

УДК 550.343.6

ТИПОВАЯ ФОР- И АФТЕРШОКОВАЯ АНОМАЛИЯ – ЭМПИРИКА, ИНТЕРПРЕТАЦИЯ, ПРИМЕНЕНИЕ

© 2020 г. М. В. Родкин^{a, b, *}

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

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

*e-mail: rodkin@mitp.ru

Поступила в редакцию 06.06.2019 г.

После доработки 06.06.2019 г.

Принята к публикации 22.10.2019 г.

Ранее автором [Родкин, 2008а, 2008б; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016; Родкин, Рундквист, 2017] был предложен и реализован метод построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ). Метод ООСЗ обеспечивает радикальный рост объема используемых данных и, соответственно, возможность значительно более детального описания типовых особенностей фор- и афтершокового процесса. В ООСЗ хорошо видна форшоковая степенная активизация и афтершоковый процесс, реализующийся согласно закону Омори-Утсу. Кроме этого, для значительного числа параметров (наклона графика повторяемости и средней глубины землетрясений, величины кажущихся напряжений, продолжительности сейсмического процесса, ряда других характеристик) в ООСЗ наблюдается единообразная по характеру аномалия, увеличивающаяся по амплитуде к моменту обобщенного сильного землетрясения как минус логарифм времени до момента этого события. Подобные аномалии (чаще с разными параметрами) наблюдаются и в форшоковой и в афтершоковой области. Единообразие аномалии дает основание придать ей статус закономерности сейсмического режима. Особый интерес представляют предвестниковые аномалии. Обсуждается, какие из них являются первичными, а какие носят вторичный характер. Дана интерпретация аномалии в терминах модели мультипликативного каскада. Отмечается аналогия характера аномалии с положениями кинетической концепции разрушения Журкова. Обсуждаются подходы к использованию выявленной аномалии в прогнозе землетрясений.

Ключевые слова: предвестниковая аномалия, обобщенная окрестность сильного землетрясения, мультипликативный каскад.

DOI: 10.31857/S020303062001006X

ВВЕДЕНИЕ

Исследование предвестниковых аномалий сильно затруднено сильной “турбулентностью” сейсмического процесса, приводящей к огромному разнообразию режимов развития отдельных фор- и афтершоковых последовательностей. В отдельной такой последовательности, на фоне больших флуктуаций сейсмического режима часто оказывается затруднительно выделить типовые черты фор- и афтершокового процесса. Вариативность разных последовательностей столь велика, что даже возникли предположения об отсутствии таких общих черт фор- и афтершокового процесса как степенная форшоковая активизация и реализация афтершокового процесса по закону Омори [Ромашкова, Кособоков, 2001].

С целью подтверждения существования и уточнения типичных общих черт фор- и афтершокового процесса в работах [Родкин, 2008а,

2008б; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016; Родкин, Рундквист, 2017 и др.] был предложен и реализован метод построения и анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ), когда в результате масштабируемой агрегации в общую фор-афтершоковую последовательность объединяются данные по значительному числу отдельных фор- и афтершоковых последовательностей. Метод объединения данных по значительному числу событий, обычно называемый методом наложения эпох, не новый. Например, этим способом в работе [Molchan et al., 1999] была впервые статистически строго выявлена тенденция существенного уменьшения величин наклона графика повторяемости землетрясений перед сильными событиями. Этим же методом в работе [Narteau et al., 2005] рассматривалась динамика афтершокового процесса и была показана зависимость параметров этого процесса от реализа-

ции сильных землетрясений и (предположительно) от характера напряженного состояния. От работ других авторов используемый нами подход отличается большим (до 1000) числом объединяемых фор- и афтершоковых последовательностей, что обеспечивает резкое увеличение статистики; а также использованием масштабирования при наложении событий по пространству и преимущественным использованием данных о более сильных землетрясениях.

Метод ООСЗ обеспечивает огромный рост статистики; в результате чего становится возможным с большей детальностью выявлять типичные особенности фор- и афтершокового процесса. В ООСЗ с несомненностью наблюдаются форшоковая степенная активизация и афтершоковый процесс, протекающий согласно закону Омори-Утсу [Родкин, 2008а, 2008б; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016]. Кроме того, для значительного числа параметров (величин наклона графика повторяемости, средней глубины землетрясений, величин кажущихся напряжений σ_a , ряда других характеристик) выявляется единообразная по характеру аномалия с амплитудой, увеличивающейся примерно как минус логарифм времени от момента обобщенного сильного события (ОСЗ). Причем такой характер аномалии (чаще с разными значениями параметров и разной длительностью аномалии) наблюдается и в форшоковой, и в афтершоковой области. Такая устойчиво повторяющаяся и характерная по форме аномалия может быть предположительно охарактеризована как некая новая эмпирическая закономерность, возможно сравнимым по статусу с законом Омори. Обсуждению этой закономерности и ее интерпретации и посвящена данная статья.

В начале статьи приводятся данные по анализу в ООСЗ потока фор- и афтершоковых событий. Затем даны примеры аномалий, нарастающих к моменту ОСЗ как минус логарифм времени от момента этого землетрясения. Обсуждается, какие из этих (различных по исследуемым параметрам) аномалий имеют первичный, а какие вторичный характер, т.е., могут порождаться аномальным поведением иных (более фундаментальных) характеристик сейсмического процесса. Дана интерпретация выявленной аномалии в терминах модели описания сейсмического режима как совокупности реализаций метастабильных состояний по модели мультипликативного каскада (ММК). В рамках ММК модели выявленная в ООСЗ типовая аномалия отвечает росту вероятности продолжения (не прекращения) развивающегося процесса сейсмического разрушения, т.е., амплитуда аномалии как бы пропорциональна величине параметра “лавинообразности” сейсмического процесса. Отмечается определенная аналогия характера выявленной аномалии с положениями кинетической концепции разруше-

ния Журкова. Обсуждается возможность интерпретации выявленной аномалии в рамках широко распространенной модели SOC. Особо подчеркивается возможность применения полученных результатов для прогноза сильных землетрясений. В плане иллюстрации полезности метода построения и анализа ООСЗ (обеспечившей выявление обсуждаемой типовой аномалии) обсуждается возможность выявления средствами анализа ООСЗ такой тонкой особенности афтершокового процесса, как недавно выявленная [Shebalin, Narteau, 2017; Смирнов и др., 2019] изменчивость параметра c обобщенного закона Омори-Утсу с глубиной.

ХАРАКТЕР АНОМАЛИИ В ОКРЕСТНОСТИ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Вопросы методики построения ООСЗ подробно обсуждались в работах [Родкин, 2008а, 2008б; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016; Родкин, Рундквист, 2017], поэтому здесь опишем метод построения ООСЗ более сжато. При построении ООСЗ отбираются события, попавшие в окрестность одного из большого числа (несколько сотен, до 1000) сильнейших землетрясений из данного каталога. Опыт показывает, что построение ООСЗ для совокупности 100 и менее сильнейших событий обычно дает еще довольно сильные флуктуации, и тенденции изменения исследуемых параметров оказываются замаскированными. Под окрестностью понимаются события, происшедшие от очага данного главного сильного события на расстоянии не более n размеров очага R главного события. Число размеров n обычно принимается равным 3 или 5 (были опробованы и другие варианты, результаты схожи). Уменьшению n отвечает более резкое проявление аномалии, но меньшая статистика, большим значениям n – большая статистика, но и большая “замусоренность” обобщенной окрестности событиями, не связанными с данным сильным землетрясением. Рассмотрение особенностей режима для разных n позволяет выявить как бы “тень” активизации – когда рост событий для меньших n сопровождается иногда уменьшением активности на больших n [Rodkin, 2012]. Выбор значения n обычно является неким компромиссом. В данной работе использовано значение $n = 5$.

