряжений и зарождение неустойчивости в Крыму контролируется трековой и энергетической диаграммой. По трековой диаграмме видно, что на июль 2015 в систе-

ме не опасно, траектория подготовки неустойчивости мигрирует от зоны очага землетрясения 1963 г. в сторону очага Ялтинского землетрясения 1927 г. Для СС рассчитывалась динамическая вероятность P подготовки сильных землетрясений:

$$P = P_K P_W, \quad (7)$$

где P_K – вероятность по кумулятивной энергии, P_W – вероятность по энтропии, определялись посредством распределения Гаусса [Akopian, 2015].

Динамика роста вероятности (7) в системе приведена на рис. 7а. Видно, что вероятность P_K высокая, а P_W низкая. При постоянном P_K эти вероятности сравняются к 2024 г., и тогда вероятность землетрясения P будет максимальной.

На рис. 6 показаны механизмы очагов Чхалинского землетрясения 1963 г. и Рачинского землетрясения 1991 г., в которых преобладают вертикальные движения со слабой правосторонней сдвиговой компонентой. Эти механизмы очагов подтверждают передачу напряжений от зоны ТК к западу. На рис. 5б видно, что траектория подготовки сильного землетрясения в системе ($M \geq 6.2$) только к 2028 г. приблизится к атTRACTОРУ. В течение этого времени (13 лет) средняя скорость перемещения напряжений на запад будет ~ 38 км в год. За этот период потенциально опасной будет область А на рис. 6 (отмечена штрихованной). Здесь могут произойти землетрясения с магнитудами $M \sim 5.0$. Такие землетрясения могут представлять опасность для технических соору-

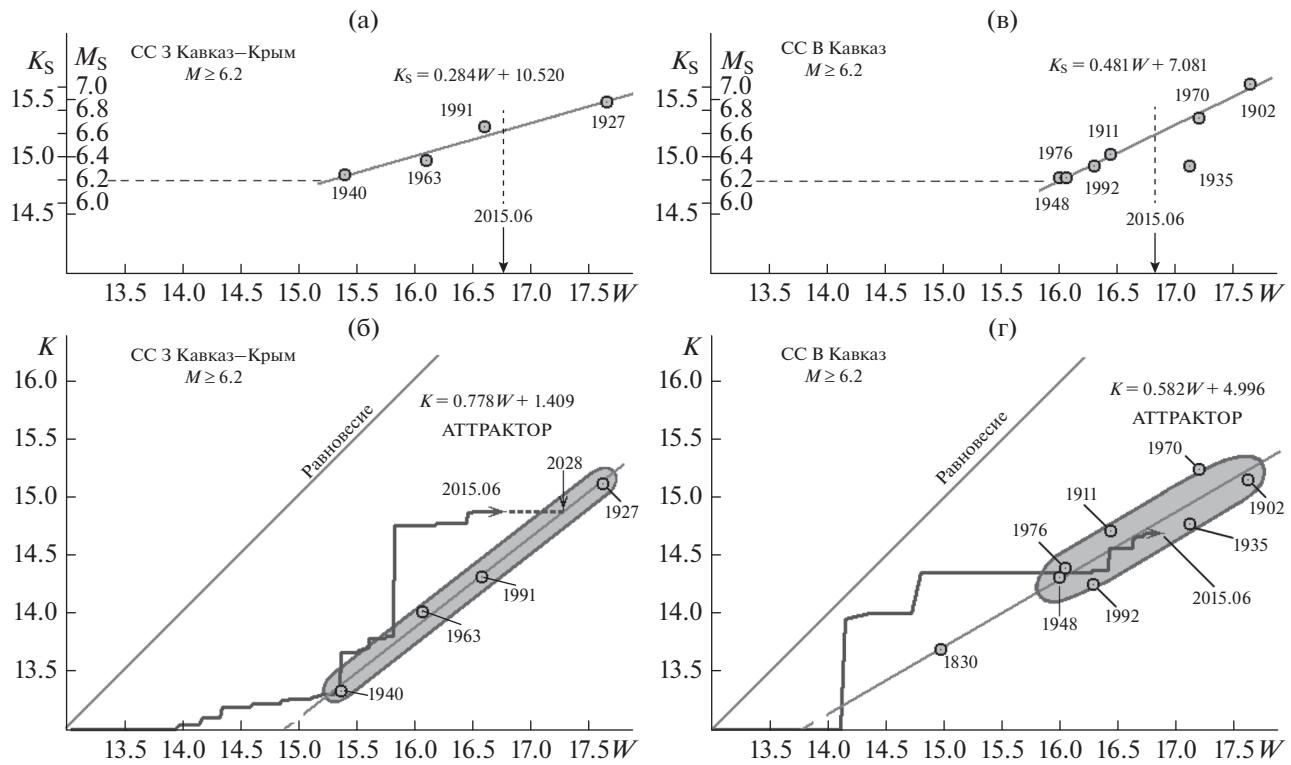


Рис. 5. Энергетические и трековые диаграммы: (а), (б) – для СС З Кавказ–Крым и (в), (г) – для СС В Кавказ.

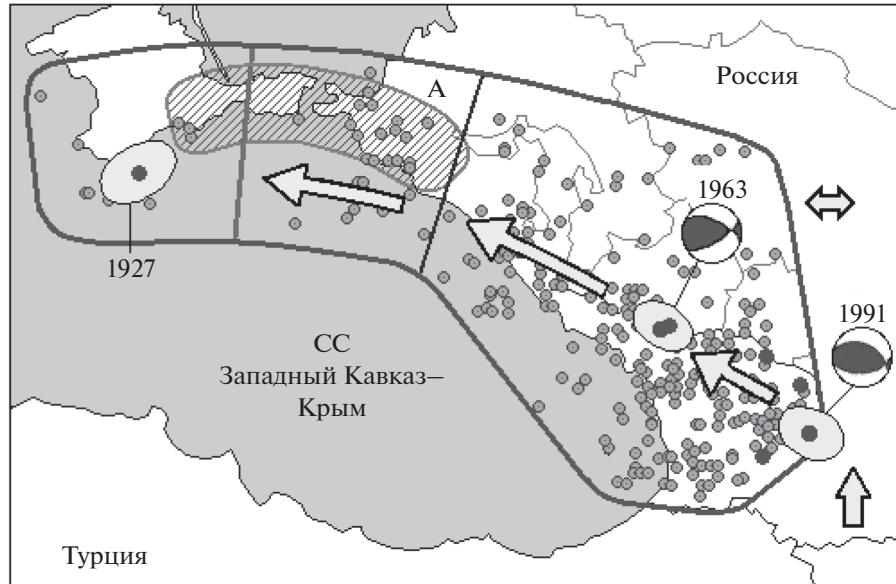


Рис. 6. Механизм передачи напряжений в СС З Кавказ–Крым от зоны ТК поднятия на запад. Заштрихованная область А является потенциально опасной зоной проявления землетрясений с $M \sim 5.0$ в ближайшие 10 лет.

жений (эстакады, мосты, плотины, трубопроводы и т.д.).

В СС В Кавказ траектория развивается по сценарию землетрясения 1935 г. (рис. 5в, 5г). Динамика роста вероятности в системе приведена на

рис. 7б. Контуры СПС Кавказского региона показаны на рис. 8. В них понижены пороговые магнитуды прогнозируемых сильных землетрясений (см. рис. 2). Описание этих подсистем в настоящей работе не приводится. Отметим только, что в

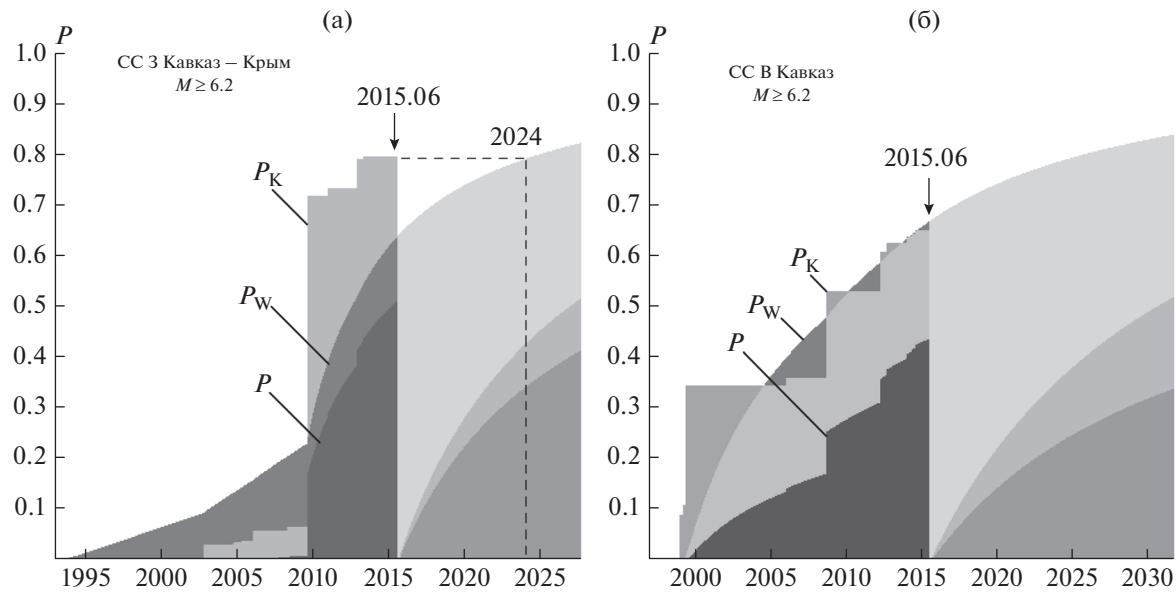


Рис. 7. Динамика роста вероятности: (а) – в СС 3 Кавказ–Крым и (б) – в СС В Кавказ.

