

УДК 550.341

ШИРОКОМАСШТАБНАЯ КРАТКОСРОЧНАЯ АКТИВИЗАЦИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ ПЕРЕД СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ ЯПОНИИ И КУРИЛ

© 2011 г. П.Н. Шебалин

Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
г. Москва, Россия

Алгоритм прогноза сильных землетрясений RTP (Reverse Tracing of Precursors – обратное отслеживание предвестников) стал известен благодаря успешным прогнозам землетрясений Токати-Оки вблизи Хоккайдо и Сан-Симеон в Калифорнии в 2003 г., а также детально документируемым в Интернете прогнозам, некоторые из которых тоже оказались успешными. Особого внимания заслуживают прогнозы по методике RTP с использованием данных Японского метеорологического агентства в зоне от о. Хонсю до Средних Курил. В этом регионе ни один из пяти прогнозов с середины 2003 г. фактически не оказался ложной тревогой, включая последний, в области которого 11 марта 2011 г. произошло катастрофическое землетрясение магнитудой $M=9$. Отличительная черта прогнозов в этом регионе – огромный размер областей тревоги (порядка 1000 км). Вместе с тем сравнительно короткий интервал тревоги позволяет зарегистрировать реальное количество землетрясений с магнитудой 7.2 и выше в периоды тревоги примерно в пять раз больше чем в среднем за эквивалентный период, т.е. достичь вероятностного выигрыша около 5.

Ключевые слова: прогноз землетрясений, краткосрочная активизация сейсмичности, радиус корреляции, RTP, среднесрочные предвестники, распознавание образов, область тревоги.

Введение

У сейсмологов существует две противоположные, лишь изредка дополняющие друг друга, точки зрения в отношении существенного сокращения ущерба от землетрясений: 1) необходимо качественное антисейсмическое строительство в местах возможного сильного воздействия землетрясений; 2) необходимо максимально улучшить методики прогноза места, времени и силы землетрясений. У первой точки зрения есть несколько больших недостатков. Прежде всего, в широких масштабах это практически невозможно в небогатых и даже таких быстро развивающихся странах, как Китай.

Далее, наши представления о том, где бывают сильные землетрясения, часто искажены. Катастрофическими примерами стали Суматра-Андаманское землетрясение (26.12.2004 г., $M=9$) и землетрясение на Гаити (12.1.2010 г., $M=7$). Землетрясение 11.03.2011 г. в Японии г. вообще стало в значительной степени неожиданностью. Землетрясение такой силы было там вполне ожидаемым, качество строительства очень высоким, включая самые современные способы защиты зданий от возникновения резонанса, и, тем не менее, последствия стали катастрофическими. Не вызывает сомнений, что достаточно точный прогноз этих землетрясений смог бы сократить ущерб на порядки.

Главный недостаток второй точки зрения – слабая вера ученых в принципиальную возможность точного прогноза. Отметим, однако, что в этой позиции наметился заметный прогресс. Если в начале 1990-х годов после введения понятия самоорганизующейся критичности (СОК) [Bak, Tang, 1989] у большинства сейсмологов возникло представление о принципиальной невозможности прогноза времени землетрясения, то через 20 лет уже начались дискуссии по поводу возможности оперативного прогноза [Jordan, Jones, 2010]. Принципиальное доказательство предсказуемости землетрясений обязано в основном более чем 20-летнему успешному глобальному эксперименту по прогнозу в реальном времени сильнейших землетрясений по алгоритму $M8$ [Kossobokov et al., 1997]. Помимо других экспериментов по тестированию алгоритмов прогноза (в основном в группе академика В.И. Кейлис-Борока), по инициативе директора Южнокалифорнийского центра землетрясений (SCEC) Т. Джордана недавно создана целая сеть центров тестирования прогнозных моделей [Jordan, 2007], получившая название Коллаборатория по изучению предсказуемости землетрясений (Collaboratory of the Study on the Earthquake Predictability). Следует отметить, что авторитет SCEP существенно возродил интерес к проблеме прогноза землетрясений и привлек к ней значительное число молодых ученых из многих стран мира.

Проблема прогноза землетрясений очень многосторонняя. В данной работе остановимся лишь на одном аспекте, открытом Л.Н. Малиновской и В.И. Кейлис-Бороком [Keilis-Borok, Malinovskaya, 1964] и поддержанном Ч. Рихтером [Richter, 1964], – большим пространстве области подготовки сильных землетрясений. Эта идея примерно через 40 лет получила поддержку в виде гипотетического быстродействующего увеличения радиуса корреляции землетрясений, обнаруженного как на моделях [Gabrielov et al., 2000], так и в реальной сейсмичности [Shebalin, Keilis-Borok, 1999; Shebalin et al., 2000; Keilis-Borok et al., 2001, 2002]. Дальнейшее развитие привело к определению пространственно-временного кластера землетрясений средней силы, названного «цепочкой землетрясений» [Шебалин, 2005; Shebalin, 2006].

