

УДК 550.343.6

О ПРОЯВЛЕННОСТИ ТИПОВЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВЫХ АНОМАЛИЙ В ФОРШОКОВЫХ ОБЛАСТЯХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, КУРИЛО-КАМЧАТСКИЙ РЕГИОН

© 2025 г. М. В. Родкин^{a, b, c, *}, М. Ю. Андреева^b

^aИнститут теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия

^bИнститут морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН,
ул. Науки, 1Б, Южно-Сахалинск, 693022 Россия

^cИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

*e-mail: rodkin@mitp.ru

Поступила в редакцию 06.08.2024 г.

После доработки 21.10.2024 г.

Принята к публикации 12.12.2024 г.

Обсуждается перспективность нового алгоритма прогноза землетрясений, где за основу берется набор предвестниковых аномалий, ранее надежно выявленных в результате построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения. Принимается во внимание различие физических механизмов разноглубинных землетрясений. По данным регионального каталога Камчатки и Северных Курил КФ ФИЦ ЕГС РАН рассматривается вопрос, насколько часто такие типовые усредненные аномалии статистически надежно выявляются в форшоковых областях отдельных сильных землетрясений. Для этого каталога по крайней мере одна типовая аномалия выявляется в трети случаев целевых землетрясений магнитудой $M \geq 6.5$. Вероятность успешного ретроспективного прогноза в решающей степени зависит от числа событий, зарегистрированных в форшоковой области данного сильного землетрясения. Рост доли ретроспективно прогнозируемых землетрясений с ростом числа событий в форшоковой области данного сильного землетрясения подкрепляется результатами анализа мировых каталогов ISC-GEM и GCMT и дублета Турецких землетрясений 2023 г. Предлагаются варианты развития метода прогноза, обращается внимание на проблему ложных тревог.

Ключевые слова: прогноз землетрясений, типовые прогнозные аномалии, физика сейсмического разрушения, Курило-Камчатский регион

DOI: 10.31857/S0203030625010053, EDN: GIQKQG

ВВЕДЕНИЕ

Актуальными задачами геофизики являются как решение дилеммы принципиальной возможности или невозможности успешного прогноза землетрясений, так и развитие методов прогноза. Широко известно предположение о принципиальной невозможности прогноза землетрясений [Geller et al., 1997]. Проверка в реальном времени показала, однако, что по сравнению со случайным угадыванием наиболее удачные методики прогноза

дают намного лучшие результаты, хотя и лишь отчасти удовлетворяющие практическим требованиям [Кособоков, Соловьев, 2015; Ismail-Zadeh, Kossobokov, 2020], т.е. принципиальная возможность прогноза может полагаться доказанной. Основными препятствиями на пути получения эффективного прогноза [Соболев, 1993; Kagan, Jackson, 2000; Соболев, Пономарев, 2003; Завьялов, 2006; Jordan et al., 2011] считаются как чрезвычайно сильная фоновая изменчивость сейсмического режима, затрудняющая своевременное выявление прогнозных

признаков (часто, однако, выявляемых апостериори), так и отсутствие достаточно развитой физической модели сейсмического процесса. Однако общепринято, что физические механизмы разноглубинных землетрясений различаются [Касахара, 1985; Калинин и др., 1989; Родкин и др., 2009]. Последнее обстоятельство важно и тем, что прогнозные признаки землетрясений, различающихся своим физическим механизмом, также могут различаться.

В последнее время по вопросам выявления и уточнения характера прогнозных аномалий и по пониманию различия физических механизмов разноглубинных землетрясений были получены новые результаты. Статистически несомненные и хорошо параметризуемые средние прогнозные аномалии были получены в результате построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ), получаемой путем масштабированного суммирования данных по большому числу сильных землетрясений [Родкин, 2008; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016; Родкин, 2020]. При использовании мировых каталогов число сильных землетрясений, суммируемых при построении ООСЗ, составляет несколько сотен, до 1000 событий. При использовании региональных каталогов число таких землетрясений много меньше, соответственно, результаты построения ООСЗ по региональным данным более зашумленные [Родкин и др., 2020].

Подтвердились и гипотезы о различии физических механизмов разноглубинных землетрясений. В работах [Rodkin, 2022; Родкин, Липеровская, 2023] было продемонстрировано различие ряда параметров и прогнозных эффектов разноглубинных землетрясений, при этом характер этих различий отвечает ожидаемым изменениям физических механизмов разрушения в очагах разноглубинных землетрясений [Bridgman, 1945; Калинин и др., 1989; Родкин и др., 2009; Houston, 2015; Родкин, Рундквист, 2017].

Для наиболее распространенного вида каталогов землетрясений (когда известны положение гипоцентра, время и магнитуда события) в ООСЗ наблюдаются 2 или 3 аномалии. Первая аномалия отвечает степенному росту интенсивности потока форшоков, вторая — уменьшению наклона графика повторяемости b -value, удобно

оцениваемому методом максимального правдоподобия по известной формуле [Aki, 1965]

$$b = \lg(e / (\text{mean}(M) - M_c)), \quad (1)$$

где $\text{mean}(M)$ — среднее значение магнитуд землетрясений, превышающих уровень достоверной регистрации M_c . Как видно из соотношения (1), величина наклона графика повторяемости изменяется в противофазе с изменениями средней магнитуды землетрясений $M \geq M_c$; можно рассматривать любую из этих характеристик. Ниже используется величина средней магнитуды.