Для расчетов размера очага R (в километрах) в зависимости от магнитуды нами использовалась одна из распространенных формул [Соболев, 1993]:

$$R = 10^{0.5M - 1.9}, \quad (1a)$$

где вид магнитуды и ориентация очага не конкретизированы, или более детализированное соотношение [Wells, Coppersmith, 1994], где даются

формулы для оценки размера очага вдоль его длинной полуоси (1b) и среднего радиуса очага (1c):

$$R = 10^{0.59M_w - 2.44}, \quad (1b)$$

$$R = 10^{0.45M_w - 1.7}. \quad (1в)$$

Исходя из постановки задачи, более оправданным представляется использование соотношений (1a) или (1в), так как данные по ориентировке очага в каталогах землетрясений, как правило, отсутствуют. Приводимые ниже результаты рассчитаны для варианта (1a); отметим, что использование разных формул для расчета R не меняет принципиальным образом на характер выявляемых в ООСЗ закономерностей.

При выборе временной окрестности используется стандартный метод наложения эпох, такой простой подход представляется оправданным, ввиду того, что в работе [Смирнов, Пономарев, 2004] было показано, что длительность подготовки разрушения (сейсмического цикла) слабо зависит от магнитуды события; тем более это должно быть несущественно в нашем случае, когда отбираются события близких (больших) магнитуд.

В данной статье использованы каталоги *GCMТ* и *ISC*. В предыдущих работах использовались также каталоги *USGS/NEIC*, Гарвардский каталог сейсмических моментов (предшественник *GCMТ*) и *JMA*, результаты для всех каталогов аналогичны. Более того, характер нарастания амплитуды аномалий к моменту обобщенного главного события практически не зависит от ограничения на магнитуды используемых при анализе землетрясений. Рассматривались события разных глубинных диапазонов [Родкин, Рундквист, 2017]; закономерности для неглубоких и глубоких землетрясений (с глубиной менее и более 70 км) оказались различны. Более детального разграничения провести не удалось ввиду нехватки фактических данных. В данной работе, как более статистически представительные и практически значимые, рассматриваются события с глубиной $H \leq 70$ км. Каталог *GCMТ* с 1976 г. по январь 2016 г. содержит 44603 события, при использовании ограничения $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$ км остается 15723 таких событий, в рамках этого ограничения каталог может трактоваться как удовлетворительно полный (возможно кроме области развития ранних наиболее многочисленных афтершоков). Для определения глубины, если не сказано иначе, используется среднее значение по данным о гипоцентре и по решению сейсмического момента. В работе рассмотрена окрестность 500 сильнейших событий.

Каталог *ISC* с 1904 по 2017 гг. содержит 470081 землетрясение, он весьма неоднороден по времени, но, исходя из графика повторяемости землетрясений, может полагаться как бы удовлетворительно полным для событий с $M_b \geq 5.0$

(401458 землетрясений). Каталог *ISC* содержит дубли по данным разных агентств, но, по экспертному мнению, А.В. Ландера (ИТПЗ РАН) их число не слишком велико. Получаемые при использовании *ISC* каталога результаты качественно аналогичны результатам, получаемым по другим каталогам; поэтому автор полагает возможным использование *ISC* каталога, число событий в котором максимально, что принципиально важно для метода ООСЗ.

В данной статье основное внимание уделяется аномальному поведению параметров сейсмического режима, а не закономерностям изменения интенсивности потока форшоков и афтершоков. Однако интенсивность потока событий является ключевой характеристикой сейсмичности, поэтому обсуждение возможностей метода построения ООСЗ следует начать с анализа изменения интенсивности фор- и афтершоковой последовательности. На рис. 1, по данным каталога *ISC* ($M_b \geq 5.0$, $H \leq 70$ км), приведены изменения во времени интенсивности потока событий в фор- и афтершоковой области (фактически, рассмотрены существенно более широкие области, захватывая фон). Точки отвечают плотности по времени для групп из 50 последующих событий в ООСЗ с шагом 25 событий. Такой же подход (если не сказано иначе) используется и далее.

На рис. 1а хорошо видна форшоковая степенная активизация, начало которой выявляется в ООСЗ примерно за 100 сут до момента ОСЗ. Всплески на общей закономерности отвечают отдельным сильным афтершоковым последовательностям, случайно попавшим в анализируемую ООСЗ. На рис. 1б представлена типовая афтершоковая последовательность, примерно на порядок более интенсивная, чем форшоковая. Хорошо виден дефицит числа ранних афтершоков, отвечающий ненулевому значению параметра c закона Омори-Утсу.

На рис. 2, для сравнения, приведены аналогичные графики ООСЗ для каталога *GCMТ* ($M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$ км). В *GCMТ* событий намного меньше, но каталог существенно чище каталога *ISC*. Основные черты графиков ожидаемо идентичны, однако в деталях наблюдаются различия. Так максимум интенсивности потока афтершоков по каталогу *ISC* ($M_b \geq 5.0$) достигается в области 0.03 суток после момента ОСЗ, а по каталогу *GCMТ* ($M_w \geq 5.4$) примерно через 0.3–0.5 сут после ОСЗ. Отметим, что в том случае, если бы дефицит ранних афтершоков объяснялся исключительно их неполной регистрацией, следовало бы ожидать противоположную тенденцию. Отметим также, что в работе [Enescu et al., 2009] показана аналогичная тенденция сильного уменьшения значения параметра c при учете событий меньшей магнитуды. Таким образом, анализ ООСЗ дает дополнитель-

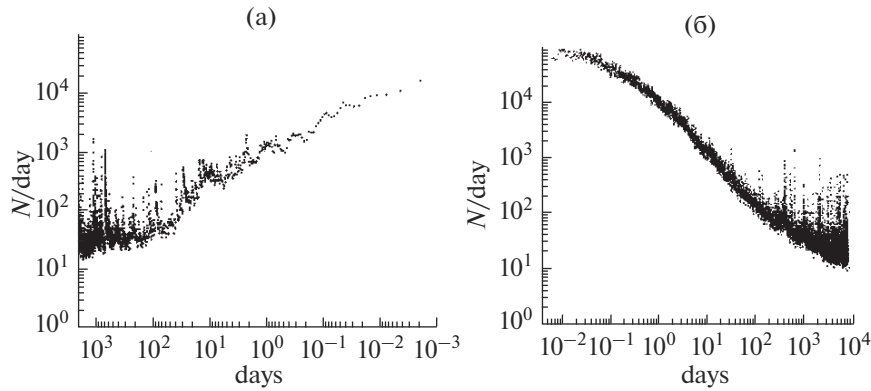


Рис. 1. Динамика форшокового (а) и афтершокового (б) процесса в ООСЗ, ISC каталог.