Цепочки возникают, как правило, перед сильными землетрясениями, однако не всегда удается найти такую параметризацию, чтобы их число лишь немного превышало число сильных землетрясений. Для уменьшения числа цепочек, являющихся «ложными тревогами», было предложено рассматривать известные среднесрочные предвестники в их пространственной области и перед началом их возникновения и затем с помощью процедуры распознавания отсеивать ложные тревоги. Эта процедура в комплексе получила название «обратное отслеживание предвестников» (Reverse Tracing of Precursors – RTP) [Shebalin et al., 2004; Keilis-Borok et al., 2004; Шебалин, 2006; Shebalin et al., 2006]. Независимый анализ эффективности метода проводился в работах [Zechar, Zhuang, 2010; Molchan, Romashkova, 2011].

В настоящей работе рассматривается применение методики RTP на Курилах и в Японии с использованием данных Японской метеорологической службы. Эффективность метода RTP в этом регионе оценивается с учетом последних данных. В задачу работы входит попытка интерпретация больших пространственных размеров тревог RTP, а также поиск возможных методов их сокращения.

Методика работы

Методика алгоритма RTP подробно изложена в цитируемых выше работах, поэтому здесь вкратце напомним лишь основные определения и подходы.

Цепочка землетрясений (первый этап алгоритма RTP) — выделение последовательностей землетрясений с магнитудой $M \geq M_{\min}$, следующих друг за другом в пространстве и времени и быстро распространяющихся на большие расстояния. Цепочка формируется парами близких по пространству и времени «соседей»; «близость» масштабируется событиями меньшей магнитуды. «Соседями» считаются два эпицентра с индексами i и j , происшедшие по времени в интервале t_0 ($|t_j - t_i| \leq t_0$) на расстоянии не далее $r = r_0 10^{C(m-2.5)}$, где $m = \min(M_i, M_j)$. Для рассматриваемого региона (рис. 1) $M_{\min} = 3.8$, $t_0 = 20$ дней, $r_0 = 50$ км, $C = 0.33$ ($C = 0.35$ в старом каталоге JMA до 1.1.2005, см ниже). Минимальное число элементов (эпицентров) в цепочке 25, ее минимальная длина — 1700 км.

Всего за период с середины 2003 г. в рассматриваемом регионе было диагностировано 9 цепочек. На втором этапе алгоритма RTP, в результате *процедуры распознавания по среднесрочным предвестникам* [Shebalin et al., 2004; Keilis-Borok et al., 2004] в их окрестностях, было отсеяно четыре цепочки, и, таким образом, лишь в пространственной области пяти цепочек диагностирована тревога. Отметим, что второй этап алгоритма RTP в последовательности выполнения следует за первым этапом, однако при этом исследуемый временной интервал, наоборот, предшествует первому — отсюда название алгоритма. Отметим также, что первый этап необходим для второго, так как именно на этапе выделения цепочек определяется пространственная область анализа среднесрочных предвестников и, кроме того, области цепочек выделяют пространственную область тревоги. Для этого используется так называемая R -окрестность цепочки, объединяющая круги радиусом R вдоль кратчайших линий, соединяющих эпицентры, формирующие цепочку.

Пространственно-временное распределение цепочек и тревог хорошо видно на рис. 2 (светлым тоном отмечены области гипотетических тревог, которые были отсеяны на втором этапе алгоритма RTP). В результате ретроспективного анализа применения