Заметим, что на качественном уровне две вышеупомянутые аномалии являются фактически тавтологиями. Действительно, первая аномалия на качественном уровне может быть сформулирована так: предвестником сильного землетрясения является рост числа землетрясений, а вторая так: предвестником события большой магнитуды является увеличение средней магнитуды землетрясений. Эти аномалии получают нетривиальное наполнение, если используется параметризация, детализирующая характер аномалий. Метод построения и анализа ООСЗ позволяет получить наиболее робастную и точную их параметризацию. Обе отмеченные аномалии хорошо известны и часто используются в алгоритмах прогноза землетрясений.

В качестве третьей типовой аномалии используется тенденция изменения средней глубины форшоков. На тенденцию изменения глубины событий в форшоковой и афтершоковой областях также уже обращалось внимание (например, в работах [Погожин, 2009; Rodkin, Mandal, 2012]), но эта аномалия оставалась гипотетической, и при прогнозе она используется крайне редко. Заметим, что данная аномалия уже указывает на определенную физику процесса сейсмического разрушения. В том (более распространенном) случае, когда имеет место тенденция к уменьшению глубины событий и смещение по глубине не превышает пары десятков километров, наиболее естественно связать такие изменения с прорывами вверх легкого флюида.

Возникает вопрос о возможности использования выявленных в обобщенной окрестности

аномалий не только для исследования физики землетрясений, как это было сделано ранее [Родкин, 2008, 2020; Rodkin, Tikhonov, 2016; Rodkin, 2020], но и в целях прогнозирования. Преимуществом такого подхода представляется возможность использования наиболее полной и точной параметризации предвестниковых аномалий. В частности, при анализе ООЗС было показано, что средняя интенсивность потока форшоков n нарастает в обобщенной окрестности к моменту обобщенного сильного землетрясения (ОСЗ) по степенному закону согласно уравнению

$$\lg(n) = a + b \lg(\Delta t), \quad (2)$$

где Δt — время до момента ОСЗ. Амплитуды A аномалий величин наклона графика повторяемости (что эквивалентно изменениям среднего значения магнитуд $M \geq M_c$) и средней глубины форшоков нарастают по мере приближения момента обобщенного главного события согласно уравнению

$$A = a + b \lg(\Delta t). \quad (3)$$

В уравнениях (2) и (3) $\{a, b\}$ — подлежащие определению коэффициенты, различающиеся для разных видов аномалий и требующие уточнения для конкретного региона и каталога. При этом было показано [Rodkin, Tikhonov, 2016], что для ООЗС значения коэффициентов $\{a, b\}$ могут быть оценены с вполне удовлетворительной точностью.

Время начала развития аномалий вида (2) и (3), когда график изменения амплитуды ООЗС пересекается с фоновым уровнем, близко для всех трех аномалий и отстоит примерно на 100 дней от момента ОСЗ.

Ниже, по данным каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН [Catalog ..., 2023] для Камчатки и Северных Курил рассматривается результативность использования ООЗС для выявления предвестниковых аномалий в форшоковых областях отдельных сильных землетрясений. Результаты сравниваются с результатами аналогичного анализа по данным мировых каталогов ISC-GEM и GCMT [Родкин, 2023] и для дублета сильных Турецких землетрясений 2023 г. [Родкин и др., 2023].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Результатом построения и анализа обобщенной окрестности сильных ($M \geq 6.5$) землетрясений [Родкин и др., 2020] для регионального каталога Курильских островов стало ожидаемое соответствие с результатами анализа мировых данных для зон субдукции. Ниже использован каталог КФ ФИЦ ЕГС РАН Камчатки и северной группы Курильских островов. В качестве окрестности сильного землетрясения будем принимать землетрясения, отстоящие от эпицентра соответствующего главного события магнитудой M не более чем на три размера очага R (км), оцениваемого по формуле, являющейся осредненным вариантом нескольких близких выражений, представленных в работах [Соболев, 1993; Соболев, Пономарев, 2003]:

$$\lg(R) = 10^{0.5M-1.9}. \quad (4)$$

Рассчитываемую на основе выражения (4) область будем полагать зоной подготовки (форшоковой областью) землетрясения магнитудой M . Мы использовали эту формулу, а не более часто используемые соотношения [Wells, Coppersmith, 1994], потому что данный каталог землетрясений не дает ориентации очага и в этой ситуации соотношение (4) проще и предпочтительнее.

Третья аномалия, отвечающая изменениям средней глубины форшоков, как показано в работах [Rodkin, 2020; Родкин и др., 2020; Родкин, Липеровская, 2023], различна для землетрясений разных интервалов глубины. Для коровых и промежуточных землетрясений, в очагах которых предполагается наличие флюида, характерна тенденция всплывания очагов землетрясений. Для глубоких землетрясений ($H \geq 150$ км) типично увеличение средней глубины, иногда весьма значительное.