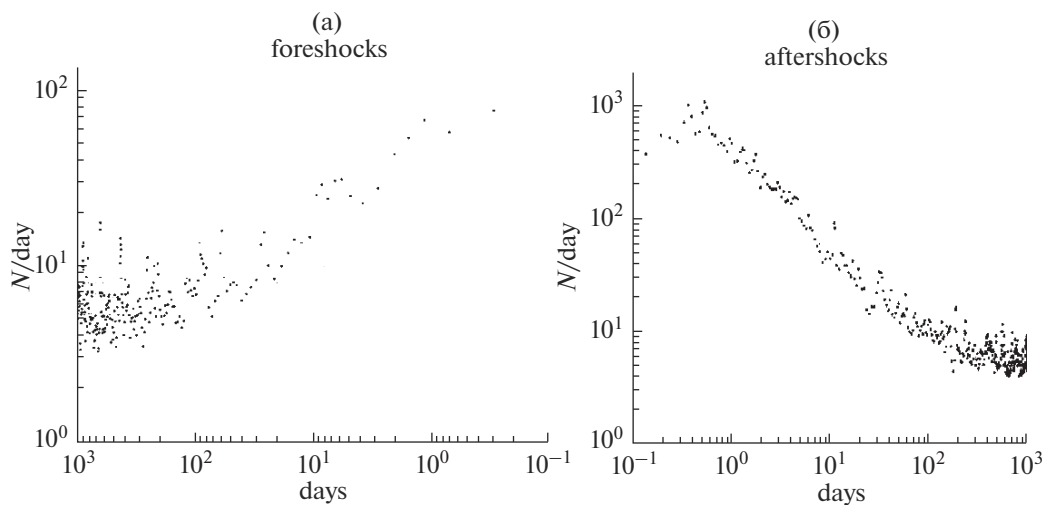


Рис. 2. Динамика форшокового (а) и афтершокового (б) процесса в ООСЗ, GCMT каталог.

ные основания предположить, что дефицит ранних афтершоков связан не только с перегрузкой сети и неполной их регистрацией.

В плане иллюстрации информативности метода построения ООСЗ отметим (следуя данным из работы [Rodkin, 2012]) изменчивость величин параметра p закона Омори-Утсу и аналогичного параметра p' форшоковой последовательности. Как можно видеть на рис. 1 и 2, значение p' в целом меньше, чем p , и значения p и p' уменьшаются для более отдаленных фор- и афтершоков. Эти наблюдения согласуются с результатами [Ogata et al., 1995; Helmstetter et al., 2003; Faenza et al., 2009], где указывается на тенденции уменьшения значений p и p' для отдаленных событий и соотношение $p' < p$. Отметим, что тенденция уменьшения значений параметров p' , p для более отдаленных фор- и афтершоков может являться отражением большей доли фоновых событий.

Заключаем, что характер фор- и афтершоковой последовательности выявляется в ООСЗ до-

статочно определенно, и в полном соответствии с представлениями о форшоковом степенном росте активности и с законом изменения интенсивности числа афтершоков Омори-Утсу. Новым является относительно раннее (примерно за 100 дней до ОСЗ) начало степенного форшокового роста. Такую особенность удалось выявить благодаря осреднению данных по очень большому числу индивидуальных форшоковых последовательностей. Полученные закономерности далее, при анализе иных, менее очевидных аномалий, будут использованы как базовые.

Наиболее часто анализируемой и используемой характеристикой сейсмического режима является значение наклона графика повторяемости b -value. На рис. 3 приведены текущие значения наклона графика повторяемости b -value, полученные методом максимального правдоподобия [Aki, 1965] по каталогу ISC для последовательных по времени групп из 50 землетрясений с шагом 25 событий

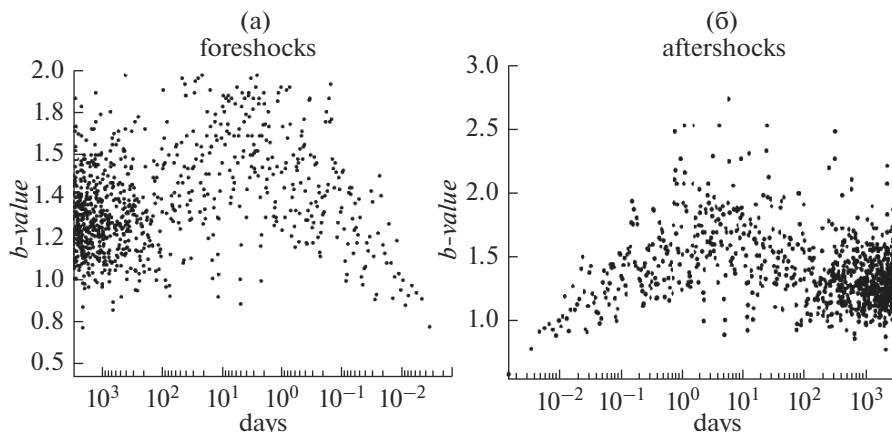


Рис. 3. Изменения текущих значений b -value в ООСЗ, форшоки (а) и афтершоки (б), *ISC* каталог.

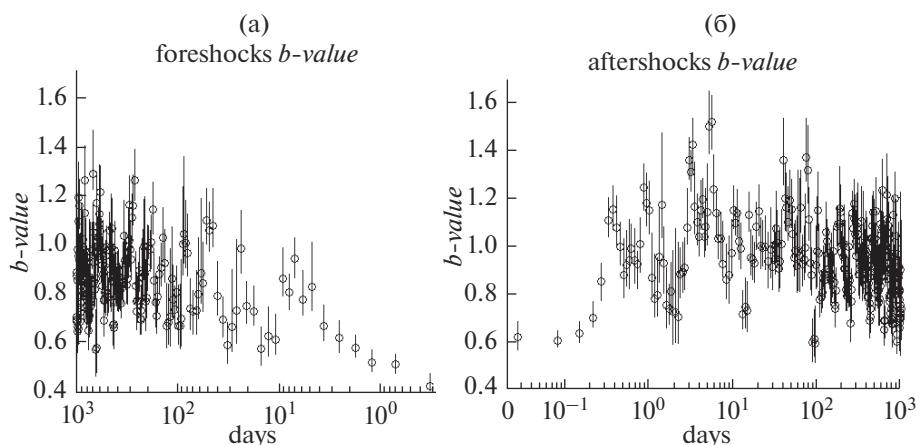


Рис. 4. Изменения текущих значений b -value в ООСЗ, форшоки (а) и афтершоки (б), *GCMT* каталог.

$$b\text{-value} = \lg(e)/(\text{mean}(M) - M_c). \quad (2)$$

В соотношении (2) $\text{mean}(M)$ – среднее значение магнитуды; $M_c = 5.0$ – граничное значение. Соотношение (2) в данном случае неточно, оно справедливо при полной регистрации и для неограниченного и непрерывного распределения (амплитуды M_b даны с точностью 0.1). Указанные условия не выполняются. В нашем случае (2) будет давать систематическое завышение значений b -value. Нам здесь важны, однако, не точные значения b -value, а тенденция их изменения. Поэтому, в нашем случае, неточность искупается простотой соотношения (2), в котором с несомненностью видна связь величин b -value со средним значением магнитуды $\text{mean}(M)$. Это соотношение понадобится нам в дальнейшем.

На рис. 3а, 3б видно, что для близкой к моменту ОСЗ области четко выделяется аномалия уменьшения значений b -value как логарифм времени до момента ОСЗ

$$b\text{-value} = a + b \lg|\Delta t|, \quad (3)$$

где $a, b > 0$ коэффициенты; Δt – интервал времени от текущего момента до момента ОСЗ. Коэффициенты $a, b > 0$ могут быть численно оценены по эмпирическим данным, как это для ряда аномалий этого вида сделано в работе [Rodkin, Tikhonov, 2016]. Здесь мы ограничимся качественным анализом, без конкретизации численных значений параметров a, b , которые зависят от используемых данных.

На рис. 4 для сравнения приведены результаты оценок значений b -value по данным *GCMT* каталога; в данном случае значение b -value оценивалось методом наименьших квадратов. Так как в этом случае точек меньше, то на рисунке приведены также оценки погрешности расчета b -value, полученные численным методом случайного моделирования, бутстреп-методом.