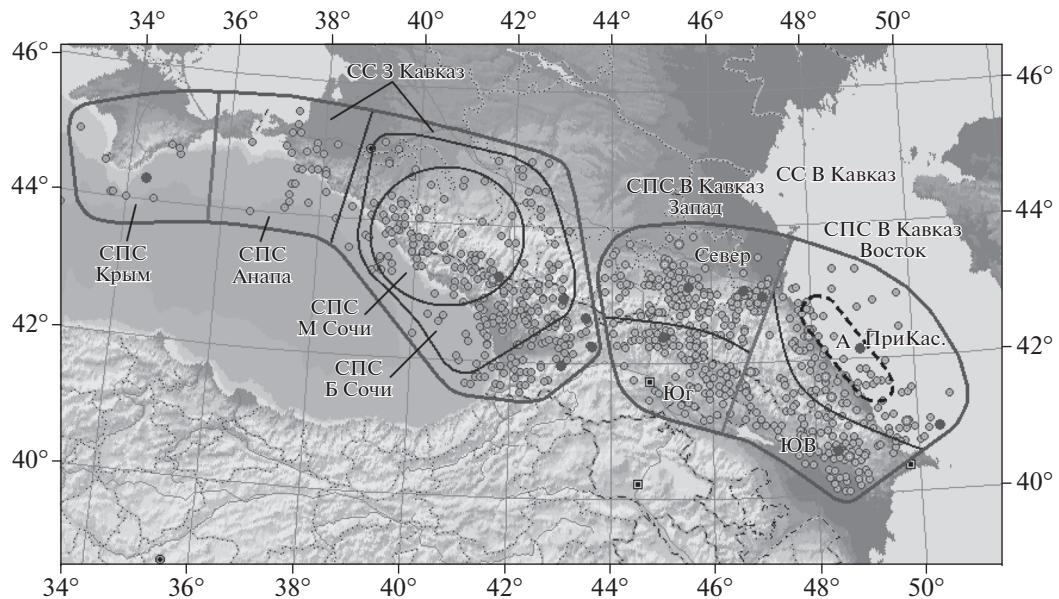


Рис. 8. Конфигурации и землетрясения индикаторы СС и подсистемы Кавказского региона. Зона неустойчивости А показана пунктирной линией.

СПС Анапа было успешно предсказано землетрясение от 10 декабря 2012 г., $m_b = 4.9$ (Бюллетень от 5 октября 2012 г.). Это землетрясение произошло спустя 5 месяцев после наводнения в Крымске 6–7 июля 2012 г. Последний раз до этого Крымск затапливался 9 августа 2002 г., тогда за ним (спустя 3 месяца, 9 ноября 2002 г.) также последовало землетрясение с $m_b = 5.2$. Оба землетрясения были спровоцированы чрезвычайно высокими, не наблюдавшимися никогда ранее, осадками [Дне-

стрянский, Лобановский, 2012]. Оба очага располагались приблизительно в 20–25 км к западу от Крымска и имели одинаковые траектории подготовки на трековой диаграмме СС Анапа.

Алтайский регион. При выявлении СС в Алтайском регионе была использована карта сейсмотектоники Монголо-Сибирского региона (рис. 9а) из работы [Рогожин, 2003]. В рамках одной и той же конфигурации L была выявлена СС Алтай с тремя пороговыми магнитудами $M_{th} = 7.8$,

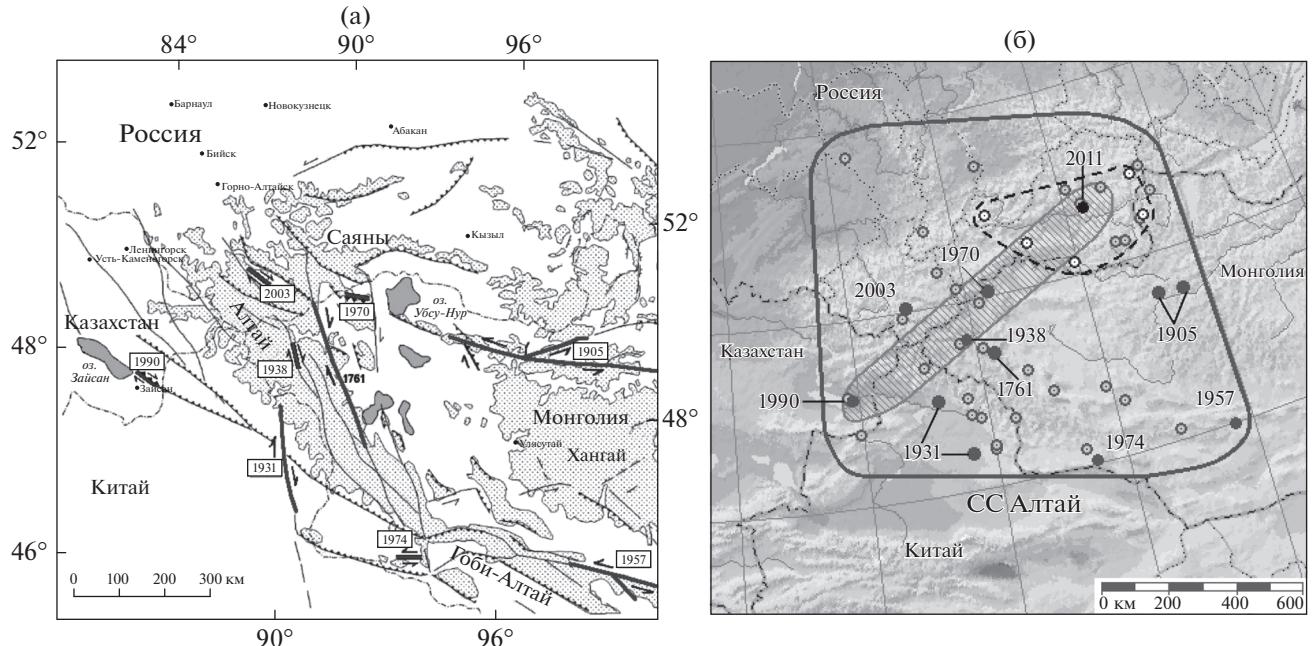


Рис. 9. (а) – Карта сейсмотектоники Монголо-Сибирского региона [Рогожин, 2003]. Красным выделены основные структуры, генерирующие сильные землетрясения за 1761, 1900–2010 гг. в СС Алтай; (б) – Контуры Сейсмическая система Алтай с $6.6 \leq M < 7.0$ и эпицентры сильных землетрясений. Штриховкой показана ОСЗ для землетрясений 1938, 1970, 1990 и 2011 гг. Пунктиром показана область землетрясений индикаторов с 2005 по 2011 гг. (светлые кружочки).

7.0 и 6.6 (рис. 2). СС Алтай включает территории Алтайского Края и Тувы (РФ), западную Монголию, восточную часть Казахстана и СЗ часть Китая (рис. 9б).

СС Алтай с пороговой магнитудой $M_{th} = 7.8$ ответственна за подготовку сильных землетрясений с магнитудами $M \geq 7.8$. К ним относятся: Монгольское землетрясение 1761.12.09, $M = 8.2$ с правосторонним сдвигом; Таннуольские землетрясения 1905 г., приуроченные к разлому Болнаи с левосторонним сдвигом (Цэцэрлэгское, 07.09, $M = 8.0$; Болтайское, 07.23, $M = 8.3$); Монголо-Алтайские землетрясения 1931 г., правосторонний сдвиг (08.10, $M = 8.0$, Фу Юмское, 08.18, $M = 7.2$); Гоби-Алтайское, 1957.12.04, $M = 8.1$, приуроченное к разлому Богд с левосторонним сдвигом. Сильными землетрясениями в СС Алтай с магнитудами $7.0 \leq M < 7.8$ являются: землетрясение 1914.08.04, $M = 7.5$; Урэг Нурское, 1970.05.15, $M = 7.0$, приуроченное к хребту Цаган Шибету Алтай-Саяно-Монгольской орогенной области; Алтайское, 2003.09.27, $M = 7.5$, с правосторонним сдвигом.

На рис. 10 приведена трековая диаграмма СС Алтай, на которой видно, что в настоящее время в системе не опасно, траектория находится выше атTRACTора. При сохранении нынешнего темпа роста энтропии, только спустя 11 лет, к 2026 г. траектория приблизится к опасной зоне атTRACTора. Динамика роста вероятности сильного зем-

летрясения на середину 2015 г. показана на рис. 11а. В этой системе произошла подготовка сильного Алтайского землетрясения 2003 г. АтTRACTор, линейного закона (6) и ретроспективно рассчитанная траектория подготовки этого землетрясения показаны на рис. 10. Траектория старта в 1970 г. и в течение 33 лет, огибая предыдущие области неустойчивости, приблизилась к линейной зоне неустойчивости с максимальной кумулятивной энергией и энтропией. Место землетрясения 2003 г. можно было предсказать по землетрясениям индикаторам, которые происходили в районе будущего очага на СЗ системы с 1990 по 1996 гг. Эта область пересечения продолжений разломных зон землетрясений 1905 и 1931 гг. на сейсмотектонической карте (рис. 9а). Вероятность сильного землетрясения (7) в системе к сентябрю 2003 г., перед Алтайским землетрясением была очень высокой и равнялась $P = 86.87\%$ ($P_K = 94.14\%$, $P_W = 92.28\%$) (рис. 11б).