Далее выясним, насколько часто в очаговых областях отдельных сильных ($M \geq 6.5$) землетрясений реализуются статистически надежно выявляемые аномалии типа (2) или (3). В используемом каталоге КФ ФИЦ ЕГС РАН [Catalog ..., 2023] приведено 49 событий магнитудами $M \geq 6.5$. В качестве критерия статистической значимости примем вероятность случайного возникновения наблюдаемой корреляции типа (2) или (3) менее 0.1. Учитывая

характерную продолжительность развития средней аномалии около 100 дней, будем рассчитывать корреляции (аномалии) для интервалов времени 50, 100 и 200 сут до момента соответствующего сильного события. Для этих интервалов времени и пространственной области по горизонтали и по вертикали не более трех размеров очага соответствующего главного события будем рассчитывать коэффициенты регрессии между $\lg(\Delta t)$ и значениями логарифма потока событий, а также значениями средней магнитуды и глубины форшоков. Интенсивность потока событий будем оценивать для последовательных по времени групп из n событий (число событий в группе, деленное на длительность группы по времени, обычно принималось $n = 3$).

Учитывая различия механизмов разноглубинных землетрясений и нечеткий характер смены механизмов по глубине, будем отдельно рассматривать события в диапазонах 0–50 км, 50–150 км и глубже 150 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

События в интервале глубин до 50 км

На этот интервал глубин в каталоге КФ ГС РАН приходится 23 землетрясения с магнитудами $M \geq 6.5$. Будем рассматривать эти события как целевые. Знак и характер типовых прогнозных соотношений типа (2) и (3) известен из результатов, полученных ранее при анализе ООСЗ [Родкин, 2008, 2020; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016]; с уменьшением Δt поток событий возрастает, среднее значение магнитуды растет, средняя глубина для событий глубиной до 100–150 км уменьшается.

Сначала оценим средние значения коэффициентов $\{a, b\}$. Для этого для всех 23 целевых землетрясений и интервалов времени 50, 100 и 200 сут отбирались события, попавшие в форшоковую область по крайней мере одного целевого землетрясения. По этим данным строилась обобщенная окрестность и для нее вычислялись коэффициенты регрессии $\{a, b\}$; их значения представлены в табл. 1. Для аномалий, отвечающих интервалам времени 50, 100 и 200 сут до момента обобщенного сильного события, значения этих коэффициентов

регрессии $\{a, b\}$, вообще говоря, будут различны. Однако в случаях аномалий для логарифмов числа событий и средних величин магнитуды эти коэффициенты варьируют не сильно (см. табл. 1); при этом знаки аномалий отвечают ожидаемым. В случае изменения глубины форшоков в интервалах времени $\Delta t = 50$ и 100 сут статистически значимой аномалии в ООСЗ не наблюдается. Для максимального интервала времени $\Delta t = 200$ сут аномалия ООСЗ имеет место и отвечает ожидаемому уменьшению глубины.

Данные по окрестностям отдельных целевых землетрясений из выбранного интервала глубин сравниваются со значениями, соответствующими ООСЗ по всем 23 целевым землетрясениям (см. табл. 1). Для дальнейшего сопоставления будут использованы целевые землетрясения, в форшоковых областях которых получены корреляционные соотношения типа (2) или (3) требуемого уровня значимости (0.1). При рассмотрении всех трех видов аномалий и трех возможных интервалов времени 50, 100 и 200 сут для 23 целевых землетрясений данного глубинного интервала обнаружено 53 случая корреляций требуемой статистической значимости. Эти соотношения отвечают 11 разным целевым землетрясениям. Заметим, что набор событий, попадающих в интервалы времени 50, 100 и 200 сут до данного главного события, часто сильно перекрывается и значения коэффициентов регрессии $\{a, b\}$ для разных

Таблица 1. Средние значения коэффициентов регрессии для событий глубиной $0 \leq H \leq 50$ км

Интервал времени Δt , сут	Коэффициенты регрессии	
	b	a
Аномалия роста числа событий, формула (2)		
50	–0.43	5.34
100	–0.55	5.37
200	–0.61	5.41
среднее	-0.53 ± 0.09	5.37 ± 0.03
Аномалия увеличения средней магнитуды, формула (3)		
50	–0.05	4.16
100	–0.05	4.2
200	–0.05	4.1
среднее	-0.05 ± 0.01	4.16 ± 0.03
Аномалия изменения средней глубины, формула (3)		
200	4.5	25