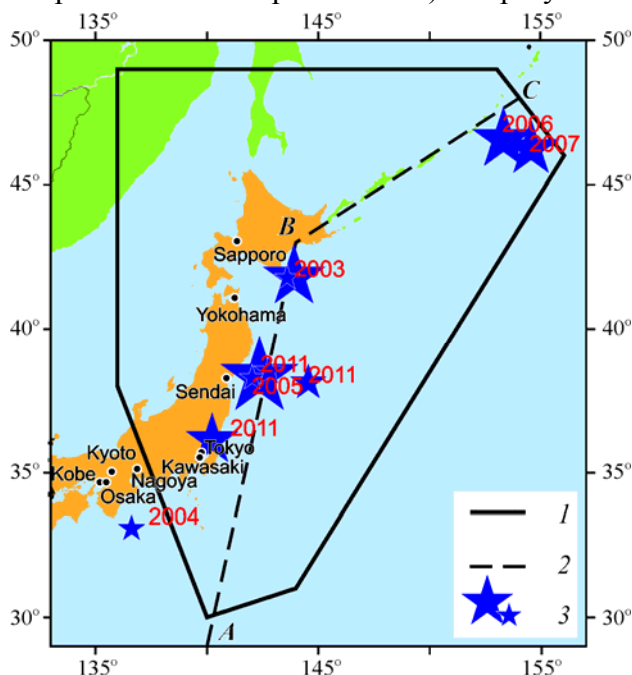


Рис. 1. Район исследований

1 — границы района исследований; 2 — линия $A-B-C$, используемая для проекции двухмерного пространства на рис. 2; 3 — эпицентры землетрясений с $M_w \geq 7.2$ в период с 29.9.2003 г. по 11.3.2011 г. (большие размеры соответствуют большим магнитудам)

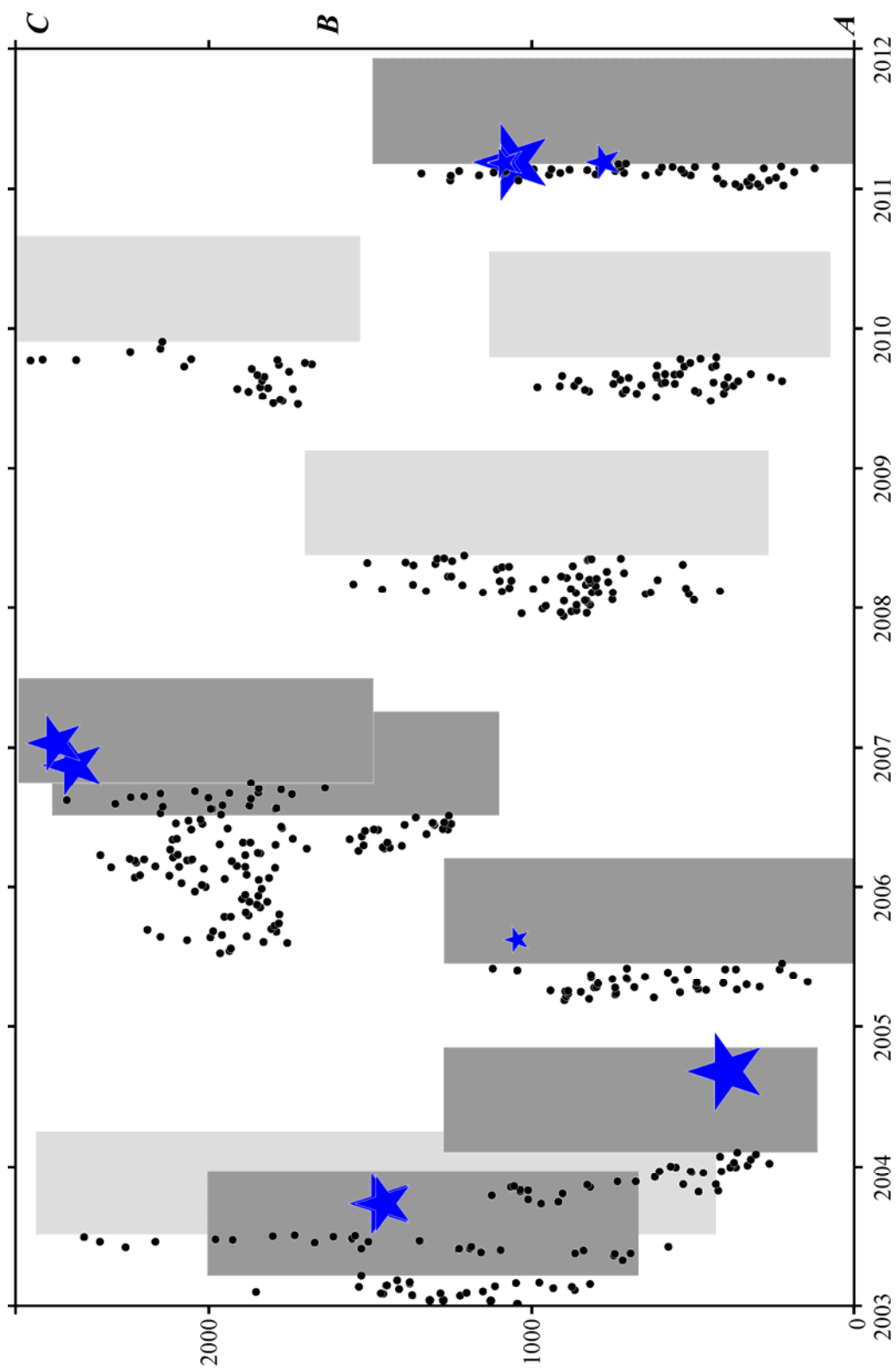


Рис. 2. Пространственно-временная проекция цепочек землетрясений и областей тревоги. Двухмерное пространство проецируется на линию А-В-С (см. рис. 1)
 Светлым тоном обозначены области, не ставшие областями тревоги по результатам распознавания среднесрочных предвестников (2-й этап алгоритма РТР). Обозначения звездочек как на рис. 1