Следующее сильное землетрясение в регионе было предсказано заранее в СС Алтай с пороговой магнитудой $M_{th} = 6.6$. Сильными землетрясениями в этой системе являются: землетрясение в приграничной области Тыва–Бурятия–Монголия 1938.10.19, $M = 6.8$; Урэг Нурское, 1970.05.15, $M = 7.0$, приуроченное к хребту Цаган Шибету; Тахийншарское 1974.07.04, $M = 6.9$; Уренгурское, Казахстан, 1990.06.14, $M = 6.8$, в приграничной зоне Казахстан–Хинджанг. Последнее сильное

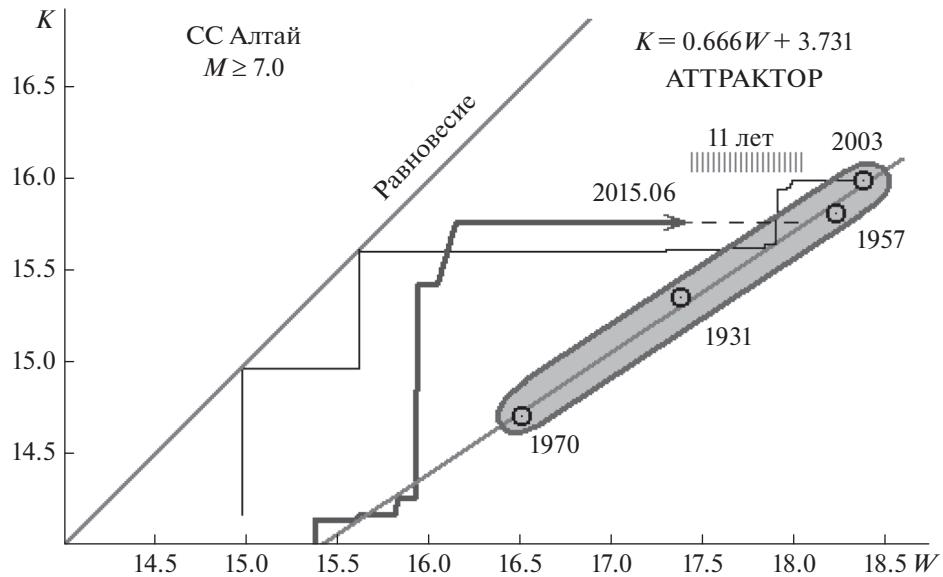


Рис. 10. Трековая диаграмма СС Алтай с $7.0 \leq M < 7.8$. Показан трек подготовки Алтайского землетрясения 2003 г. и траектория подготовки сильного землетрясения на июнь 2015 г.

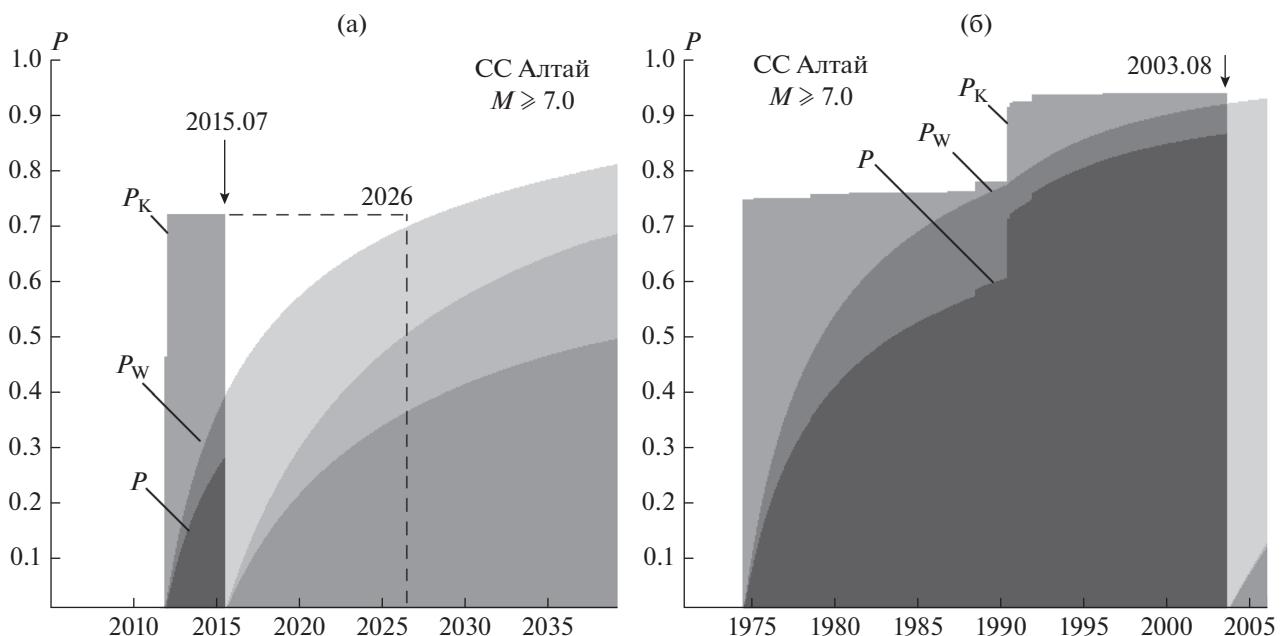


Рис. 11. Динамика роста вероятности сильного землетрясения с $7.0 \leq M < 7.8$ в СС Алтай: (а) – на 01 июля 2015 г.; (б) – перед Алтайским землетрясением 2003 г.

землетрясение в этой системе, Тувинское, произошло 27 декабря 2011 г., $M = 6.7$. Прогноз этого землетрясения был дан в Бюллете № 04-1 от 15 октября 2011 г., в СС Алтай $6.6 \leq M < 7.0$. Прогноз производился на основе трековой и энергетической диаграмм, приведенных на рис. 12а, 12б. Учитывая пространственное распределение эпицентров сильных землетрясений 1938, 1970, 1990 гг. с $6.6 \leq M < 7.0$, они объединены в одно-

родную сейсмотектоническую зону (ОСЗ) (заштрихованная область на рис. 9б). Магнитуда Тувинского землетрясения была предсказана точно, время было предсказано во временном окне 6 месяцев, место было предсказано по активизации землетрясений индикаторов с 2005 по 2011 гг. Эта зона, порядка 200 на 400 км на СВ окончности ОСЗ (показана пунктирной линией на рис. 9б) оставалась в затишье до 2005 г. Видно, что земле-

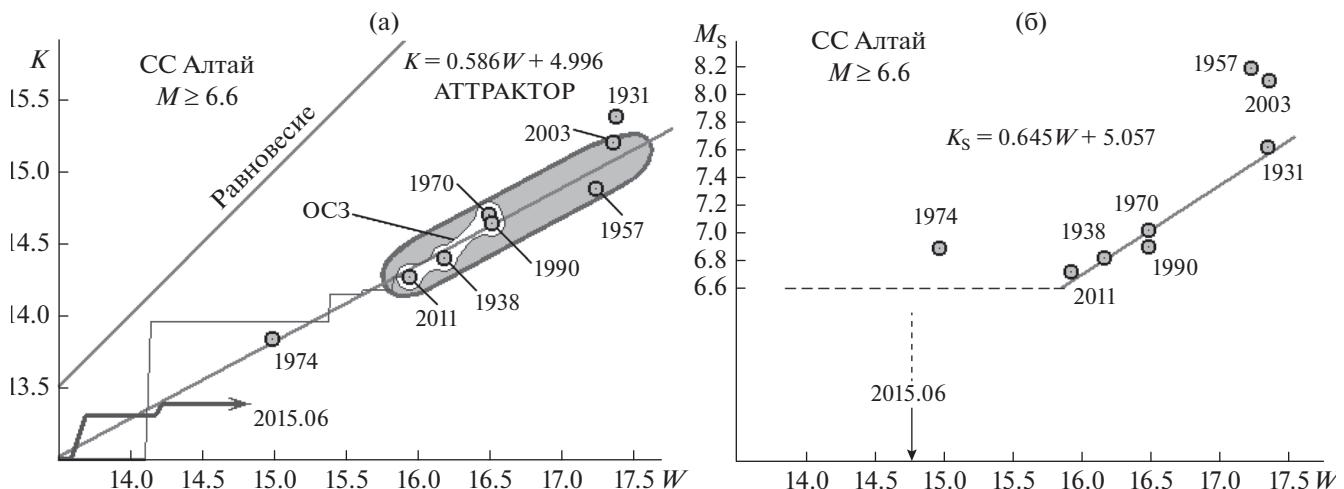


Рис. 12. (а) – Трековая диаграмма СС Алтай с $6.6 \leq M < 7.0$, атTRACTОР и локальная ОСЗ, включающая эпицентры 1938, 1970, 1990 и 2011 гг.; (б) – энергетическая диаграмма СС Алтай с $6.6 \leq M < 7.0$.

трясения индикаторы 2005–2011 гг. окружают очаговую область ожидаемого сильного землетрясения. На трековой диаграмме СС Алтай (рис. 12а) показан трек подготовки Тувинского землетрясения, которая на декабрь 2011 г. попала в ОСЗ неустойчивости. Непосредственно перед Тувинским землетрясением вероятность (7) составила $P = 3.60\%$ ($P_K = 16.60\%$, $P_W = 21.68\%$) (рис. 13).

Особенностью Тувинского землетрясения является то, что оно состояло из двух взаимосвязанных очагов с разными механизмами. Второй очаг сработал спустя 2 месяца, 26 февраля 2012 г., $M = 6.8$. Классическим примером двойных являются землетрясения 1811.12.16, $M = 7.3$ и 1812.02.07, $M = 7.5$ на разломе Нью Мадрид в штате Миссури (США) [Bakun, Hopper, 2004]. Второй толчок в двойных землетрясениях очень трудно поддается прогнозу. Их можно предсказать по незатухающей активности афтершоков первого (частное сообщение Л.Б. Славиной).