Начало развития предвестниковой аномалии оценить по данным рис. 3а и 4а довольно сложно;

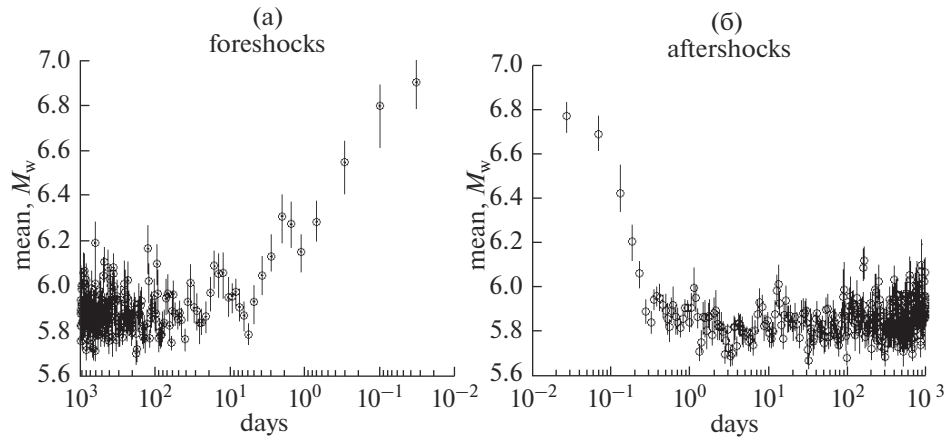


Рис. 5. Средняя магнитуда землетрясений ($M_w \geq 5.4$) в ООСЗ, форшоки (а) и афтершоки (б), *GCMT* каталог.

по разным данным (разные каталоги, разные интервалы времени и магнитуд) такая оценка варьирует от нескольких дней до 100 дней. Возможно, целесообразно начало аномалии положить равным началу форшокового роста числа событий на рис. 1а и 2а, т.е., примерно 100 дням.

Результаты, приведенные на рис. 3 и 4 (качественно аналогичные имеют место для других каталогов и интервалов времени), существенно уточняют многочисленные сейсмологические наблюдения о приуроченности сильных землетрясений к интервалам времени пониженных значений *b-value*. Наблюдаемый в ООСЗ характер зависимости (3) для форшоков весомо подкрепляются хорошо обеспеченными статистическими данными результатами акустических (*AE*) и некоторых натуральных экспериментов [Смирнов и др., 2010; Lei Xinglin, Shengli Ma, 2014]. В этих работах не только вполне надежно подтвержден эффект уменьшения наклона графика повторяемости в окрестности сильного события, но и наблюдается тенденция уменьшения величин наклона графика повторяемости примерно как минус логарифм времени до момента разрушения.

На рис. 3б и 4б видна тенденция увеличения значений *b-value* в афтершоковой области в интервале 1–100 сут после ОСЗ. Такое изменение естественно объяснить уменьшением уровня напряжений после сильного события (см., например, [Смирнов и др., 2019]). Заметим, однако, что по данным каталога *ISC* (см. рис. 3а) аналогичный рост наблюдается и в форшоковой области, автор затрудняется интерпретировать это наблюдение; для данных каталога *GCMT* (см. рис. 4а) аналогичного роста не наблюдается.

Как видно из формулы (2), изменению величины *b-value* отвечает изменение среднего значения магнитуды в интервале надежно регистрируемых событий $M > M_c$. Среднее значение магнитуды более простая характеристика, чем наклон

графика повторяемости. На рис. 5 приведены графики для текущих средних значений магнитуд M_w в ООСЗ. Вполне ожидаемо закономерности рис. 5 повторяют таковые по данным рис. 3 и 4. Примеры рис. 3 и 4 и рис. 5 пригодятся нам в дальнейшем при интерпретации наблюдаемой аномалии.

В качестве другого примера развития аналогичной по характеру аномалии на рис. 6 и 7 приведены изменения в ООСЗ средних глубин землетрясений. На рис. 6 видно, что средняя глубина землетрясений в близкой окрестности ОСЗ аномально мала (каталог *ISC*). Характер нарастания аномалии в фор- и в афтершоковой области лучше виден в логарифмической шкале по оси времени Δt на рис. 7а, 7б для фор- и афтершоковой области соответственно (каталог *GCMT*). Значения средней глубины землетрясений и в форшоковой, и в афтершоковой последовательности изменяются к моменту ОСЗ как $|\lg|\Delta t|$. При этом длительность аномалии (выход на фоновый режим) отстоит от момента ОСЗ примерно на 100 дней и в форшоковой, и в афтершоковой области. Отметим что приведенные результаты могут рассматриваться как уточнением и детализация известной тенденции меньшей, в среднем, глубины очагов для афтершоков.

Представленные выше примеры не исчерпывают списка выявленных в ООСЗ аномалий сейсмического режима вида $-\lg|\Delta t|$. Кроме приведенных выше аномалий (уменьшения наклона графика повторяемости землетрясений *b-value* и средней глубины землетрясений и увеличения средней магнитуды землетрясений) наблюдается ряд других аномалий. Аналогично изменяются величины отношения M_b/M_w (или разницы $M_b - M_w$), величин кажущихся напряжений σ_a . Растет величина средней полу-продолжительности сейсмического процесса (характеризуемая разницей момента землетрясения по данным первых вступлений и по решению сейсмического момента).

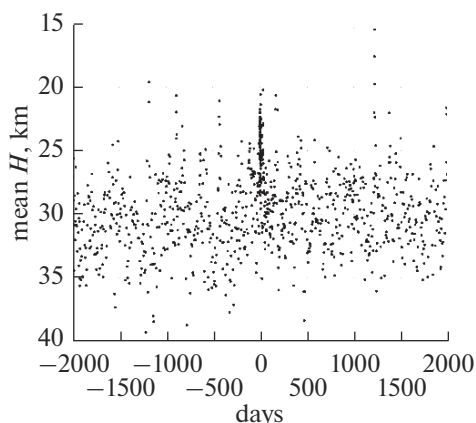


Рис. 6. Изменения средней глубины событий в ООСЗ, каталог *ISC*.

Также наблюдается рост однородности поля сейсмогенных деформаций, характеризуемая средним нормированным скалярным произведением сейсмических моментов соответствующего главного события и текущего события параметр K . К моменту ОСЗ величина K приближается к единице. Список МЛТ аномалий представлен в табл. 1, куда вошли материалы по опубликованным аномалиям. Отметим, что для выявления тенденции в разных случаях требуется использовать различное осреднение. Минимальный размер выборок (50 событий с шагом 25 событий) применим для оценки более простых характеристик (средней магнитуды, глубины). При анализе более сложных характеристик требуются большие по размеру выборки.

Во всех приведенных в таблице случаях амплитуда аномалии растет к моменту ОСЗ примерно как минус логарифм времени от момента обобщенного главного события. Далее, для краткости,

будем называть такую аномалию МЛТ аномалией. Начало форшоковой и конец афтершоковой МЛТ аномалии обычно определяются довольно плохо. Начало форшоковой аномалии можно предположительно соотнести с достаточно четко выделяемым началом степенного роста числа форшоков (см. рис. 1а); отсюда предположительно получаем начало развития форшоковой аномалии примерно за 100 дней до момента ОСЗ.

Поведение МЛТ аномалии в области афтершокового процесса более изменчиво. Во многих случаях характер постшоковой аномалии оказывается различным для временной области развития ранних и более поздних (убывающих по степенному закону) афтершоков. Для нашего рассмотрения (случай больших магнитуд) границей этих двух режимов (с большой долей условности) можно положить 1 сут; на рис. 3б, 4б, 5б изменение характера постшоковой аномалии в районе ~ 1 сут для средних значений магнитуды и наклона графика повторяемости видны вполне определенно. Отсюда предварительно получаем, что интервал времени развития ранних афтершоков характеризуется не только дефицитом числом событий, но и особенностью режима ряда других характеристик сейсмического процесса. Отметим также, что в поведении ранних афтершоков может заметно сказываться эффект их неполной регистрации.