алгоритма RTP время тревоги в рассматриваемом регионе взято 9 мес. Целями прогноза выбраны землетрясения магнитуды $M_w=7.2$ и выше. Все параметры алгоритма для этого региона были фиксированы в марте 2003 г. Однако в сентябре 2009 г. Японское метеорологическое агентство провело перерасчет магнитуд для большинства землетрясений в каталоге. Нами был проведен элементарный корреляционный анализ и слегка изменен лишь один параметр алгоритма RTP, который используется с 1 января 2005 г. Ретроспективный анализ показал значительную схожесть результатов, полученных по «старым» и «новым» магнитудам.

В данной работе рассматривается регион тестирования алгоритма RTP, осуществляемого по предварительному каталогу Японского метеорологического агентства, доступного для зарегистрированных пользователей в Интернете (<www.bosai.go.jp>) Японского национального института наук о Земле и предотвращения стихийных бедствий (National research Institute for Earth science and Disaster prevent – NIED). Он охватывает территорию Японии и Курильских островов, исключая северную часть гряды. Всего же с середины 2003 г. в различных регионах было диагностировано 23 тревоги, включая две текущие. Соответствующая полная информация содержится на сайте <www.rtpstest.org>. Доступ к информации о текущих тревогах возможен лишь для авторизованных пользователей.

В задачу данной работы не входит абсолютно точный анализ эффективности и статистической значимости прогнозов по методу RTP. Во-первых, такие оценки, как правило, делаются при строгих предположениях, необходимых для точных математических выкладок. Среди них независимость землетрясений-целей прогноза, независимость собственно прогнозов, стационарность потока землетрясений. Каждое из этих предположений является неверным, а учет отклонений от этих предположений в математических выкладках чрезвычайно сложен. Тем не менее даже для грубых оценок учет этих факторов необходим. Поэтому, в частности, при подсчете числа успешных прогнозов мы не учитываем афтершоки.

В двух случаях публикация в Интернете прогнозов RTP была осуществлена лишь через несколько дней после происшедших сильных землетрясений, что было связано с некоторой задержкой поступления данных. Это, к сожалению, относится и к землетрясениям 8 и 11 марта 2011 г., прогноз которых был опубликован лишь 13 марта (область тревоги показана на рис. 3). С учетом задержки публикации прогнозов в 1 мес в CSEP эти недостатки были бы существенными лишь при «опционном» прогнозном алгоритме. В нашем же случае, так же как и в CSEP, результат работы алгоритма RTP в каждом случае однозначен. Еще одна досадная неточность связана с зауженными границами рассматриваемого региона. Цепочка, сформировавшаяся в конце 2003 г. на юге Японии, существенно заходила за формальные границы региона, и два землетрясения в сентябре 2004 г. ($M_w=7.2$ и 7.4), имеющие эпицентры внутри этой цепочки, оказались за формальными границами региона на расстоянии около 100 км (рис. 4). Границы региона были сформированы до начала эксперимента (примерно в марте 2003 г.) и остаются прежними в настоящее время. Причина изначального переноса южной границы к северу была сделана в результате элементарной спешки при подготовке алгоритма для начала теста «вперед» (в этот момент уже сформировалась тревога, которая была реализована землетрясением Токати-Оки 25 сентября 2003 г., и у автора готовился доклад на Генеральной ассамблее Международного союза геологии и геофизики в Саппоро, июль 2003 г.). Граница была попросту проведена посередине зоны глубоких землетрясений, с учетом того, что в более южной части о. Хонсю землетрясения с инструментальной магнитудой $M=7$ в каталоге отсутствовали.