Байкальский регион. Озеро Байкал находится в средней части Байкальской рифтовой зоны, которая начала формироваться еще в начале олигоцена – около 40 миллионов лет назад. Впадина Байкала, корни которой уходят в верхнюю мантию на глубину 50–60 км, является центральным звеном Байкальской рифтовой зоны. Рифтовые структуры простираются на 2500 км от северо-западной Монголии до южной Якутии. Рифтовая зона формировалась в результате столкновение Евразии с Индийской плитой. Процесс формирования Байкальского рифта продолжается и в настоящее время, проявляясь в повышенной сейсмической активности и горизонтальном растяжении земной коры (рис. 14) [Солоненко и др., 1976; Радзиминович и др., 2006]. Установлено, что берега Байкала на линии Иркутск–Улан-Удэ

раздвигаются со скоростью 5 мм в год. В связи с этим фактом существует гипотеза, что через сотни миллионов лет Байкальский рифт расколет Евразийский материк.

На рис. 15 показана СС Байкал (внешний контур), СПС СВ и ЮЗ Байкал, включающие сильные землетрясения и землетрясения индикаторы. СС Байкал верхнего энергетического уровня имеет две пороговые магнитуды $M_{th} = 7.5$ и 7.0, которые ответственны за подготовку сильных землетрясений с $M_s \geq 7.0$. СС Байкал относится к разряду “плохо определенных” (табл. 1), поэтому

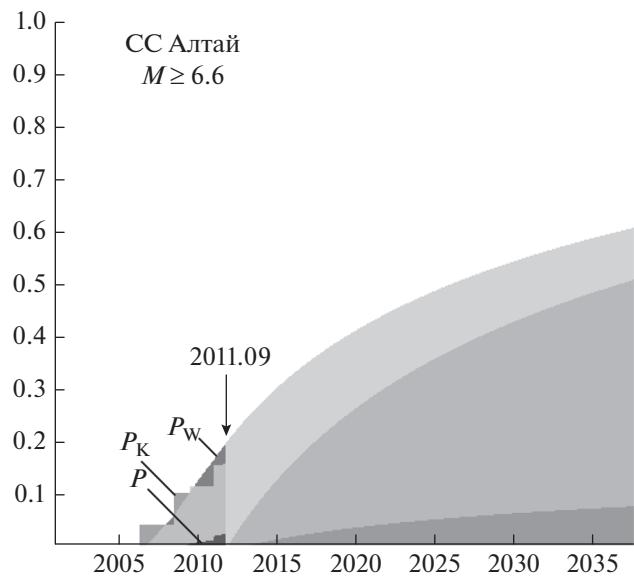


Рис. 13. Динамика роста вероятности сильного землетрясения с $6.6 \leq M < 7.0$ в СС Алтай на 1 октября 2011 г.

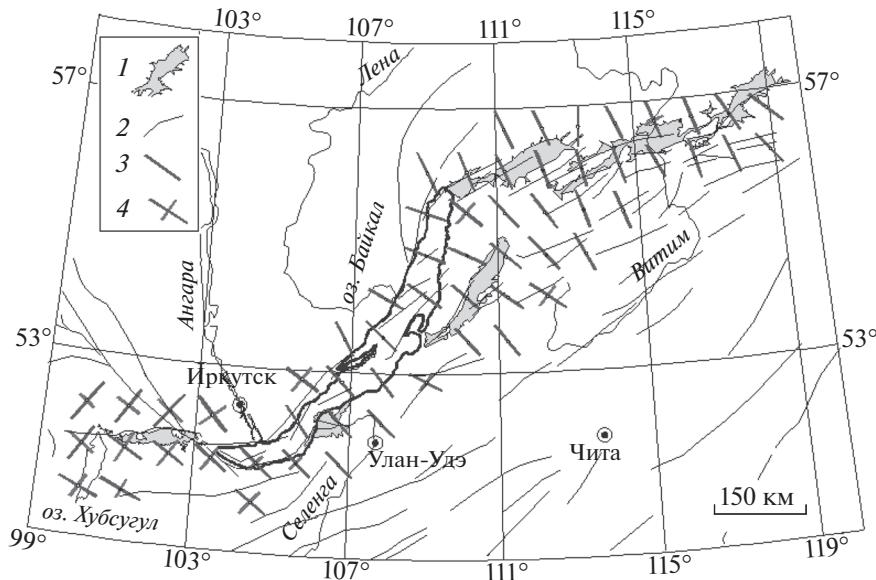


Рис. 14. Направленность сейсмотектонических деформаций по данным механизмов очагов землетрясений Байкальского региона с $M = 1.0\text{--}5.0$ за 1950–1996 гг.: 1 – рифтовые впадины; 2 – разломы; 3 – растяжения; 4 – сбросо-сдвиги.

качество прогноза “плохое”. Великое Восточно-Сибирское землетрясение 1 февраля 1725 г., $M = 8.2$, считается одним из сильнейших в регионе. К сильным землетрясениям относятся: Большое Южно-Байкальское землетрясение 27.06.1742 г., $M = 7.7$; Цаганское землетрясение 12.01.1862 г., $M = 7.5$; Муйское землетрясение 27.06.1957 г., $M = 7.6$. Цаганское землетрясение стало первым сейсмическим событием в Восточной Сибири, последствия которой изучались на достаточно высоком научном уровне. Район Муйского землетрясения, эпицентральная область которого

приурочена к Намаракитской впадине, ранее считался практически асейсмичным. В результате этого землетрясения возникла сложная система сейсмодислокаций общей протяженностью около 30 км. Вследствие опускания впадины в ней образовалось озеро Новый Намаракит. В системе с $M_{th} = 7.5$ имеем всего два достоверно завершившихся сейсмических цикла землетрясений 1862 и 1957 гг. Средний период повторяемости сильных землетрясений с $M \geq 7.0$ начиная с 1725 г. равен $T = 58$ лет. На рис. 16 показаны линейная зона неустойчивости (6) и трек подготовки сильного землетрясения на 06.2015 г. в СС Байкал.

СПС СВ Байкал и ЮЗ Байкал ответственны за сильные землетрясения с $6.2 \leq M < 6.9$. Вероятность таких землетрясений в СПС СВ Байкал очень высокая, а в СПС ЮЗ Байкал не опасно.

Регион Курилы–Камчатка–Сахалин. Здесь выявлены СС Камчатка–С Курилы, Центральные Курилы, Ю Курилы–Хоккайдо и Сахалин. На рис. 17а показано расположение этих систем и эпицентры землетрясений индикаторов. Эти системы имеют глубину 70 км и включают ансамбли сильных землетрясений, отражающие динамику взаимодействия Евразийской и Тихоокеанской плит. Тихоокеанская плита подвигается под плиту Охотское море по Курило-Камчатскому желобу и погружается в северо-западном направлении, оставаясь сейсмически активной до глубины ~ 680 км. На рис. 17б показаны атTRACTоры для СС региона, включающие точки неустойчивости сильных землетрясений. Средний период повторяемости сильных землетрясений, после завершения шести сейсмических циклов с 1899 г. в СС

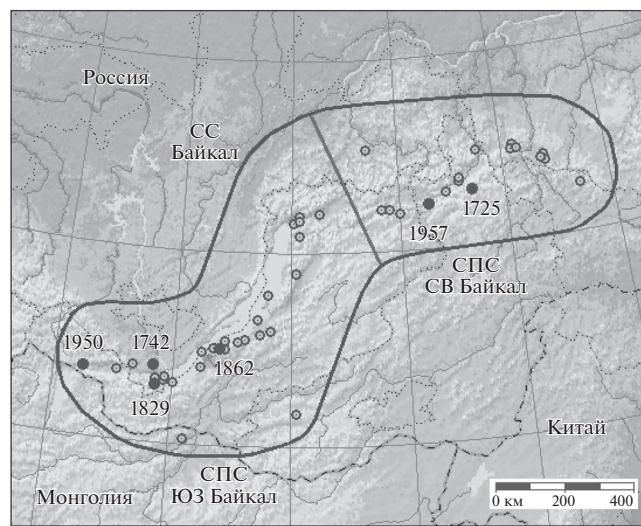


Рис. 15. Контуры СС и СПС Байкала, эпицентры землетрясений индикаторов и сильных землетрясений.

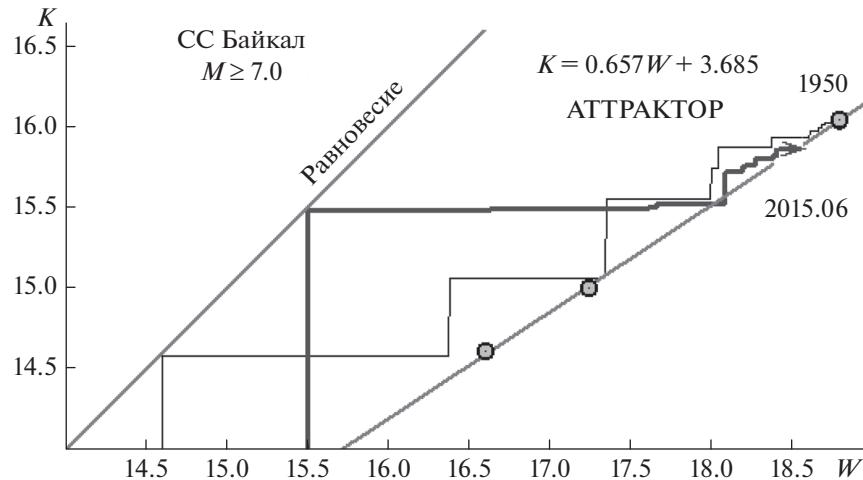


Рис. 16. Трековая диаграмма СС Байкал с $M_{th} = 7.0$. Показан трек землетрясения 1950 г. и траектория подготовки нового сильного землетрясения.