С той или иной степенью определенности аномалия типа МЛТ выявляется практически для всех рассмотренных характеристик сейсмического процесса (естественно, кроме интенсивности потока событий). Очевидно, не все эти аномалии являются независимыми. Так весьма ожидаемо, что аномалия уменьшения величин наклона графика повторяемости вторична по отношению к аномалии роста средней магнитуды землетрясений. Естественно предположить также, что рост

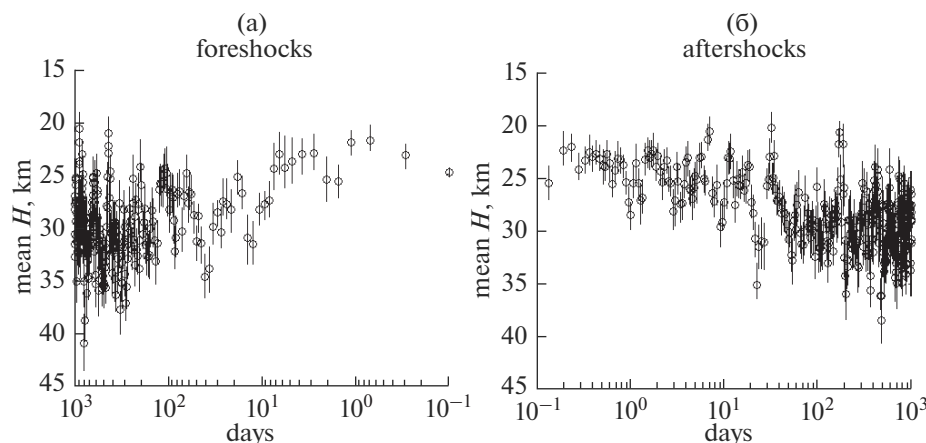


Рис. 7. Изменения средней глубины событий в ООСЗ в логарифмической шкале по оси времени для форшоков (а) и афтершоков (б), каталог *GCMT*.

Таблица 1. Список наблюдаемых МЛТ аномалий

Параметр	Каталоги, параметры отбора	Знак аномалии	Пояснение	Ссылка
M_w	<i>GCMT</i> , 1976–2005, $H \leq 70$ <i>GCMT</i> , 1977–2012, $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$ <i>GCMT</i> , 1977–2016, $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$	Возрастает	Первичная	[Rodkin, 2012] [Rodkin, Tikhonov, 2016] [Родкин, Рундквист, 2017]
M_b/M_w	<i>GCMT</i> , 1976–2005, $H \leq 70$ <i>GCMT</i> , 1977–2016, $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$	Убывает	Вторичная к росту M_w ?	[Родкин, 20086] [Родкин, Рундквист, 2017]
$M_b - M_w$	<i>GCMT</i> , 1976–2005, $H \leq 70$	Убывает	Вторичная к росту M_w ?	[Rodkin, 2012]
<i>b-value</i>	<i>USGS/NEIC</i> , 1968–2007, $M \geq 4.8$, $H \leq 70$	Убывает	Вторичная к росту M_w ?	[Родкин, 20086] [Rodkin, 2012]
Δt , полупродолжительность сейсмического излучения	<i>GCMT</i> , 1976–2005, $H \leq 70$ <i>GCMT</i> , 1977–2012, $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$	Возрастает	Вторичная к росту M_w ?	[Rodkin, 2012] [Rodkin, Tikhonov, 2016]
σ_a , кажущееся напряжение	<i>GCMT</i> , 1976–2005, $H \leq 70$ <i>GCMT</i> , 1977–2016, $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$	Убывает	Вторичная к росту M_w ?	[Родкин, 2008а, 20086; Rodkin, 2012] [Родкин, Рундквист, 2017]
K	<i>GCMT</i> , 1976–2005, $H \leq 70$ <i>GCMT</i> , 1977–2016, $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$	Возрастает, приближаясь к единице	Первичная	[Родкин, 20086; Rodkin, 2012] [Родкин, Рундквист, 2017]
H , км	<i>GCMT</i> , 1977–2012, $M_w \geq 5.4$, $H \leq 70$	Убывает	Первичная	[Rodkin, Tikhonov, 2016]

средней магнитуды событий может объяснять такие аномалии как рост средней полу-продолжительности очагового процесса и рост величин отношения M_b/M_w и разницы $M_w - M_b$ (вследствие насыщения значений M_b для сильных событий). Предварительная попытка учета вклада изменений средних значений магнитуды приводит к уменьшению амплитуды и достоверности предположительно вторичных аномалий (вопрос требует более детальных исследований).

Можно предположить также общность механизма развития таких аномалий как уменьшение средней глубины землетрясений, величин корреляционной фрактальной размерности (результаты не опубликованы), увеличения степени однородности ориентации сейсмогенных деформаций. Эти эффекты могут порождаться ростом трещиноватости, связности и проницаемости системы нарушений. Возникновение при этом более протяженных механически ослабленных структур может способствовать также и росту средних значений магнитуд землетрясений. Отметим, что изменение средней глубины землетрясений косвенно указывает на возможный сильный рост проницаемости и наличие в очаговой зоне флюида низкой плотности (не расплава). Прорывы такого флюида в верхние горизонты земной коры будут порождать наблюдаемое уменьшение средней глубины землетрясений.

Подчеркнем, как основной результат – характер форшоковой МЛТ аномалии – выявляется в ООСЗ по данным разных каталогов, для разных интервалов времени и для разных характеристик сейсмического режима. Далее будет сделана попытка обсудить возможные интерпретации этой аномалии. Характер афтершоковой МЛТ аномалии более разнообразен; как уже отмечалось, ранние афтершоки регистрируются наименее полно, что может порождать соответствующие изменения их средних характеристик.

К ПРОБЛЕМЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МЛТ АНОМАЛИИ

В общем виде соотношение для величин МЛТ аномалий имеет вид

$$\Psi = a + b \lg|\Delta t|, \tag{4}$$

где Ψ – амплитуда аномалии, Δt – время до/от момента макрособытия, a и b – коэффициенты.

Наиболее ожидаема была бы интерпретация аномалии (4) в рамках широко применяемой модели самоорганизующейся критичности (SOC). Однако для модели SOC и, более широко, для критических процессов характерны степенные соотношения. Связь между величиной аномалии и расстоянием от критической точки (например, от величины $\Delta T = (T - T_c)/T_c$, где T – текущая

температура, а T_c – критическая температура) имеет вид

$$\Psi = \alpha(\Delta T)^{\gamma}. \quad (5)$$

Степенной характер соотношения (5) согласуется со степенным режимом фор- и афтершокового каскадов числа землетрясений, но радикально отличается от соотношения (4). Учитывая, что магнитуда является линейной функцией от логарифма энергии, некоторые из перечисленных выше МЛТ аномалий предположительно могут быть проинтерпретированы в рамках модели SOC. Это, однако, заведомо затруднительно для аномалий уменьшения средней глубины землетрясений и роста однородности поля сейсмогенных деформаций. Отсюда получаем, что в рамках концепции критических процессов возможность интерпретации МЛТ аномалии достаточна гипотетична.

Рассогласование соотношений (4) и (5) можно трактовать как дополнительное свидетельство ограниченной возможности интерпретации сейсмических процессов в рамках теории критических явлений. Этот вывод не нов. Как известно, механизмов реализации SOC применительно к сейсмическому процессу предложено не было. При этом обращалось внимание на принципиальное различие критических явлений и процесса сейсмичности. Если в критических процессах потенциалы старой и новой фазы полагаются равными, и превращение не предполагает выделение или поглощение энергии, то землетрясения сопровождаются огромным выделением энергии, что собственно и обуславливает их опасность.