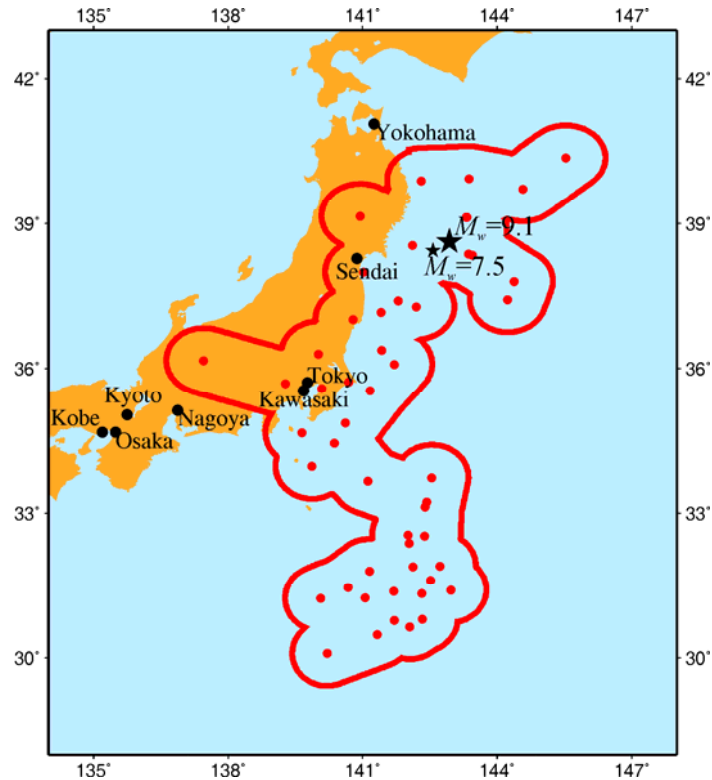


Рис. 3. Область тревоги по алгоритму RTP на период 7 марта – 7 декабря 2011 г. Звездочками обозначены эпицентры землетрясений 9.3.2011 ($M=7.5$) и 11.3.2011 ($M=9.1$).

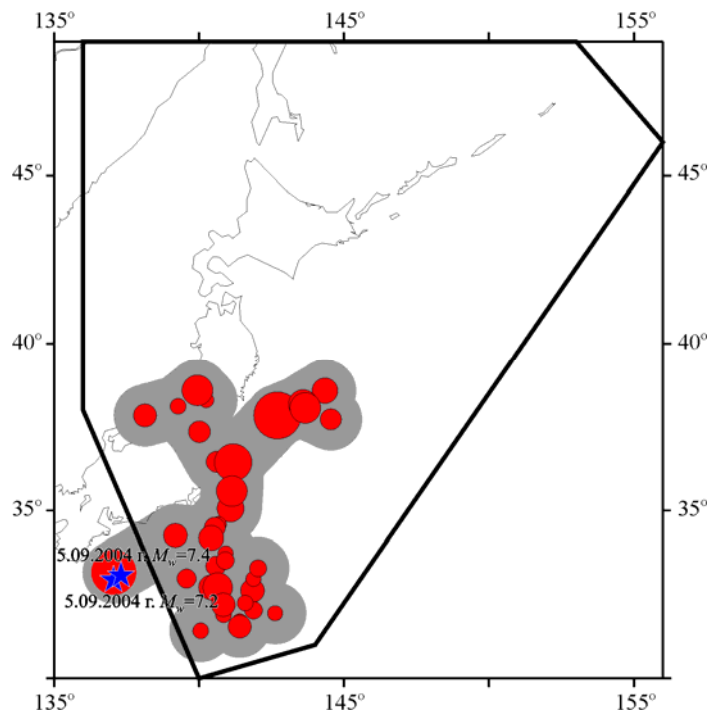


Рис. 4. Область тревоги по алгоритму RTP на период 8 февраля – 8 сентября 2004 г. Звездочками обозначены эпицентры землетрясений 5.9.2004 г. ($M=7.2$ и 7.4) (за формальными пределами рассматриваемого региона). Кругами обозначены эпицентры, формирующие цепочку землетрясений (большой размер соответствует большей магнитуде). Серый цвет – 75-километровая окрестность цепочки (область тревоги)

Не вдаваясь в подробности формулировки прогнозов, сконцентрируемся не на прогнозном алгоритме, а на самой гипотезе, лежащей в его основе. Для ее подтверждения совершенно необходимо дать хотя бы грубые оценки, характеризующие точность алгоритма. В данном случае непересекающихся тревог естественным подтверждением гипотезы было бы большое значение вероятностного выигрыша (Probability gain) [Гусев, 1976; Аки, 1991] прогнозного метода по отношению к ожидаемой частоте землетрясений-целей прогноза. Воспользуемся упрощенной оценкой, т.е. отношением числа землетрясений, которые реально произошли в области в период тревог, к их числу, ожидаемому там исходя из долговременной статистики землетрясений. Оценки Гусева – Аки включают еще ожидаемое число целей прогноза во всем регионе и суммарном пространстве-времени тревог за период теста.