Камчатка–С Курилы равен 28.8 годам. В СС Центральные Курилы средний период повторяемости сильных землетрясений после завершения 6 сейсмических циклов равен 15 годам. Динамика заполнения атTRACTора СС Центральные Курилы, с учетом Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг., приведена в работе [Акопян, 2016]. В СС Ю Курилы–Хоккайдо средняя периодичность сильных землетрясений после завершения 10 сейсмических циклов с 1900 г. равна 10.3 годам. Последнее сильное землетрясение в СС Камчатка–С Курилы, Кроноцкое, произошло 5 декабря 1997 г. В СС Центральные Курилы последнее сильное землетрясение произошло 15 ноября 2006 г., а в СС Ю Курилы–Хоккайдо последнее сильное землетрясение (Токачи Оки) произошло 25 сентября 2003 г. СС Центральные Курилы, имея относительно малые размеры и пороговую магнитуду, играет весьма важную роль в координации и согласовании активных процессов между СС Камчатка–С Курилы и Ю Курилы–Хоккайдо.

На рис. 18 показаны подсистемы региона Сахалин–Курилы–Камчатка. Диапазоны магнитуд сильных землетрясений в этих подсистемах приведены на рис. 2. СС Сахалин была подробно описана в работах [Akopian, Kocharian, 2014; Akopian, 2015]. В ближайшие годы здесь сильное землетрясение с $M > 6.2$ не ожидается. На рис. 19а–19г приведены трековые и энергетические диаграммы для СС Камчатка–С Курилы и Ю Курилы–Хоккайдо.

На Камчатке выделяется ветвь мега землетрясений 1923 и 1952 гг. с магнитудами $M \geq 8.4$. На рис. 19а, 19б видно, что подготовка сильного землетрясения в СС Камчатка–С Курилы ($7.8 \leq M < 8.3$) происходит по сценарию Кроноцкого землетрясения 1971 г. В системе потенциально опасно в контактной зоне с Алеутскими островами (пунктирная зона А на рис. 18). При сохранении

сейсмического затишья в системе, траектория к 2020 г. приблизится к границе атTRACTора (кружочек А на рис. 19б).

Потенциально опасная зона в СС Ю Курилы–Хоккайдо показана на рис. 18 (пунктирная зона В). Динамика роста вероятности сильного землетрясения с $7.8 \leq M < 8.3$ в СС Камчатка–С Курилы и Ю Курилы–Хоккайдо на 01 июля 2015 г. приведены на рис. 20а, 20б. В подсистемах Камчатки и С Курил дважды в Бюллетенях от 30 сентября и 4 октября 2012 г. было предсказано и подтверждено сильное землетрясение с магнитудой $M = 6.6$. Землетрясение произошло в Северных Курилах (восточнее о. Онекотан) 16 ноября 2012 г. в соответствии с предсказанной магнитудой.

Итак, весь пояс глубоководного желоба от Хоккайдо до Камчатки разбивается как бы на две самостоятельные участки Северную и Южную, разделенные Центральной Курильской системой. Это означает, что активные процессы субдукции, накопления и разрядки напряжений в верхних участках взаимодействующих плит ($H < 70$ км) на Севере и Юге желоба могут происходить одновременно. Но внутри самих систем эти процессы происходят координировано. СС разбиваются на подсистемы по линиям перпендикулярно Курило–Камчатской дуге. Активные тектонические процессы на Южном участке дуги идут с большей скоростью, чем на Северном. Для практического применения результатов мониторинга с привлечением других прогнозических данных регионов ниже сформулированы рекомендации, которые будут учтены также и при автоматизации и разработки программного продукта.

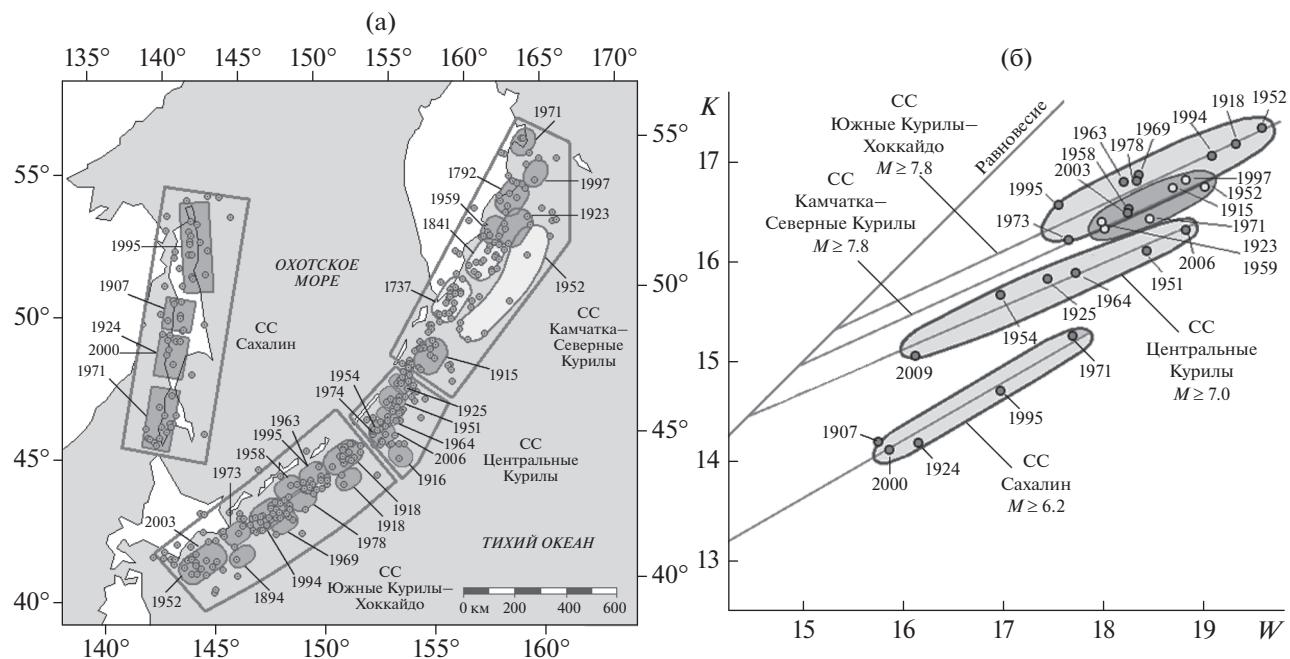


Рис. 17. (а) – Сейсмические системы Сахалин ($M_{th} = 6.4$), Камчатка–Северные Курилы ($M_{th} = 7.8$), Центральные Курилы ($M_{th} = 7.0$), Южные Курилы–Хоккайдо ($M_{th} = 7.8$) и ансамбли сильных землетрясений; (б) – атTRACTоры и точки неустойчивости этих систем.

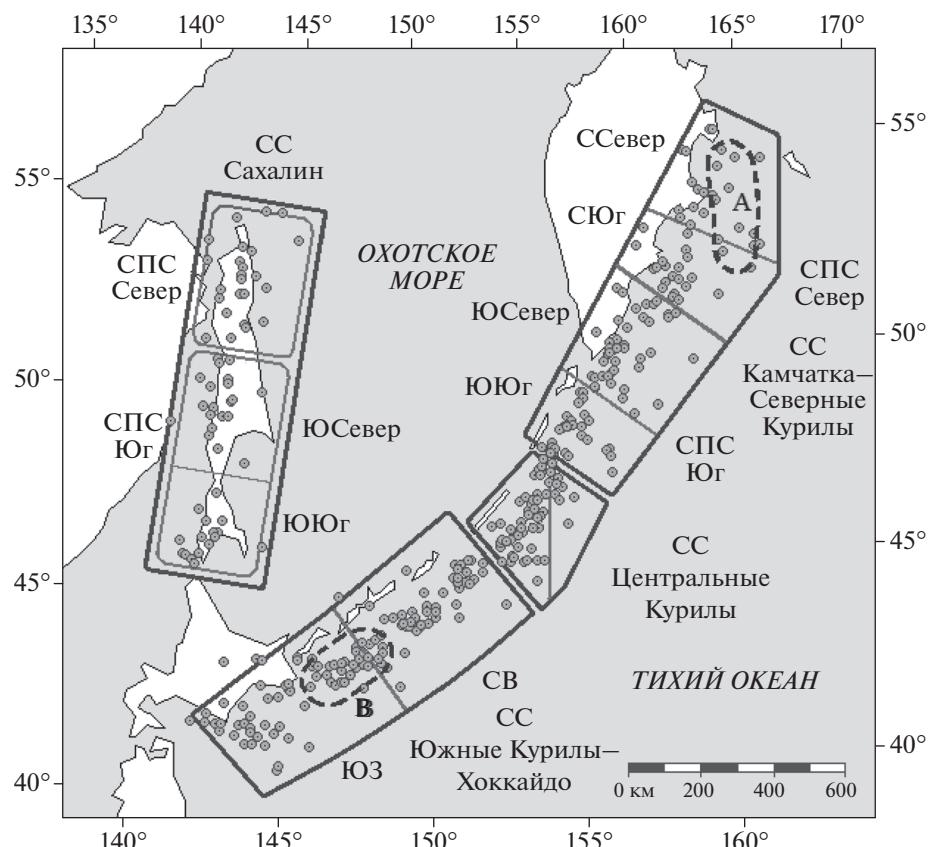


Рис. 18. Сейсмические подсистемы и зоны неустойчивости А и В (отмечены пунктирами) в Курило-Камчатском регионе.