В работах [Родкин, 2001; Rodkin et al., 2008; Родкин, 2011; Родкин и др., 2015] в качестве возможной альтернативы модели SOC была предложена модель сейсмического режима как последовательности большого числа эпизодов лавинообразной релаксации, случайным образом реализующихся на множестве метастабильных подсистем. Процесс развития отдельного землетрясения моделировался при этом мультипликативным каскадом, описывающим лавинообразный процесс релаксации метастабильного состояния. Модель мультипликативного каскада (ММК) в линейном приближении описывает закон Гутенберга–Рихтера и тенденцию уменьшения величин наклона графика повторяемости в связи с возникновением сильных землетрясений [Rodkin et al., 2008; Родкин, 2011]. При усложнении модели добавлением памяти системы модель имитирует также закон Омори, эффект роевой сейсмичности, предвестниковую активизацию и режим сейсмического цикла [Родкин, 2011]. В логически необходимой (обеспечивающей финитность описываемого процесса) нелинейной модификации модель позволяет описать возникновение характеристических землетрясений и

“загиб вниз” графика повторяемости землетрясений в области сильных событий [Шерман и др., 2017]. Таким образом, в рамках ММК модели можно воспроизвести все надежно установленные закономерности сейсмического процесса. При этом, в отличие от чисто статистической модели ETAS, модель ММК описывает сейсмический режим в физических терминах. Для удобства читателя ниже кратко описаны основные моменты ММК модели в простейшем линейном варианте модели без памяти, достаточном, однако, для интерпретации МЛТ аномалии.

Пусть начавшееся произвольное событие (землетрясение) величиной (энергией) X_i в некоторый момент времени t_i с вероятностью p может продолжить свое развитие или завершиться с вероятностью $(1 - p)$. В случае прекращения процесса на i -ом шаге величина события полагается равной достигнутому на этом шаге значению X_i . В случае продолжения процесса релаксации метастабильной подсистемы положим, что величина события X_{i+1} в $(i + 1)$ момент времени возрастет до значения

$$X_{i+1} = rX_i, \quad (6)$$

где $r > 1$ – коэффициент иерархичности (в общем случае случайный), со средним значением $r > 1$; учитывая положения блоково-иерархической концепции М.А. Садовского, естественно положить значения $r \approx 3$ [Садовский и др., 1982]). Такая схема отвечает модели развития землетрясения, с переходом на все более высокие масштабные (иерархические) уровни. Начальное (на первом шаге) значение величины землетрясения, без ограничения общности, положим равным X_0 .

В схеме (6) вероятность прерывания процесса на n -й стадии и получения значения $X = X_0 r^n$ равна $(1 - p)p^n$. Отсюда получаем, что хвост функции распределения $F(X_n > X)$ описывается соотношением: $(1 - F(X)) = p^{\lg(X)/\lg(r)}$. Отсюда имеем

$$\lg(1 - F(X)) = \lg(p)/\lg(r) \lg(X) \quad (7)$$

степенную зависимость для хвоста функции распределения $(1 - F(X))$. При постоянной величине r модель дает дискретно-иерархическое распределение величин событий. С увеличением случайного разброса r ступенчатый характер модельного распределения сглаживается, и при большом разбросе получаем распределение с прямолинейным графиком повторяемости величин событий (землетрясений) в координатах $\{\lg(X), \lg(N)\}$. Наклон графика повторяемости в двойных лог-координатах $\{\lg(X), \lg(N)\}$ при этом равен

$$\beta = \lg(1/p)/\lg(r), \quad (8)$$

где параметр β имеет смысл, аналогичный наклону графика повторяемости землетрясений в законе Гутенберга–Рихтера (для величин X энергии

или сейсмического момента землетрясений). В рамках дальнейшего использования ММК модели резонно положить, что коэффициент иерархичности r характеризует строение геофизической среды, а вероятность продолжения развития очага p характеризует степень неравновесности протекающего в среде процесса (величину напряженного состояния, активность флюидного режима). Учитывая это, будем далее называть r параметром иерархичности, а параметр p параметром неустойчивости. Сравнивая теперь выражения (3) и (8) видим, что характер аномалии у них аналогичный – логарифмический. Росту вероятности p продолжения процесса сейсмического вспарывания ($p \rightarrow 1$) отвечает уменьшение времени до главного события $\Delta t \rightarrow 0$; происходит рост амплитуды аномалии и резкое уменьшение величин наклона графика повторяемости β .

Обратимся теперь к сопоставлению типовой МЛТ аномалии соотношения (4) с соотношениями кинетической концепции разрушения Журкова [Zhurkov, 1965; Журков, 1968]. Согласно этим работам, вероятность макроразрушения образца твердого тела оценивается как:

$$P = P_0 \exp(\gamma\sigma/RT), \quad (9)$$

где P – вероятность разрушения при данном уровне напряжений σ и температуре T ; P_0, γ – коэффициенты. Логарифмируя соотношение (9) и вводя коэффициенты s и d , получаем

$$\lg(P) = s + d\sigma. \quad (10)$$

Соотношение (10) задает логарифм вероятности разрушения как линейную зависимость от величин напряжений. Но одна из форм реализации МЛТ аномалии, применительно к величинам кажущихся напряжений σ_a , имеет вид [Родкин, 2008а]

$$\sigma_a = a + b \lg|\Delta t|, \quad (11)$$

где $a, b > 0$ – некие коэффициенты; Δt – интервал времени от текущего момента до момента макроразрушения, ОСЗ. Выражение (11) дает возможность представления вероятности p продолжения начавшегося сейсмического процесса от величины кажущихся напряжений в виде аналогичном (10)

$$\lg(p) = s' + d'\sigma_a, \quad (12)$$

где s', d' – некие коэффициенты. Из единообразия соотношений (10) и (12) можно предположить, что модель мультипликационного каскада в определенном смысле близка к кинетической концепции разрушения Журкова.

ОБСУЖДЕНИЕ

Достоверность представленных выше результатов, в первую очередь результат выделения МЛТ аномалии, в решающей степени связана с

надежностью метода анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения, ООСЗ. А для метода ООСЗ критически важна возможность использования очень большого числа событий. В связи с этим, в первых публикациях автора по этому методу принимались заведомо заниженные требования на полноту регистрации землетрясений (или вообще использовался весь каталог). Пополнение данных со временем позволило приблизиться к обычным требованиям на полноту используемых данных. Важно, что при этом характер получаемой МЛТ аномалии не изменился. Можно предположить, что стандартное требование использования только представительных данных может иногда быть неоправданно категоричным. Оно оправдано только если имеется существенная статистическая связь между исследуемым параметром и уровнем регистрации. Надежное выявление МЛТ аномалии стало возможным благодаря использованию огромного осреднения. Заметим, что существование МЛТ аномалии в виде тенденции можно усмотреть и по данным других авторов (например, [Shebalin, Baranov, 2017]); где по меньшей статистике, на фоне больших флуктуаций, выявляется эта же тенденция, но она выглядит не вполне убедительно (а для случая ранних афтершоков может быть и артефактом, порожаемым неполной их регистрацией)

Несомненно, однако, что представляет интерес проверка адекватности метода ООСЗ на независимых примерах. Получив такое дополнительное подкрепление, мы затем обсудим перспективы использования МЛТ аномалии в прогнозе землетрясений.