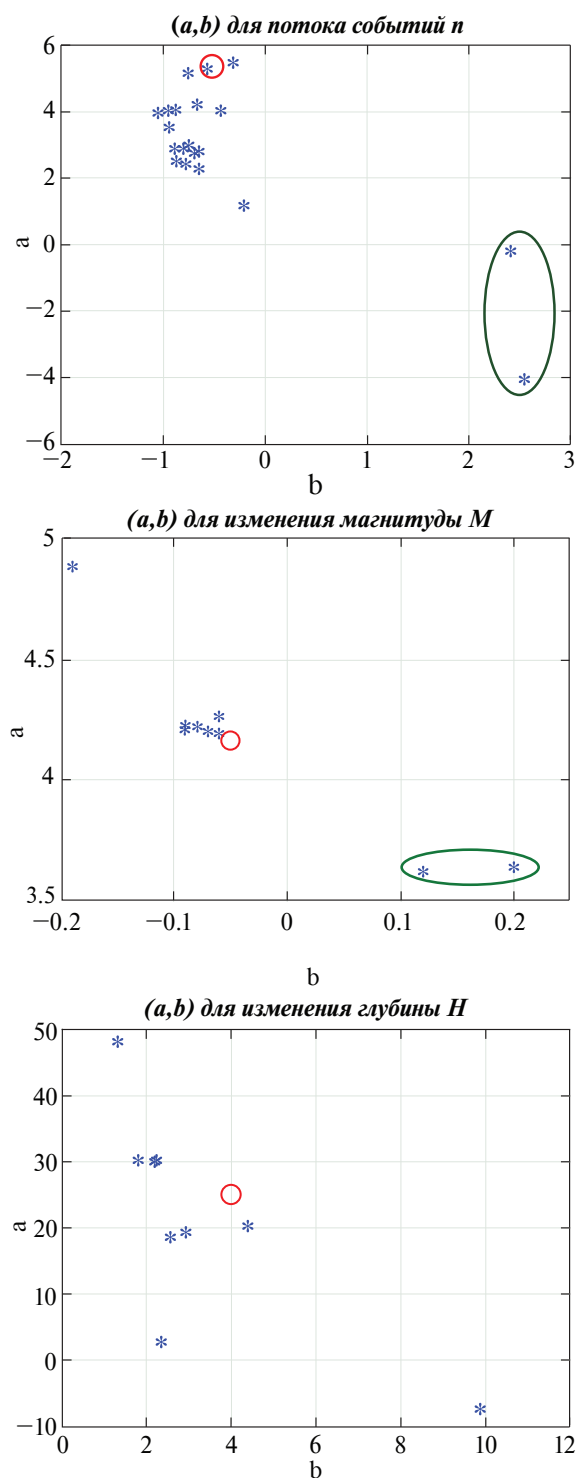


Рис. 1. Параметры уравнения регрессии $\{a, b\}$ для событий в интервале глубин $0 \leq H \leq 50$ км.

Звездочками отмечены предвестниковые окрестности отдельных землетрясений магнитудой $M \geq 6.5$, красным кружком — регрессия всех событий (ООСЗ).

а — результаты расчетов для потока событий n , формула (2); б — для изменения среднего значения магнитуды M , формула (3); в — для изменения средней глубины форшоков H , формула (3). Зеленым эллипсом отмечены 2 землетрясения, фактически являющиеся афтершоками более сильного события.

времен запаздывания часто оказываются весьма близкими.

Не во всех случаях полученный знак корреляции отвечает ожидаемому. Для двух целевых землетрясений — 29 апреля 2006 г. с $M = 6.6$ (60.54N, 167.76E) и 22 мая 2006 г. с $M = 6.6$ (60.75N, 166.10E) — по мере приближения момента целевого землетрясения наблюдается не рост, а спад интенсивности потока событий. Для этих же двух землетрясений и корреляции изменения средней магнитуды форшоков имеют не соответствующий табл. 1 знак. Однако оба эти землетрясения могут трактоваться как афтершоки сильного землетрясения с $M = 7.1$ (60.98N, 167.37E), произошедшего 20 апреля 2006 г. Утроенные очаговые области этих землетрясений перекрываются. Все три события неглубокие. Отсюда можно предположить, что режим событий в форшоковых областях целевых землетрясений 29 апреля и 22 мая больше отвечает не форшоковой активизации в преддверии этих землетрясений, а режиму афтершоков предыдущего целевого землетрясения с магнитудой 7.1.

Сопоставлять данные по форшоковым окрестностям отдельных целевых землетрясений с типовой аномалией, полученной по результатам анализа ООСЗ всей совокупности целевых землетрясений, можно исходя только из знака соответствующего эмпирического регрессионного соотношения; но более содержательным представляется сравнение пар соответствующих коэффициентов регрессионных соотношений $\{a, b\}$ со значениями, полученными для ООСЗ (см. табл. 1). На рис. 1 представлены значения коэффициентов $\{a, b\}$ значимой регрессии отдельных целевых землетрясений магнитудой $M \geq 6.5$ и глубиной до 50 км для интенсивности потока событий, средней магнитуды землетрясений и средней глубины форшоков. Эти значения сравниваются с аналогичными коэффициентами для всей совокупности целевых землетрясений данного диапазона глубины (см. красный кружок на рис. 1). Несовпадающие по знаку значения коэффициентов регрессии для землетрясений 29 апреля и 22 мая отмечены на рис. 1а, б зеленым эллипсом.

В случае изменения глубин форшоков характер регрессии оказался наименее единообразным (см. рис. 1в). Согласно мировым данным,

при неглубоких событиях доминирует механизм всплывания форшоков. На рис. 1в мы видим большой разброс значений коэффициентов регрессии $\{a, b\}$ для отдельных целевых землетрясений при положительном знаке значений b . Интегральная корреляция, для всей совокупности событий, также имеет (ожидаемый) положительный знак.

Для целевых землетрясений глубиной до 50 км выявлено 53 случая статистически значимых (на уровне 0.1) регрессий между логарифмом времени до момента главного события и интенсивностью потока событий, средней магнитудой или средней глубиной землетрясений. При этом довольно часто значения коэффициентов регрессии $\{a, b\}$ для интервалов времени 50, 100 и 200 сут до данного целевого события весьма близки. По крайней мере одна искомая аномалия наблюдается у 9 из 23 целевых землетрясений с $M \geq 6.5$. То есть 40% неглубоких целевых землетрясений могли бы быть предсказаны на основе выявленных в обобщенной окрестности типовых аномалий уже таким довольно простым способом.