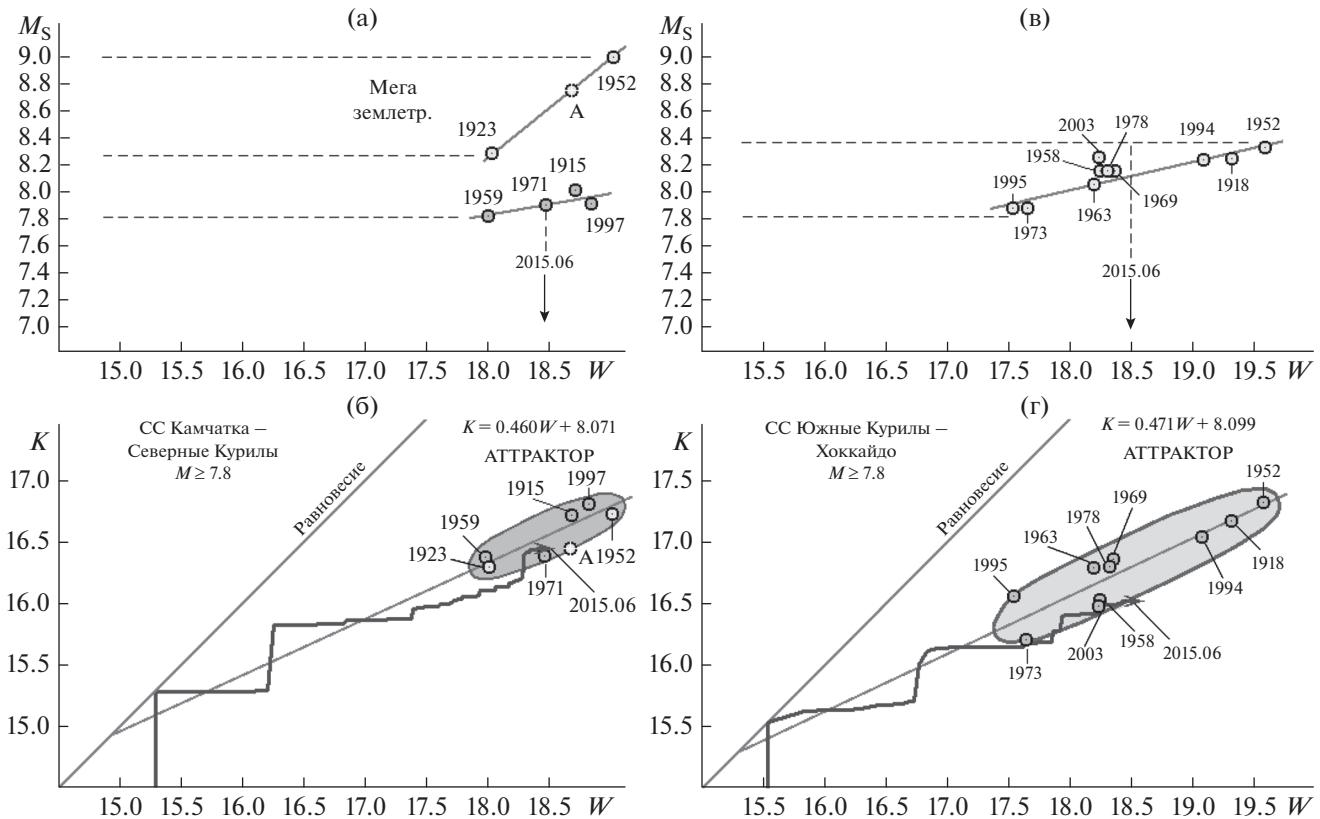


Рис. 19. Энергетические и трековые диаграммы в СС Камчатка–С Курилы (а), (б) и СС Ю Курилы–Хоккайдо (в), (г). Показаны треки на 01 июля 2015 г., ответственные за подготовку землетрясений с $7.8 \leq M < 8.4$.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ И КОМБИНИРОВАНИЕ С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ

Метод мониторинга и прогноза землетрясений. В методе сейсмической энтропии мониторинг и прогноз землетрясений делается внутри конкретного, заранее выделенного, объема литосферы – сейсмической системы (СС) с конфигурацией L на поверхности земли и глубиной H . Прогнозируются сильные землетрясения с магнитудами в диапазоне $M_{\text{th}} \leq M \leq M_{\text{max}}$, где M_{th} , M_{max} – нижние и верхние пороговые магнитуды, определяемые заранее. Землетрясения с $M_h \leq M \leq M_{\text{th}}$ являются землетрясениями индикаторами, где M_h – нижняя пороговая магнитуда. При прогнозе указывается место ожидаемого сильного землетрясения внутри объема СС, магнитуда землетрясения и временной промежуток ожидания. Контролируется вся область внутри СС: если указывается опасная зона в СС, то в других областях внутри системы вне этой зоны автоматически исключается сильное землетрясение. Метод с высокой надежностью прогнозирует безопасность внутри объема системы, т.е. отсутствие опасности от землетрясений определенного энергетического уровня, что позволяет исключать ложные прогнозы за

этот период по другим методам или успокоить население после ощущимых толчков, сейсмических роев, вызвавших беспокойство. Мониторинг в системах производится непрерывно, на долгосрочном, среднесрочном и краткосрочном этапах подготовки сильных землетрясений. Входными данными являются оперативные каталоги землетрясений, возобновляемые по каналам Интернета из сейсмологических сетей: Геологической службы США (USGS, NEIS и IRIS, $M \geq 2.5$ для территории США и $M \geq 4.5$ для мира); Средиземноморской сети (CSEM-EMSC, для Европы $M \geq 2.0$ и $M \geq 4.0$ для мира); сети Германии (GEOFON, Потсдам); Великобритании (ISC); России (CCD, Обнинск). Результаты мониторинга обновляются каждый месяц, а при необходимости, оперативно обновляются в течение нескольких часов после сейсмического события.

Рамки формулировки прогнозов. Прогноз по методу сейсмической энтропии производится в рамках заранее оговоренных условий. Точность прогноза землетрясений: по времени – от 6 до 1 мес. (в зависимости от конкретной ситуации может быть и больше); по магнитуде ± 0.1 (большие отклонения по магнитуде оговариваются отдельно); по месту – порядка размеров очага прогнози-

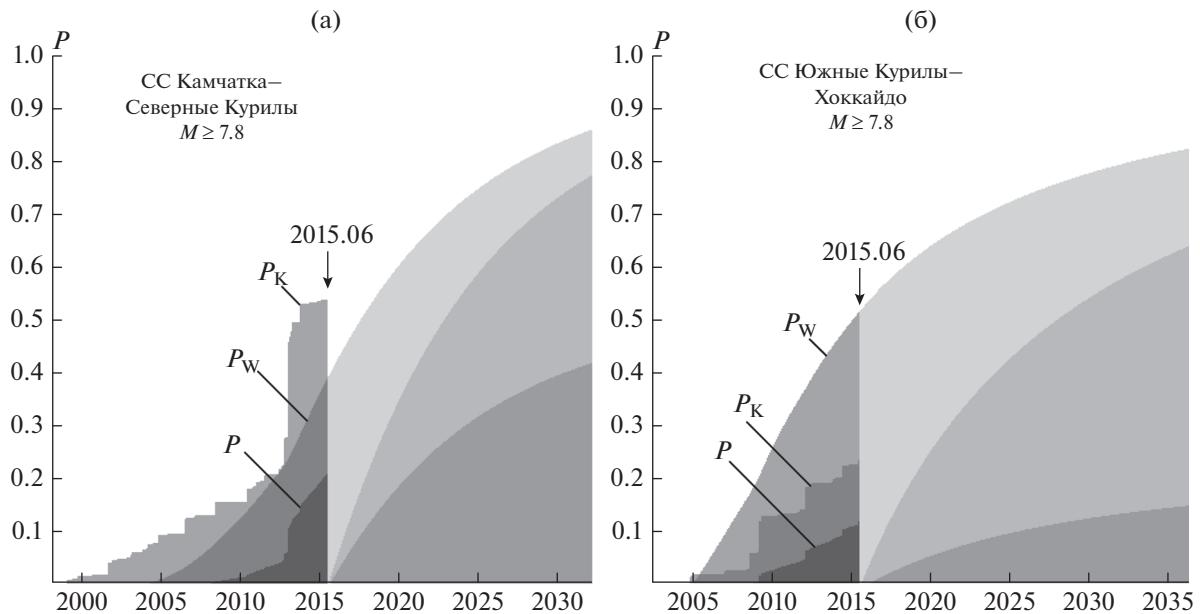


Рис. 20. Динамика роста вероятности сильного землетрясения с $7.8 \leq M < 8.3$ на 01 июля 2015 г. в СС: (а) – Камчатка–С Курилы; (б) – Ю Курилы–Хоккайдо.

руемого землетрясения, но ограничена размерами СС. В зависимости от развития сейсмической ситуации, результаты прогноза со временем могут изменяться и уточняться. Прогнозируемое место землетрясения (неустойчивость) может мигрировать или перепрыгивать внутри СС от одной разломной зоны к другой, прогнозируемое время ожидания землетрясения может удаляться или приближаться и соответственно магнитуда ожидаемого землетрясения может изменяться – все это заложено в методе. Элементы СС в ограниченном временном интервале (от 1 до 6 мес.) могут находиться в неустойчивом состоянии, и если за это время сильное землетрясение не произойдет, то (по истечению этого срока) система вновь переходит в устойчивое состояние. Метод сейсмической энтропии позволяет надежно следить за динамикой развития неустойчивости внутри СС, выявлять дальность проявления краткосрочных предвестников от ожидаемого очага, ограничивая их контуром L на поверхности Земли, но краткосрочные прогнозы пока не может давать. Поэтому для повышения надежности прогнозов и краткосрочного прогнозирования землетрясений на больших территориях очень важно комплексное применение наземно-космических методов наблюдений.