В недавно опубликованной работе [Shebalin, Narteau, 2017] приводятся данные по сильно различающимся значениям параметра c закона Омори-Утсу для различных подборок детальных сейсмологических данных и для разных глубин. Согласно этим данным, значения параметра c существенно меньше для глубоких землетрясений, чем для мелких. В работе [Смирнов и др., 2019], по экспериментальным данным, предполагается немонотонность изменения значений параметра c , сначала параметр c с глубиной будет расти, а потом уменьшаться (в соответствии с результатами [Shebalin, Narteau, 2017]). Представляется возможным попробовать получить этот результат с использованием метода ООСЗ. Для этой цели землетрясения, попавшие в ООСЗ ($H \leq 70$ км) были рассортированы на группы, отвечающие интервалам глубины 0–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–50, 50–60 и 60–70 км. Для каждого из этих интервалов были построены рисунки типа рис. 1б. Графики были нормированы по максимальному значению числа событий и ограничены интервалом по времени 0.01–100 сут, на котором изменение числа афтершоков, обусловленное вариациями значения параметра c наиболее заметно.

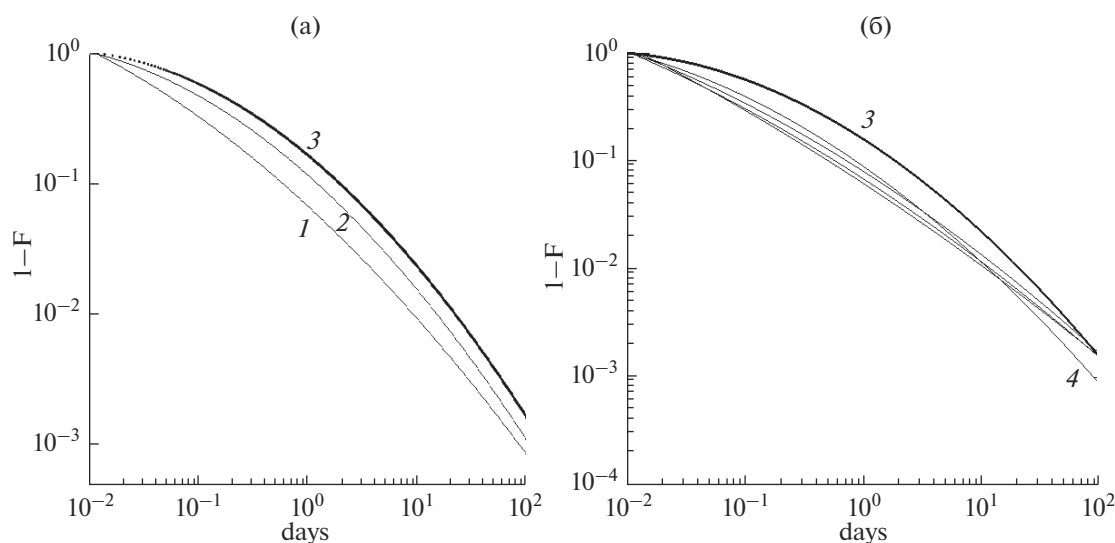


Рис. 8. Кривые аппроксимирующие афтершоковые зависимости (хвост функции распределения) для интервалов глубины 0–10, 10–20 и 20–30 км (а); 20–30, 30–40, 40–50, 50–60 и 60–70 км (б). Цифрами 1–4 отмечены графики для интервалов 0–10, 10–20 и 20–30 и 30–40 км соответственно. Жирной линией выделен график для интервала 20–30 км.

На рис. 8а, 8б по данным каталога *ISC* даны кривые, отвечающие полиномиальной аппроксимации наборов точек типа рис. 1б для перечисленных интервалов глубины. На рис. 8а представлены графики для интервалов глубин 0–10, 10–20 и 20–30 км. Видно, что наиболее прямолинейен график для диапазона 0–10 км (соответственно, имеем минимальное значение параметра c), а наиболее изогнут (максимальное c) – для интервала 20–30 км. Для более глубоких диапазонов (см. рис. 8б) максимальная кривизна наблюдается для интервала 2–30 км, меньшая – для интервала глубин 30–40 км. Все остальные графики имеют малую кривизну и статистически неразличимы.

Известен эффект концентрации сильных землетрясений ($M_w \geq 8.0$) в среднем диапазоне глубин 20–30 км. При сильнейших землетрясениях будет наиболее сильно проявляться недорегистрация слабых землетрясений, чем и может вызываться более сильный изгиб графиков на рис. 8 в диапазоне средних глубин 20–30 км. С целью исключения этого эффекта были независимо рассмотрены окрестности только более слабых главных событий, $M_w < 8.0$. Статистика в этом случае оказалась намного хуже, однако увеличение параметра c закона Омори-Утсу в диапазоне глубин 0–20 и 20–30 км от значений, примерно, 0.1–0.2 до 0.4–0.5 сут наблюдается достаточно определенно, проверка была проведена по данным более выверенного *GCMT* каталога.

Более детальное рассмотрение этого (самого по себе важного) вопроса не входит в задачи данной статьи. Здесь существенно, только то, что метод ООСЗ позволил получить результат, согласующийся с новыми независимыми данными. Это

является дополнительным подкреплением адекватности этого метода и косвенным образом свидетельствует в пользу реальности полученной этим методом типовой МЛТ аномалии.

Возможность интерпретации эмпирической МЛТ аномалии в рамках модели мультипликационного каскада (ММК) дает дополнительные возможности использования совокупности МЛТ аномалии и ММК модели при прогнозе землетрясений. Следуя ММК модели, представляется возможным разделить сейсмический режим на стационарную пространственно-зависимую компоненту, описываемую вариациями коэффициента иерархичности r , и на переменную компоненту, характеризующую изменениями параметра неравновесности p . Этот вариант описания сейсмического режим уже был ранее реализован в работе [Rodkin, Tikhonov, 2012] при анализе данных по сейсмичности Сахалина. Было показано, что периодам возникновения сильных землетрясений отмечают всплески значений параметра неравновесности p . При этом, однако, осталась не ясной эффективность такого способа описания. Использованная выборка не позволила с приемлемой надежностью оценить число ложных тревог и пропусков цели.

В свете выявления описанной выше эмпирической МЛТ зависимости представляется возможным существенно развить основанный на ММК модели подход, дополнив его проверкой развития комплекса МЛТ аномалий. При этом представляется возможным дополнительно учитывать различие независимых и вторичных МЛТ аномалий.

Можно надеяться, что алгоритм прогноза, основанный на совместном использовании перечис-

ленных выше эмпирических предвестниковых закономерностей, имеет шансы оказаться достаточно удачным. Действительно, используемые в настоящее время варианты прогноза землетрясений, как правило, базируются на использовании какого-то одного, реже двух–трех прогнозных признаков. Использование результатов анализа ООСЗ позволяет сформулировать достаточно полный комплекс таких признаков, для каждого из которых может быть оценена степень близости текущего режима к типичному предвестниковому поведению, как он определяется по результатам анализа ООСЗ. При этом представляется возможным разделять предвестниковые аномалии на зависимые и независимые.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения для большого числа характеристик сейсмического процесса показано существование типовой фор- и афтершоковой аномалии вида $a + b \lg|\Delta t|$, где Δt – интервал времени до момента обобщенного главного события. Продолжительности фор- и афтершоковой аномалии и, естественно, параметры a и b могут различаться. Аномалия указанного типа выделяется для таких характеристик сейсмического режима как величина наклона графика повторяемости, средняя магнитуда землетрясений, средняя глубина землетрясений, отношение значений магнитуд M_b/M_w и ряда иных характеристик (список приведен в таблице). Естественно предположить, что лишь часть из этих аномалий являются независимыми. Статус этой новой эмпирической закономерности можно предполагать аналогичным закону Омори.