В прогнозах RTP в данном регионе области тревоги велики, поэтому в качестве оценок ожидаемого числа событий использовано число землетрясений с $M_W \geq 7.2$ в Гарвардском каталоге (<http://www.globalcmt.org/CMTfiles.html>) с 1976 по 2003 г., в области тревоги, приведенное к длительности тревоги. Результаты даны в таблице.

Оценки эффективности алгоритма RTP в Японии и на Курилах

№ тревоги	Ожидаемое число событий	Магнитуды фактических событий – целей прогноза	Число целей прогноза
1	0.049	8.3	1
2	0.028	7.2, 7.4 (вблизи границ региона, внутри цепочки землетрясений)	0 (2)
3	0.027	7.2	1
4	0.318	8.3	1
5	0.440	7.5, 9.1 (задержка публикации прогноза)	2
Итого	0.862		5 (7)

Примечание. В скобках дано число успешных прогнозов с учетом двух сильных землетрясений в 2004 г., которые попали в тревогу, но оказались за пределами тестируемого региона.

Таким образом, как следует из нижней строки таблицы, в самом оптимистичном варианте получаем выигрыш $7/0.862=8.12$, в самом пессимистичном – $5/0.862=5.8$.

Для оценки Гусева – Аки дополнительно определим ожидаемое число событий целей прогноза за 7.75 лет теста (оно равно 5.08) во всем регионе тестирования. В отсутствие пропусков цели вероятностный выигрыш Гусева – Аки равен $0.862/5.08=5.89$. Во всех случаях получаемые оценки превышают 5, что является на данном этапе развития методов среднесрочного прогноза весьма высокой величиной.

Следует отметить, что в пятой строке таблицы речь идет о совсем недавнем прогнозе, в пространственно-временной области которого (см. рис. 3) произошло катастрофическое землетрясение 11 марта 2011 г. в Японии ($M=9.1$), а также его форшок 9 марта 2011 г. ($M=7.5$).

Обсуждение

Полученные оценки подтверждают гипотезу широкомасштабной краткосрочной сейсмической активизации перед сильнейшими землетрясениями в рассматриваемом регионе. Анализ рис. 2 показывает, что «цепочечная» активизация перед землетрясе-

ниями 2003, 2005, 2011 гг. имела длительность порядка месяца. При этом практически не выделяется направленность этой активизации. Единственный случай, уже отмечавшийся ранее [Shebalin, 2006], – быстрое смещение активности в направлении на юг после землетрясения Токати-Оки 2003 г. вблизи о. Хоккайдо. Эта активизация завершилась затем с задержкой примерно 8 мес двойным землетрясением в 2004 г. ($M_w=7.2$ и 7.4). В рамках современной теории упругости интерпретация этих результатов весьма затруднена. Рост дистанционной корреляции (long-range correlation), свойственный многим сложным динамическим системам, – лишь описание наблюдаемого здесь явления, но не дает его внятного физического обоснования. По-видимому, очень большую роль играет какой-то неупругий или вязкоупругий «синхронизирующий» фактор, и исследования в области поиска такого фактора (или группы факторов) должны способствовать существенному прогрессу в исследованиях подготовки сильнейших землетрясений.

Следует напомнить, что значительное превышение размеров области подготовки очага землетрясения по сравнению с собственно размерами очага отмечалось очень многими авторами. Список литературы на эту тему превысил бы объем всей статьи. Поэтому лишь повторимся, что здесь речь идет о *кратковременной* широкомасштабной активизации, явление неизвестное или малоизвестное до соответствующих публикаций автора в соавторстве с В.И. Кейлис-Бороком и др. (см. ссылки выше).

Сравнительно высокий вероятностный выигрыш метода RTP в рассматриваемом регионе не только вызывает интерес как к пока не объясненному физическому явлению, но и дает серьезную мотивацию для дальнейшего совершенствования прогнозных алгоритмов. Огромный размер областей тревоги вызывает, в первую очередь, желание найти способ их значительного сокращения.