Комплексирование с наземно-космическими методами наблюдений. Метод сейсмической энтропии позволяет подключать данные региональных сейсмопрогностических сетей и наземно-космических методов мониторинга для сейсмоактивных регионов. В зависимости от стадии опасно-

сти в СС к ним будут подключаться разные космические методы слежения за сейсмической опасностью. Для выявления специфики неоднородности среды внутри конфигурации L и мониторинга динамики на долгосрочном, среднесрочном и краткосрочном этапах будут привлекаться результаты сейсмотектонических, геолого-геофизических исследований, линеаменты, регистрируемые из космоса [Рогожин, Овсяченко, 2005; 2009; Бондур, Зверев, 2005а; 2005б]. Для уточнения области зарождения сейсмической неустойчивости внутри СС, будут привлекаться данные по мониторингу деформационных и прочностных свойств земной коры, проводимых с помощью спутниковых навигационных систем [Бондур и др., 2010; 2016а; 2016б]. В стадиях наибольшей опасности будут подключаться краткосрочные и оперативные методы дистанционного слежения за сейсмической неустойчивостью в локальных областях внутри системы L . К таким предвестникам относятся вариации электромагнитного поля, приводящие к закономерным флюктуациям ионосферных параметров в вертикальных профилях, вариации полей температуры земной поверхности и приземного слоя воздуха, атмосферные метеорологические аномалии [Бондур и др., 2009; Бондур, Смирнов, 2005]. Поскольку метод сейсмической энтропии позволяет прогнозировать и механизм очага ожидаемого землетрясения, он может дать рекомендации применения наиболее информативных краткосрочных предвестников. Спутниковые методы слежения за сейсмической опасностью с целью выявления краткосрочных предвестников землетрясений

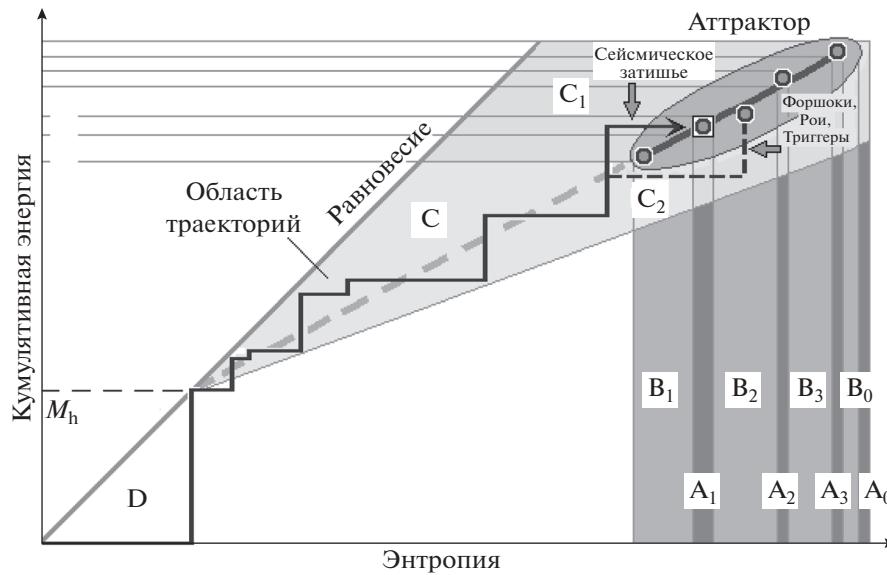


Рис. 21. Трековая диаграмма и атTRACTор. D, C_i, B_j, A_i – разные стадии тревог ожидания сильных землетрясений по мере развития траектории и приближения к атTRACTору. Показаны разные проявления сейсмичности (форшоки, сейсмические рои и затишья, триггеры и т.д.). Пояснения см. в тексте.

для непрерывного мониторинга дорогостоящие и неэффективны, если не конкретизирована пространственно-временная область исследования. Сочетание спутниковых методов мониторинга с методом сейсмической энтропии с наложенной прямой и обратной связью позволит локализовать места подготовки сейсмических катастроф и существенно сузить временные окна наблюдения за краткосрочными предвестниками, что существенно поднимет эффективность исследований. Метод мониторинга и прогноза землетрясений на основе сейсмической энтропии является теоретически обоснованным, апробированным и наиболее универсальным. Комбинирование аэрокосмического мониторинга предвестников землетрясений с методом сейсмической энтропии на основе разработки компьютерной технологии, может уже сегодня дать надежный среднесрочный прогноз по всему миру и существенно продвинуть решение проблемы краткосрочного прогноза землетрясений. Такая компьютерная технология будет разрабатываться на основе уже готового комплекса программ: программы долгосрочного – среднесрочного прогноза (LTP) и программы поиска и формирования сейсмических систем (SPQ) [Akopian, 2013].

Количественная оценка уровня опасности по динамической вероятности. Наряду с мониторингом параметров кумулятивной энергии и энтропии (1), (2) при прогнозе приводятся динамические значения вероятности (7) ожидания сильного землетрясения в СС. Вероятность рассматривается как один из стержневых временных параметров состояния СС. Динамические параметры, как вре-

мя в часах, возрастают каждую минуту, час, день и несут информацию о критическом состоянии СС, но эти изменения в основном очень маленькие. Однако такое поведение параметров позволяет разработать и создать информационную систему “Прогноз сейсмической погоды” [Акопян, 2007]. Как уже было показано выше, на текущий момент времени рассчитываются три значения вероятности: вероятность P_K по кумулятивной энергии землетрясений индикаторов; вероятность P_W по энтропии землетрясений индикаторов; вероятность P сильного землетрясения (7). Вероятность P равна нулю вне атTRACTора и начинает расти, когда траектория входит в атTRACTор. По расположению трека относительно атTRACTора и вероятности, прогнозы подразделяются на стадии (рис. 21):

D – система находится в стабильном состоянии, вероятность сильных землетрясений $P = 0\%$;

C – идет подготовка землетрясения в системе, но по времени она не созрела, вероятность сильных землетрясений $P = 0\%$;

C_1 – сильные землетрясения не ожидаются, $P = 0\%$, но вероятность землетрясений по кумулятивной энергии $P_K > 0$ начинает возрастать. При $P_K \gg P_W$ в системе может наблюдаться сейсмическое затишье;

C_2 – сильные землетрясения не ожидаются, $P = 0\%$, но вероятность землетрясений по энтропии $P_W > 0$ начинает возрастать; при $P_W \gg P_K$ состояние системы может быть неустойчивым, тогда в системе могут активизироваться землетрясения-индикаторы, происходит триггерные

Таблица 2. Уровни объявления тревоги (римскими цифрами указан уровень надежности)

Стадии подготовки				Меры
Зеленая стадия (долгосрочно-среднесрочная, годы–месяцы)				
B₁ ^{IV}	B₂ ^{IV}	B₃ ^{IV}	B₀ ^{IV}	Дается общая картина развития сейсмической опасности
B₁ ^{III}	B₂ ^{III}	B₃ ^{III}	B₀ ^{III}	Дается общая картина и сценарии развития сейсмической опасности
B₁ ^{II}	B₂ ^{II}	B₃ ^{II}	B₀ ^{II}	Конкретизируются и локализуются возможные места возникновения сейсмической опасности
B₁ ^I	B₂ ^I	B₃ ^I	B₀ ^I	Выделяются локальные зоны для проведения подготовительных мер в МЧС: даются рекомендации по укреплению зданий и сооружений, проверке готовности медперсонала и других спасательных служб
Красная стадия (среднесрочно-краткосрочная, месяцы–дни)				
A₁ ^{IV}	A₂ ^{IV}	A₃ ^{IV}	A₀ ^{IV}	Усиливаются комплексные наблюдения за предвестниками
A₁ ^{III}	A₂ ^{III}	A₃ ^{III}	A₀ ^{III}	Усиливаются наблюдения за предвестниками и оперативный обмен информацией
A₁ ^{II}	A₂ ^{II}	A₃ ^{II}	A₀ ^{II}	Усиливаются комплексные и детальные наблюдения за наземно-космическими предвестниками, при выявлении аномалий может быть вынесено решение о принятии мер в МЧС
A₁ ^I	A₂ ^I	A₃ ^I	A₀ ^I	Усиливаются комплексные оперативные наблюдения за предвестниками, выносится решение о принятии экстренных мер в МЧС. Объявляется эвакуация населения

землетрясения, активизироваться старые залечившиеся разломы, образоваться новые разрывы;

В – начало опасной стадии, когда вероятность землетрясений $P > 0$, $P_W > 0$, $P_K > 0$; локальные области системы становятся потенциально опасными, прогнозируются сценарии развития сейсмичности (см. рис. 21);

B_1 , B_2 , B_3 и т.д. – могут возникнуть между опасными стадиями по мере возрастания энтропии;

А – опасная стадия, когда вероятность землетрясений $P > 0$, $P_W > 0$, $P_K > 0$, $P_W \sim P_K$;

A_1 – система находится в опасном состоянии, траектория пересекает зону неустойчивости, где за инструментальный период сильные землетрясения не происходили; если сильное землетрясение не происходит, то через некоторое время (от 3 до 6 мес.) прогноз снимается и система переходит в устойчивое состояние;

A_2 – состояние системы неустойчивое – или происходит сильное нетипичное землетрясение (в результате активизации старых залечившихся разломов), или происходит активизация (каскад) чувствительных землетрясений индикаторов;

A_3 – система находится в опасном состоянии при котором уже происходили сильные землетрясения за инструментальный период; в зависимости от того насколько близко трек подходит/или проходит рядом с известной областью неустойчи-

вости и объявляется соответствующий прогноз; система может находиться в этой стадии от 1 до 6 мес.;

A_0 – вероятность землетрясений $P \sim 1$, в конкретной зоне системы ожидается сильное землетрясение, опасность не снимается.