Еще для двух целевых землетрясений, в действительности являющихся скорее афтершоками, типовых аномалий не наблюдается; статистически значимые аномалии в их форшоковых областях отвечают характеру афтершоковых аномалий более сильного предшествующего целевого землетрясения с $M = 7.1$; эти два события, естественно, предсказаны быть не могли.

События в интервале глубин 50–150 км

Разбиение на интервалы выше и ниже уровня 50 км связано с различием в физических процессах очагов разноглубинных землетрясений: события глубже 50 км заведомо не могут реализовываться по механизму упругой отдачи Рейда [Касахара, 1985; Калинин и др., 1989; Родкин, Рундквист, 2017]. В используемом каталоге интервалу глубин 50–150 км отвечает 14 целевых землетрясений с $M \geq 6.5$. В табл. 2 приведены значения коэффициентов регрессии $\{a, b\}$ для совокупности всех этих 14 целевых землетрясений. На рис. 2, аналогично рис. 1, дано сопоставление значений коэффициентов регрессии $\{a, b\}$ для ООСЗ всей совокупности 14 целевых землетрясений с аналогичными коэффициентами каждой статистически значимой связи для отдельного целевого землетрясения и интервалов времени упреждения 50, 100 и

Таблица 2. Средние значения коэффициентов регрессии для событий глубиной $50 \leq H \leq 150$ км

Интервал времени Δt , сут	Коэффициенты регрессии	
	b	a
Аномалия роста потока событий, формула (2)		
50	–0.51	3.9
100	–0.64	4.03
200	–0.59	3.95
среднее	-0.58 ± 0.07	3.97 ± 0.05
Аномалия увеличения средней магнитуды, формула (3)		
50	–0.10	4.48
100	–0.11	4.49
200	–0.10	4.47
среднее	-0.1 ± 0.006	4.48 ± 0.01
Аномалия изменения средней глубины, формула (3)		
50	4.89	59.9
100	5.86	59.3
200	4.17	61.4
среднее	4.97 ± 0.85	60.2 ± 1.1

200 сут. Статистически значимые регрессии были выявлены 22 раза, они наблюдались в окрестности четырех целевых землетрясений с $M \geq 6.5$.

Для отдельных целевых землетрясений знак аномалии совпадает с ожидаемым в ООСЗ в 17 из 22 случаев статистически значимых аномалий. Для двух землетрясений наблюдался спад сейсмической активности на интервале времени 50 сут перед главным событием при ожидаемом и при этом статистически достоверном росте на большем интервале времени – 100 или 200 сут. Возможно, в этих случаях имел место эффект сейсмического затишья, неоднократно описанный разными авторами (например, [Соболев, 1993; Завьялов, 2006]), но при суммировании данных по большому числу отдельных событий в ООСЗ ранее не наблюдавшийся.

По данным для событий с глубиной более 150 км статистически значимых аномалий в окрестности отдельных целевых событий выявлено не было. В целом получаем, что для используемого каталога искомые прогнозные аномалии при землетрясениях магнитудой $M \geq 6.5$ наблюдаются примерно в трети случаев.

ОБСУЖДЕНИЕ

Посмотрим теперь, для каких именно землетрясений оказывается характерным наличие прогнозируемых путем анализа ООСЗ