Одно из возможных направлений – выявление мест максимальных напряжений. К сожалению, прямые измерения GPS позволяют выявить лишь динамику поверхностных деформаций, переход от которых к глубинным напряжениям является пока не решенной задачей. Другое недавно начатое направление исследований – это изучение связи напряжений с временем задержки начала степенного спадания частоты афтершоков от фоновых землетрясений. Для больших областей в Калифорнии это было показано в работах [Шебалин, 2004; Narteau et al., 2008]. Идея возникла на основе более ранних теоретических изысканий [Narteau et al., 2000, 2002, 2003]. Для локальных областей нам удалось показать связь параметра C закона Омори – Утсу [Utsu, 1961] с типами механизмов очагов [Narteau et al., 2009]. Для проверки локального эффекта корреляции параметра C с напряжениями мною в центре тестирования CSEP (в Калифорнии) в середине 2009 г. была установлена разработанная совместно с соавторами прогнозная модель EAST (Early Aftershock Statistics – статистика ранних афтершоков) [Shebalin et al., 2011]. Текущие результаты прогноза «вперед» являются весьма успешными. В настоящее время ведется также работа по переводу этой модели в «частотную» модель, т.е. модель, оценивающую для каждой ячейки пространства, магнитуды и времени ожидаемое число землетрясений. Это позволит оптимальным образом скомбинировать модели RTP и EAST, а также другие модели, несущие существенную дополнительную прогнозную информацию.

На основе опыта сотрудничества с CSEP могу с уверенностью констатировать как высокую техническую организацию тестирования, так и постоянное стремление усовершенствования методики оценивания различных методов. Поэтому мне кажется в высшей степени целесообразным создание (например, на Камчатке) аналогичного центра тестирования, в рамках сотрудничества с CSEP. Каждая национальная организация

CSEP независима и может устанавливать свои дополнительные правила. Но опыт и программное обеспечение CSEP становятся доступными. С другой стороны, российский опыт и методики могли бы быть быстрее использованы в других центрах CSEP.

Заключение

Полученные выше оценки эффективности прогнозного алгоритма RTP подтверждают гипотезу широкомасштабной краткосрочной активизации перед сильнейшими землетрясениями в рассматриваемом регионе. Целесообразны исследования по комплексированию метода RTP с другими прогнозными моделями для сокращения пространственной неопределенности прогнозов.

Благодарности

Автор признателен анонимному рецензенту за ценные замечания, ответы на которые помогли улучшить статью.

Автор благодарен за многолетний доступ к предварительному каталогу Японского метеорологического агентства, предоставленный Японским национальным институтом наук о Земле и предотвращения стихийных бедствий.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-05-00530-а).

Литература

- Гусев А.А. Землетрясения-индикаторы и прогноз // Сейсмичность и глубинная структура Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, 1976. С. 241–247.
- Шебалин П.Н. Афтершоки как индикаторы напряженного состояния в системе разломов // Докл. РАН. 2004. Т. 398, № 2. С. 249–254.
- Шебалин П.Н. Цепочки эпицентров как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2005. № 1. С. 3–15.
- Шебалин П.Н. Методология прогноза сильных землетрясений с периодом ожидания менее года // Алгоритмы прогноза землетрясений. М.: ГЕОС, 2006. С. 5–180. (Вычислительная сейсмология; Вып. 37).
- Aki K. Scale dependence in earthquake phenomena and its relevance to earthquake prediction // Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1991. V. 93. P. 3740–3747.
- Bak P., Tang C. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 15635–15637.
- Gabrielov A., Keilis-Borok V., Zaliapin I., Newman W.I. Critical transitions in colliding cascades // Phys. Rev. 2000. V. 62. P. 237–249.
- Jordan T.H. Earthquake predictability, brick by brick // Seismol. Res. Lett. 2006. V. 77, iss. 1. P. 3–6.
- Jordan T.H., Jones L.M. Operational earthquake forecasting: some thoughts on why and how // Seismol. Res. Lett. 2010. V. 81, iss. 4. P. 571–574.
- Keilis-Borok V.I., Malinovskaya L.N. One regularity in the occurrence of strong earthquakes // J. Geophys. Res. 1964. V. 69. P. 3019–3024.