В табл. 2 приведены уровни объявления тревоги и рекомендуемые меры в зависимости от стадии подготовки землетрясений. Стадия объявления тревоги и принятия мер существенно зависит от уровня надежности прогнозов в СС и от уровня готовности наземных и наземно-космических сетей наблюдений за предвестниками.

Состояние прогнозов для РФ, пожелания и рекомендации. Из первого раздела статьи видно (рис. 2), что пока СС России (кроме Курило-Камчатского региона) по надежности относятся к плохим и посредственным уровням (табл. 1), поэтому оперативные прогнозы только на основе метода сейсмической энтропии (за редким исключением) пока невозможны. Они пока не дотягивают до уровня оповещения населения и принятия чрезвычайных мер (табл. 2) и в этом плане носят научно-тестовый характер. Однако на основе метода уже сегодня можно надежно контролировать общую картину развития сейсмичности одновременно во всех СС, выдавать надежно “отрицательные” прогнозы (безопасные временные интервалы), совместно и эффективно развивать

наземно-космические методы наблюдений за краткосрочными предвестниками. В зависимости от стадии опасности в СС будут выдаваться рекомендации, в какие периоды, в каких регионах РФ, за какими предвестниками следует усилить внимание и контроль. Уже сейчас следует систематизировать по надежности предвестников форму оперативного обмена прогнозической информацией с регионами в случае возникновения экстренной ситуации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология мониторинга и прогноза землетрясений на основе сейсмической энтропии разработан и апробирован для 44 СС территории РФ. Прямая и обратная связь с наземно-космическими системами и региональными сетями наблюдений позволит комплексно и эффективно обрабатывать прогнозическую информацию на краткосрочном этапе подготовки сильных землетрясений. Метод сейсмической энтропии позволяет разработать компьютерную технологию – компьютерный интеллект, способный визуализировать процессы подготовки сильных землетрясений, анализировать и выдавать сценарии развития сейсмичности. На основе такой технологии можно создать автоматизированную систему мониторинга и прогноза землетрясений с комплексным применением наземно-космических систем наблюдений. Развитие метода сейсмической энтропии от больших систем к малым и снижение магнитуд пороговых землетрясений, позволит функционально расширить возможности системы, решать вопросы не только касательно проблемы прогноза землетрясений, но и развивать системы контроля безопасности народно-хозяйственных объектов при умеренной и слабой сейсмичности. Не меняя основ метода можно контролировать негативные воздействия такой сейсмичности на важнейшие объекты (гидротехнические сооружения, атомные станции; топливно-энергетические и газонефтяные комплексы, скоростные транспортные магистрали, мосты и т.д.). Такая расширенная система (включающая чувствительные региональные сейсмологические сети) позволит предупредить зарождение малых деформаций на ранней стадии, предпринять соответствующие меры укрепления объектов и предотвратить развитие нежелательных эффектов. Разрабатывая, реализуя и развивая приведенную в статье технологию, Россия за очень короткий срок может стать самой сейсмически защищенной страной в мире.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-00139) в НИИ “АЭРОКОСМОС” и гранта РФФИ № 14-05-00091.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акопян С.Ц. Количественное описание сейсмических процессов на основе сейсмической энтропии // Физика Земли. 1998. № 1. С. 11–26.
- Акопян С.Ц. Диссипативные сейсмические системы, энтропия и возможности создания системы прогноза “Сейсмической погоды”. Альманах “Деловая Слава России”, III выпуск. 2007. С. 42–46.
- Акопян С.Ц. Сейсмические системы Японии: энтропия и мониторинг мега-землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40. № 4. С. 67–90.
- Акопян С.Ц. Сейсмические системы, закон производства энтропии и ансамбли сильных землетрясений // Физика Земли. 2016. № 6. С. 1–22.
- Акопян С.Ц., Джагинян Г.М. Механизмы очагов сильных землетрясений и динамика плито-блоковой структуры Тавро-Кавказского региона // Изв. АН АрмССР. Сер. Науки о Земле. 1992. № 2. С. 48–55.
- Акопян С.Ц., Попов Е.А. Технология прогноза сильных землетрясений на основе метода сейсмической энтропии. Материалы конференции “Геологические опасности”. Архангельск, 14–17 сентября. 2009 г.
- Акопян С.Ц., Рогожин Е.А. Моделирование кинематики Тавро-Кавказского региона и динамика подготовки сильных землетрясений с $M \geq 7.1$ // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40. № 2. С. 5–24.
- Асланян А.Т., Закарян К.А., Акопян С.Ц., Карабанян А.С., Микаелян А.О. О глубинной структуре Тавро-Кавказского региона на основе результатов сейсмологических исследований и дистанционного зондирования // Изв. АН АрмССР. Сер. Науки о Земле. 1982. № 4. С. 3–11.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Докл. РАН. 2005а. Т. 402. № 1. С. 98–105.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // Исследование Земли из космоса. 2005б. № 3. С. 37–52.
- Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Докл. РАН. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б. Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций. На примере Южной Калифорнии // Докл. РАН. 2016б. Т. 466. № 5. С. 598–601.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир. 2009. С. 594.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В. Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физика Земли. 2016а. № 1. С. 120–132.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // Докл. РАН. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.

- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В.* Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // Докл. РАН. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
- Днестрянский И.Н., Лобановский Ю.И.* Наводнение в Крымске: причины и механизмы затопления города. 2012. http://artofwar.ru/i/iwan_d/text_0470.shtml
- Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука. 2006. 256 с.
- Касахара К.* Механика землетрясений. М.: Мир. 1985. 264 с.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука. 1977. 536 с.
- Поплавская Л.Н., Иващенко А.И., Оскорбин Л.С. и др.* Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. 2006. 103 с.
- Радзиминович Н.А., Мельникова В.И., Саньков В.А., Леви К.Г.* Сейсмичность и сейсмотектонические деформации земной коры Южно-Байкальской впадины // Физика Земли. 2006. № 11. С. 1–19.
- Рогожин Е.А.* Геодинамика и сейсмотектоника Северного Кавказа. Геодинамика, сейсмотектоника и вулканизм Северного Кавказа. М.: ОИФЗ РАН. 2001. С. 17–61.
- Рогожин Е.А.* Современная геодинамика и потенциальные очаги землетрясений Кавказского региона. Современные математические и геологические модели природной среды. М.: ОИФЗ РАН. 2002. С. 244–254.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н.* Сейсмическая и геологическая активность тектонических нарушений Северо-Западного Кавказа // Физика Земли. 2005. № 6. С. 29–42.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н.* Сейсмотектоника Северо-Западного Кавказа. Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе. Тр. III Кавказской международной школы-семинара молодых ученых. Владикавказ. 2009. С. 53–71.
- Рогожин Е.А., Иогансон Л.И., Завьялов А.Д., Захаров В.С., Лутиков А.И., Славина Л.Б., Рейснер Г.И., Овсяченко А.Н., Юнга С.Л., Новиков С.С.* Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений – основа реального сейсмического прогноза. М.: Светоч Плюс. 2011. 368 с.
- Славина Л.Б., Мячин В.В., Левина В.И.* Опыт применения кинематических предвестников сейсмического поля для прогноза землетрясений на Кавказе. Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: “Камчатский печатный двор”. 2004. С. 216–227.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. 2003. М.: Наука. 270 с.
- Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Юнга С.Л.* Поля напряжений и сейсмотектонических деформаций Байкальской рифтовой зоны. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 2–3. 1996. С. 363–371.
- Чебров В.Н.* Организация работ по мониторингу сейсмической активности и прогнозу землетрясений на Камчатке // http://www.ikir.ru/ru/Events/Conferences/2007-IV-international/downloads/section_5/section_5_report_0012.pdf
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке / Отв. ред. Николаев А.В. М.: Светоч Плюс. 2011. 304 с.
- Akopian S.Ts.* Description of seismic processes on the Armenian upland based on seismic entropy. XXVI General Assembly of the European Seismological Commission, Papers, Tel Aviv, Israel, August 23–28. 1998. P. 150–154.
- Akopian S.Ts.* Quantitative description of seismic processes in real medium and the algorithm of longterm prediction of large earthquakes: By examples of the Armenian Upland, North-Western Iran, Italy and Central California. M: Triumph Publishing. 2013. P. 92.
- Akopian S.Ts.* Monitoring and forecast the Van earthquake (October 23, 2011) in the seismic system Armenian upland. 2-nd ECEES, 24–29 August, Istanbul, Turkey. 2014. 3 p.
- Akopian S.Ts.* Open dissipative seismic systems and ensembles of strong earthquakes: Energy balance and entropy funnels // Geophys. J. Int. 2015. V. 201. P. 1618–1641.
- Akopian S.Ts., Kocharyan A.N.* Critical behaviour of seismic systems and dynamics in ensemble of strong earthquakes // Geophys. J. Int. 2014. V. 196. P. 580–599. doi 10.1093/gji/gjt398
- Bakun W.H., Hopper M.G.* Magnitudes and locations of the 1811–1812 New Madrid, Missouri, and the 1886 Charleston, South Carolina, earthquakes // Bull. Seismol. Soc. Am. 2004. V. 94. P. 64–75.
- Copley A., Jackson J.* Active tectonics of the Turkish-Iranian plateau // Tectonics. 2006. V. 25. TC6006. doi 10.1029/2005TC001906
- Jackson J., McKenzie D.* Active tectonic of the Alpine-Himalayan belt between Western Turkey and Pakistan // Geoph. J. Roy. Astr. Soc. 1984. V. 77. P. 188–234.
- Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblow G.M.* Velocities of contemporary movements of the Northern Caucasus estimated from GPS observations // Geotectonics. 2015. V. 49. P. 210–218.
- Tsuboi C.* Earthquake energy, earthquake volume, aftershock area, and strength of the Earth's crust // J. Phys. Earthq., 1956. V. 4. P. 63–66.