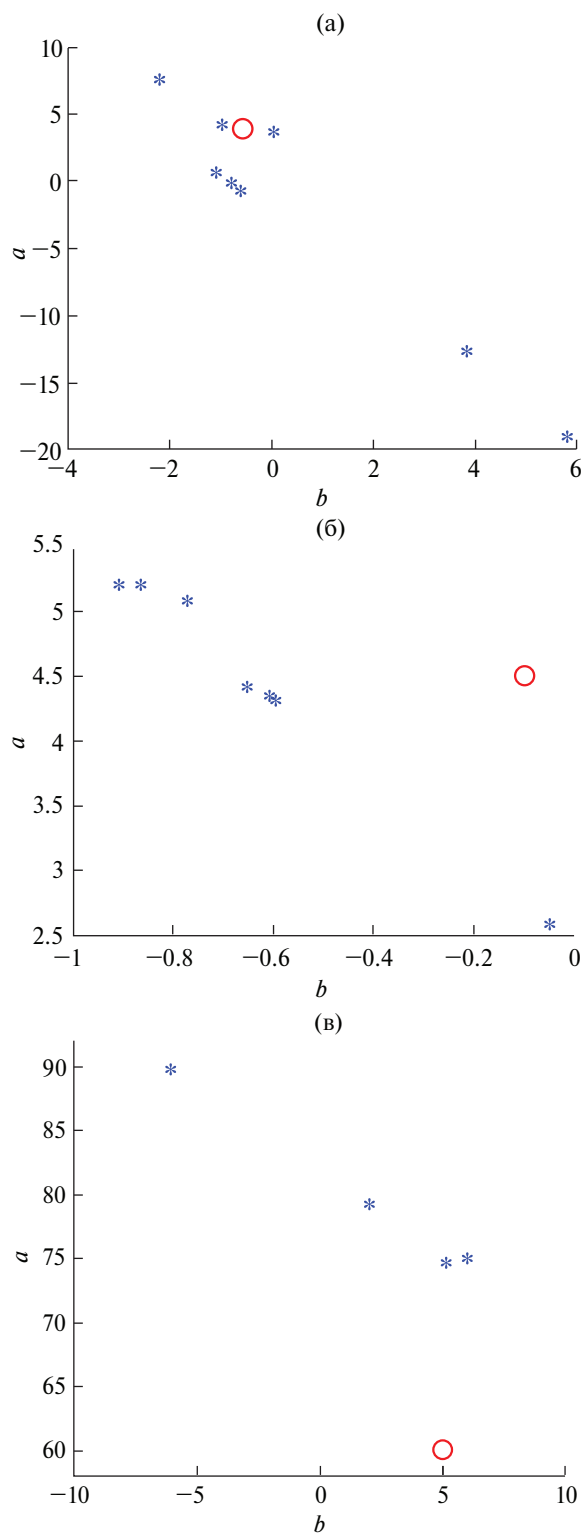


Рис. 2. Параметры уравнения регрессии $\{a, b\}$ для событий в интервале глубин $50 \leq H \leq 150$ км.

Звездочками отмечены предвестниковые окрестности отдельных землетрясений магнитудой $M \geq 6.5$, красным кружком — регрессия всех событий (ООСЗ).

а — результаты расчетов для потока событий n , формула (2); б — для изменения среднего значения магнитуды M , формула (3); в — для изменения средней глубины форошока H , формула (3).

аномалий. В работе [Родкин, 2023] было показано, что, по данным мировых каталогов ISC-GEM и GCMT, явной тенденции к более частому выделению с помощью ООСЗ прогнозных аномалий для событий с $M \geq 7.5$ ни по глубине, ни по географическому расположению не наблюдается. При этом есть зависимости от числа событий, зарегистрированных в данной форошоковой области, и, менее четкая, от магнитуды главного землетрясения.

Аналогичные тенденции имеют место и по данным каталога Камчатки и Северо-Курильских островов. На рис. 3 представлены данные по числу N удовлетворительно полно зарегистрированных землетрясений с $M \geq 3.6$, произошедших на расстоянии в $3R$ окрестности целевых землетрясений с $M \geq 6.5$ в интервале времени 100 дней перед целевым, где R рассчитывается по формуле (4). Из этого рисунка видно, что ни одно из целевых землетрясений, в окрестности которого было зарегистрировано менее 10 надежно регистрируемых событий $M \geq 3.6$, предсказано не было. Напротив, 13 из 19 целевых землетрясений, в форошоковой области которых было зарегистрировано 20 и более событий, были ретроспективно предсказаны. При этом из 6 непредсказанных целевых землетрясений два события с магнитудой $M = 6.6$ оказались в афтершоковой области предшествующего целевого землетрясения с $M = 7.1$; как уже отмечалось выше, для них путем анализа ООСЗ также были выявлены статистически значимые аномалии, но отвечающие афтершоковому, а не форошоковому режиму.

Из рис. 3 видно, что доля ретроспективно спрогнозированных землетрясений имеет тенденцию расти с магнитудой. Но эта тенденция существенно менее четкая, чем для числа событий. Скорее всего, она вторична и связана с тем, что размер форошоковой области растет с магнитудой, соответственно, увеличивается, в среднем, и число событий, регистрируемых в форошоковой области. Заметим, что эта тенденция хорошо согласуется с результатами применения известного алгоритма прогноза землетрясений M8. Опыт применения этого и других алгоритмов говорит, что успешность прогноза растет с магнитудой главного события [Кособоков, Соловьев, 2015; Ismail-Zadeh, Kossobokov, 2020]. В частности, получаемые

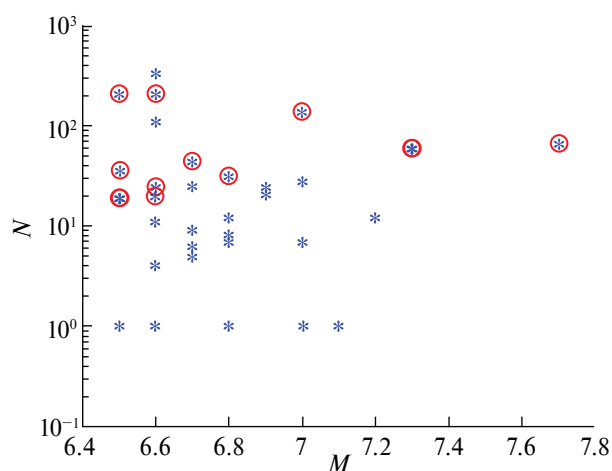


Рис. 3. Магнитуды целевых землетрясений (звездочки) и землетрясений, ретроспективно предсказанных по ним (красные кружки), а также число (N) событий магнитудой $M \geq 3.6$, зарегистрированных в их форшоковых областях (часть точек перекрываются).

с использованием алгоритма M8 прогнозы довольно успешны для событий с $M \geq 8.0$, но расширение области применения алгоритма M8 на более слабые события приводит к сильному ухудшению качества прогноза.