- Keilis-Borok V., Ismail-Zadeh A., Kossobokov V., Shebalin P.N.* Non-linear dynamics of the lithosphere and intermediate-term earthquake prediction // *Tectonophysics*. 2001. V. 338, iss. 3/4. P. 247–260.
- Keilis-Borok V.I., Shebalin P.N., Zaliapin I.V.* Premonitory patterns of seismicity months before a large earthquake: Five case histories in Southern California // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2002. V. 99, iss. 26. P. 16562–16567.
- Keilis-Borok V., Shebalin P., Gabrielov A., Turcotte D.* Reverse tracing of short-term earthquake precursors // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 2004. V. 145, N 1/4. P. 75–85.
- Kossobokov V.G., Healy J.H., Dewey J.W.* Testing an earthquake prediction algorithm // *Pure Appl. Geophys.* 1997. V. 149. P. 219–232.
- Molchan G., Romashkova L.* Gambling score in earthquake prediction analysis // *Geophys. J. Inter.* 2011. V. 184, iss. 3. P. 1445–1454.
- Narteau C., Shebalin P., Holschneider M., Le Mouel J.-L., Allegre C.J.* Direct simulations of the stress redistribution in the scaling organization of fracture tectonics (SOFT) model // *Geophys. J. Int.* 2000. V. 141. P. 115–135.
- Narteau C., Shebalin P., Holschneider M.* Temporal limits of the power law aftershock decay rate // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107(B12), iss. 2359. P.1201–1214.
- Narteau C., Shebalin P., Hainzl S., Zoeller G., Holschneider M.* Emergence of a band-limited power law in the aftershock decay rate of a slider-block model // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30(11). P. 1568. doi:10.1029/2003GL017110.
- Narteau C., Shebalin P., Holschneider M.* Loading rates in California inferred from aftershocks // *Nonlinear processes in geophysics*. 2008. V. 15, iss. 2. P. 245–263.
- Narteau C., Byrdina S., Shebalin P., Holschneider D.* Common dependence on stress for the two fundamental laws of statistical seismology // *Nature*. 2009. V. 462. P. 642–646. doi:10.1038.
- Richter C.F.* Discussion of paper by V.I. Keilis-Borok and L.N. Malinovskaya, «One regularity in the occurrence of strong earthquakes» // *J. Geophys. Res.* 1964. V. 69. P. 3025.
- Shebalin P.* Increased correlation range of seismicity before large events manifested by earthquake chains // *Tectonophysics*. 2006. V. 424, iss. 3/4. P. 335–349.
- Shebalin P.N., Keilis-Borok V.I.* Phenomenon of local «seismic reversal» before strong earthquakes // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1999. V. 111, iss. 3/4. P. 215–227.
- Shebalin P., Zaliapin I., Keilis-Borok V.* Premonitory raise of the earthquakes' correlation range: Lesser Antilles // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 2000. V. 122, iss. 3/4. P. 241–249.
- Shebalin P., Keilis-Borok V., Zaliapin I., Uyeda S., Nagao T., Tsybin N.* Advance short-term prediction of the large Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003, $M = 8.1$. A case history // *Earth, Planets and Space*. 2004. V 56, iss. 8. P. 715–724.
- Shebalin P., Keilis-Borok V., Gabrielov A., Zaliapin I., Turcotte D.* Short-term earthquake prediction by reverse analysis of lithosphere dynamics // *Tectonophysics*. 2006. V. 413. P. 63–75.
- Shebalin P., Narteau C., Holschneider M., Schorlemmer D.* Short-term earthquake forecasting using early aftershock statistics // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2011. V. 101, iss. 1. P. 297–312.
- Utsu T.* A statistical study on the occurrence of aftershocks // *Geophys. Mag.* 1961. V. 30. P. 521–605.
- Zöller G., Hainzl S., Kurths J.* Observation of growing correlation length as an indicator for critical point behavior prior to large earthquakes // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 2167–2176.
- Zechar J.D., Zhuang J.* Risk and return: evaluating RTP earthquake predictions // *Geophys. J. Int.* 2010. V. 182. P. 1319–1326.

Сведения об авторе

ШЕБАЛИН Петр Николаевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики, Российская академия наук. 117997 г. Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32. Тел.: +7-916-683-61-94. E-mail: shebalin@mitp.ru

RAPID LONG-RANGE ACTIVATION OF SEISMICITY PRIOR TO THE LARGEST EARTHQUAKES OF JAPAN AND KURIL ISLANDS

P.N. Shebalin

International Institute for Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The earthquake prediction algorithm RTP (Reverse tracing of precursors) became known due to successful predictions of the Tokachi-Oki earthquake near Hokkaido, 25 September 2003, $M=8.3$, and San-Simeon earthquake in California, 22 December 2003, $M=6.5$. A detailed documentation of all predictions given by RTP also made the algorithm known. Several of the prediction since 2003 became successful. A special interest to the RTP predictions is in the region from Honshu to central Kurils using preliminary JMA catalog. There, none of the five predictions actually became false alarms, including the recent one, covering epicenters of the 9.3.2011, $M=7.5$ foreshock and the catastrophic $M=9.1$ earthquake of 11.3.2011. A specific property of the RTP alarms in that region is their large size (near 1000 km). However, a relatively short duration of the alarms and their small number allows us to determine the real number of the earthquakes of $M=7.2$ and above about five times larger than expected in average during the equivalent time, thus to reach a probability gain about 5. This confirms a hypothetical phenomenon of a rapid long-range activation of seismicity prior to the largest earthquakes. Trying to understand this phenomenon, we also search for the way to decrease the size of the alarms.

Keywords: Earthquake prediction, short-term seismic activation, radius of correlation, RTP, medium-term precursors, pattern recognition, alarm area.