Одна из перечисленных выше аномалий – уменьшение средней глубины землетрясений в близкой окрестности обобщенного главного события представляется связанной с наличием в очаговой зоне флюида малой плотности (не расплава), развитием трещиноватости, и прорывом флюида в область меньших давлений.

Обсуждается интерпретация выявленной аномалии, которая дается в терминах модели мультипликативного каскада и отвечает параллельному с уменьшением времени до главного события росту вероятности продолжения развития (переходу на более высокие иерархические уровни) ранее начавшегося сейсмического процесса. Обсуждаются трудности интерпретации выявленной типовой аномалии в рамках теории критических процессов и определенное сходство с положениями кинетической концепции прочности Журкова.

В целях иллюстрации информативности метода анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения рассмотрена изменчивость в этой окрестности значений параметра c закона Омори-

Утсу с глубиной и показано согласие характера этой изменчивости с результатами других авторов.

Обсуждаются возможности и перспективы применения полученных результатов для прогноза землетрясений.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 19-05-00466.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Журков С.Н.* Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестник АН СССР. 1968. № 3. С. 46–52.
- Родкин М.В.* Кумулятивный и мультипликативный каскады как модели типизации и механизмов развития катастроф // Геоэкология. 2001. № 4. С. 320–328.
- Родкин М.В.* О режиме сейсмической активизации в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Физическая мезомеханика. 2008а. Т. 11. № 1. С. 74–79.
- Родкин М.В.* Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2008б. № 6. С. 66–77.
- Родкин М.В.* Модель сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, возникающих на множестве метастабильных состояний // Физика Земли. 2011. № 10. С. 18–26.
- Родкин М.В., Нго Тхи Лы, Лабунцова Л.М.* Расширение модели мультипликативного каскада для описания режима повторяемости сильнейших землетрясений применительно к региональной сейсмичности Юго-Восточной Азии // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 2. С. 59–69.
- Родкин М.В., Рундквист Д.В.* Геофлюидодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. Долгопрудный: Изд-во “Интеллект”, 2017. 288 с.
- Ромашкова Л.Л., Косообоков В.Г.* Динамика сейсмической активности до и после сильнейших землетрясений мира, 1985–2000 // Вычислительная сейсмология. 2001. Вып. 32. С. 162–189.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* О свойстве дискретности горных пород // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1982. № 12. С. 3–19.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В.* Закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным // Физика Земли. 2004. № 10. С. 26–36.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Бернар П., Патонин А.В.* Закономерности переходных режимов сейсмического процесса по данным лабораторного и натурального моделирования // Физика Земли. 2010. № 2. С. 17–49.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Станциц С.А. и др.* Лабораторное моделирование афтершоковых последовательностей: зависимость параметров Омори и Гутенберга–Рихтера от напряжений // Физика Земли. 2019. № 1. С. 149–165.
- Шерман С.И., Родкин М.В., Горбунова Е.А.* Тектонофизический анализ типов графиков повторяемости катастрофических землетрясений Центральной Азии // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 47–60.

- Aki K.* Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits // *Bulletin Earthquake Research Institute University, Tokyo*. 1965. № 43. P. 237–239.
- Enescu B., Mori J., Miyazawa M., Kano Omori-Utsu Y.* Law c -Values Associated with Recent Moderate Earthquakes in Japan // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009. V. 99. № 2A. P. 884–891.
- Faenza L., Hainzl S., Scherbaum F.* Statistical analysis of the central-Europe seismicity // *Tectonophysics*. 2009. V. 470. P. 195–204.
- Helmstetter A., Sornette D., Grasso J.-R.* Mainshocks are aftershocks of conditional foreshocks: how do foreshock statistical properties emerge from aftershock laws // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108(B1). P. 2046. <https://doi.org/10.1029/2002JB001991>
- Lei Xinglin, Shegli Ma.* Laboratory acoustic emission study for earthquake generation process // *Earth Sci.* 2014. V. 27(6). P. 627–646.
- Molchan G.M., Kronrod T.L., Nekrasova A.K.* Immediate foreshocks: time variation of the b -value // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1999. V. 111. № 3–4. P. 229–240.
- Narteau C., Shebalin P., Holschneider M.* Onset of the power law aftershock decay rate in Southern California // *Geophysical Research Letters*. 2005. V. 32. L22312. <https://doi.org/10.1029/2005GL023951>
- Ogata Y., Utsu T., Katsura K.* Statistical features of foreshocks in comparison with other earthquake clusters // *Geophys. J. Int.* 1995. V. 121. P. 233–254.
- Rodkin M.V., Gvishiani A.D., Labuntsova L.M.* Models of generation of power laws of distribution in the processes of seismicity and in formation of oil fields and ore deposits // *Russian J. Earth Sciences*. 2008. V. 10. № 5. P. 47–54.
- Rodkin M.V.* Patterns of seismicity found in the generalized vicinity of a strong earthquake: Agreement with common scenarios of instability development, in Extreme Events and Natural Hazards // *The Complexity Perspective*. *Geophys. Monogr. Ser.* / Eds A. S. Sharma et al. AGU, Washington, D.C. 2012. V. 196. P. 27–39. <https://doi.org/10.1029/2011GM001060>
- Rodkin M.V., Tikhonov I.N.* The New Avalanche-Like Stochastic Model for Parameterization of Seismicity and Its Application to the South Sakhalin Island Seismicity // *International Journal of Geophysics*. 2012. V. 2012. Article ID 364318. 12 p. <https://doi.org/10.1155/2012/364318>
- 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.
- Shebalin P., Narteau C.* Depth dependent stress revealed by aftershocks // *Nature Communications*, 2017. V. 8. P. 1317. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01446-y>
- Shebalin P., Baranov S.* Long-Delayed Aftershocks in New Zealand and the 2016 M 7.8 Kaikoura Earthquake // *Pure Appl. Geophys.* 2017. V. 174. № 7. P. 2645–2659. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1608-9>
- 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.
- Zhurkov S.N.* Kinetic concept of the strength of solids // *Int. J. Fract. Mech.* 1965. V. 1. P. 311–323.

Typical For- and Aftershock Anomaly – Data, Interpretation, Application

M. V. Rodkin^{1, 2, *}

¹*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya str., 84/32, Moscow, 117997 Russia*

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

*e-mail: rodkin@mitp.ru

Previously, the author (2008, 2008a, 2012, 2016, 2017) had proposed and implemented a method of constructing and analyzing of a generalized vicinity of a strong earthquake. This method provides a radical increase in the used statistics and, accordingly, the possibility of a much more detailed description of typical features of the for- and aftershock processes. As a result, the foreshock and the aftershock power cascades implemented in accordance with the Omori-Utsu law are visible in details. In addition, for a number of parameters (b -value, average earthquake depth, magnitude of apparent stresses, duration of the seismic process, a number of other characteristics) a uniform anomaly is observed. The amplitude of the anomaly increases with approaching the moment of a generalized main event as minus logarithm of the time to this event. Similar anomalies (often with different parameters) are observed for foreshock and aftershock sequences. The uniformity of the anomaly gives reason to treat it as a new regularity of the seismic regime. Of particular interest are precursor anomalies. It is discussed which of them are primary and which are secondary. An anomaly is interpreted in terms of the multiplicative cascade model. Some analogy of the anomaly with the kinetic concept of the destruction of Zhurkov is noted. The approaches to the use of the revealed set of anomalies for earthquake prediction are discussed.

Keywords: precursor anomaly, generalized vicinity of a strong earthquake, multiplicative cascade.