Сравним теперь, используя ранее опубликованные данные по ретроспективному прогнозу событий с $M \geq 7.5$ по мировым каталогам ISC-GEM и GCMT [Родкин, 2023], эффективность ретроспективного прогноза по данным разных каталогов (табл. 3). Как видно из табл. 3, доля ретроспективно предсказанных землетрясений минимальна (всего 4%) для наименее полного каталога ISC-GEM, выше (12%) — для более полного каталога GCMT, еще выше (27%) — для регионального каталога Камчатки и Северных

Курил. Такая тенденция вполне соответствует данным рис. 3, согласно которым доля ретроспективно прогнозируемых землетрясений в решающей степени зависит от числа слабых событий, зарегистрированных в форшоковой области данного сильного землетрясения. Добавим, что, согласно работе [Родкин и др., 2023], в обеих областях подготовки дублета сильных ($M \geq 7.5$) Турецких землетрясений 06.02.2023 были зарегистрированы аномалии, выявленные по ООСЗ. Использованный в работе [Родкин и др., 2023] региональный каталог землетрясений Турции является наиболее детальным ($M_c = 2.0$) из всех рассмотренных в данной работе. Предположительное наличие означенной тенденции позволяет поставить задачу прогноза землетрясений иначе: какова должна быть система регистрации землетрясений, чтобы получать прогнозные аномалии целевых событий магнитудой $M > 0$ с вероятностью не ниже p .

Полученные результаты представляются обнадеживающими, но доля ретроспективно выявляемых сильных землетрясений пока неудовлетворительна. В плане дальнейшей отработки нового алгоритма прогноза планируется увеличить число сравниваемых типовых аномалий, выявленных с помощью ООСЗ (что осуществимо, например, при использовании каталогов сейсмических моментов, таких как GCMT), усложнить алгоритм сравнения с идеальной моделью, рассматривая совокупность аномалий, и при этом уменьшить требование к уровню достоверности каждого отдельного прогнозного признака. Надо полагать, что доля ретроспективно спрогнозированных землетрясений при

Таблица 3. Доля “предсказанных” сильных событий

Каталоги	Число событий	Число выявленных аномалий	Число целевых событий с аномалиями	Доля “предсказанных” землетрясений, %
Мировые	$M \geq 7.5$			
ISC-GEM (1904–2014)	414	75	23	4
GCMT (1976–2023)	117	40	14	12
Камчатка – Северные Курилы (1962–2020)	$M \geq 6.5$			
	49	59	13	27
Южная Турция (2015–2023)	$M \geq 7.5$			
	2	4	2	100

этом увеличится. Также планируется перейти к использованию более детальных каталогов, что увеличит число слабых событий в форшоковых областях сильных землетрясений. Подчеркнем, что все еще неисследованной остается частота получения ложных тревог.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения позволяет получить детальные и хорошо параметризуемые образы набора типовых форшоковых и афтершоковых аномалий. С использованием данных регионального каталога Камчатки и Северных Курил КФ ФИЦ ЕГС РАН рассматривался вопрос, насколько часто такие аномалии могут статистически надежно выявляться в очаговых областях отдельных сильных землетрясений. Для данного каталога по крайней мере одна аномалия (а чаще несколько) выявляется с помощью ООСЗ примерно для трети событий магнитудой $M \geq 6.5$. При этом вероятность получения ретроспективного прогноза конкретного землетрясения в решающей степени зависит от числа слабых землетрясений, зарегистрированных в его форшоковой области. При регистрации в форшоковой области 40 и более событий доля ретроспективно спрогнозированных сильных ($M \geq 6.5$) событий приближается к 80%.

Тенденция к росту доли ретроспективно прогнозируемых событий подкрепляется результатами анализа для событий с $M \geq 7.5$ по данным мировых каталогов ISC-GEM и GCMT и для дублета сильных Турецких землетрясений 2023 г. Предложены варианты развития рассмотренного метода прогноза; обращается внимание на нерешенность проблемы ложных тревог.

Полученные результаты позволяют по-новому взглянуть на задачу прогноза землетрясений в целом: какова должна быть система регистрации землетрясений, чтобы получать прогнозные аномалии целевых событий магнитудой $M > 0$ с вероятностью не ниже заданной.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Тахир С. Ирмаку (кафедра геофизической инженерии, Университет Коджаэли, Коджаэли, Турция) за предоставление

регионального каталога землетрясений района дублета Турецких землетрясений 06.02.2023 г.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН и ИМГиГ ДВО РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
- Кособоков В.Г., Соловьев А.А.* Об оценке результатов тестирования алгоритмов прогноза землетрясений // Доклады РАН. 2015. Т. 460. № 6. С. 710–712.
- Калинин В.А., Родкин М.В., Томашевская И.С.* Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. М.: Наука, 1989. 158 с.
- Касахара К.* Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
- Рогожин Е.А.* Сейсмотектоника центрального сектора Большого Кавказа как основа для сейсмического мониторинга и оценки опасности // Вестник Владикавказского Научного Центра. 2009. Т. 9. № 4. С. 16–22.
- Родкин М.В.* Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 66–77.
- Родкин М.В., Никитин А.Н., Васин Р.Н.* Сейсмотектонические эффекты твердофазных превращений в геоматериалах. М.: ГЕОС, 2009. 198 с.
- Родкин М.В., Рундквист Д.В.* Геофлюидодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. Долгопрудный: Интеллект, 2017. 288 с.
- Родкин М.В., Андреева М.Ю., Григорьева О.О.* Анализ обобщенной окрестности сильного землетрясения по региональным данным, Курило-Камчатский регион // Вулканология и сейсмология. 2020. № 6. С. 67–77.
- Родкин М.В.* Типовая фор- и афтершоковая аномалия — эмпирика, интерпретация // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 64–76.
- Родкин М.В., Липеровская Е.В.* О различии физических механизмов разноглубинных землетрясений и характера их ионосферного отклика // Физика Земли. 2023. № 3. С. 48–62.

- Родкин М.В. Новый алгоритм прогноза землетрясений — подходы и вопросы // Тезисы. III Всероссийская научная конференция с международным участием “Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений” (25–26 октября 2023 г.). М.: ИТПЗ РАН, 2023. С. 215–219.
- Родкин М.В., Ирмак Т.С., Таймаз Т. Дублет сильных землетрясений в Турции 6 февраля 2023 г. обозначил ряд проблем // Тезисы докладов. IX Всероссийская научно-техническая конференция “Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов” (24–30 сентября 2023 г.). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2023. С. 23–24.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 273 с.
- Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits // Bulletin Earthquake Research Institute University. 1965. V. 43. P. 237–239.
- Bridgman P.W. Polymorphic Transitions and Geological Phenomena // American Journal of Science. 1945. V. A 243(1). P. 90–96.
- Catalog of earthquakes in Kamchatka and the Commander Islands. Available from: <https://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue> (Last Accessed November 11, 2023).
- Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. Earthquakes Cannot Be Predicted // Science. 1997. V. 275(5306). P. 1616–1616.
<https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1616>
- Houston H. Deep earthquakes // Treatise on Geophysics, 2nd ed. V. 4. Oxford: Elsevier, 2015. P. 329–354.
- Ismail-Zadeh A., Kossobokov V.G. Earthquake prediction, M8 algorithm // Encyclopedia of Solid Earth Geophysics / Ed. H.K. Gupta. Cham: Springer, 2020. P. 204–207.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_157-1
- Jordan T.H., Chen Y.-T., Gasparini P. et al. Operational earthquake forecasting — state of knowledge and guidelines for utilization // Annals Geophysics. 2011. V. 54. № 4. P. 315–391.
- Kagan Y.Y., Jackson D.D. Probabilistic forecasting of earthquakes // Geophys. J. Intern. 2000. V. 143. Iss. 2. P. 438–453.
- Rodkin M.V. Patterns of seismicity found in the generalized vicinity of a strong earthquake: Agreement with common scenarios of instability development // Extreme Events and Natural Hazards: The Complexity Perspective / Eds A.S. Sharma et al. Washington, DC: American Geophysical Union, 2012. P. 27–39.
<https://doi.org/10.1029/2011GM001060>
- Rodkin M.V., Mandal P. A possible physical mechanism for the unusually long sequence of seismic activity following the 2001 Bhuj $M_w 7.7$ earthquake, Gujarat, India // Tectonophysics. 2012. V. 536–537. P. 101–109.
- Rodkin M.V., Tikhonov I.N. The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake // Physics and Chemistry of the Earth. 2016. V. 95. P. 73–84.
- Rodkin M.V. The Variability of Earthquake Parameters with the Depth: Evidences of Difference of Mechanisms of Generation of the Shallow, Intermediate-Depth, and the Deep Earthquakes // Pure Appl. Geophys. 2022. V. 179. P. 4197–4206.
<https://doi.org/10.1007/s00024-021-02927-4>
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // BSSA. 1994. V. 84(4). P. 974–1002.

ON THE IDENTIFICATION OF TYPICAL PRECURSOR ANOMALIES IN THE FORESHOCK AREAS OF STRONG EARTHQUAKES, KURIL-KAMCHATKA REGION

M. V. Rodkin^{1, 2, 3, *}, M. Yu. Andreeva²

¹*Institute for Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the RAS,
Profsoyuznaya str., 84/32, Moscow, 117997 Russia*

²*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the RAS,
Nauki str., 1B, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022 Russia*

³*Shmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS,
Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia*

*e-mail: rodkin@mitp.ru

The article discusses the prospects of a new earthquake forecast algorithm based on a set of precursor anomalies previously identified in details as a result of constructing and analyzing a generalized vicinity of a strong earthquake. The difference in physical mechanisms of different depth earthquakes is taken into account. The question is considered, how often typical averaged anomalies can be statistically reliably identified in the foreshock areas of individual strong earthquakes; the regional catalog of Kamchatka and Northern Kuril Islands of the Kamchatka Branch of the Geophysical Surveys of the Russian Academy of Sciences is used. In this catalog, at least one typical anomaly is detected in one third of cases of the target earthquakes with magnitude $M \geq 6.5$. The probability of such successful retrospective forecast depends to a decisive extent on the number of events registered in the foreshock zone of a given strong earthquake. This result is supported by the results of the analysis of the world ISC-GEM and GCMT catalogs and the 2023 Turkish Earthquake Doublet. The possibilities for the development of the used forecast method are discussed; attention is drawn to the problem of false alarms.

Keywords: earthquake forecasting, typical forecast anomalies, physics of seismic destruction, Kuril-Kamchatka