

УДК 550.343.6

АНАЛИЗ ОБОБЩЕННОЙ ОКРЕСТНОСТИ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО РЕГИОНАЛЬНЫМ ДАННЫМ, КУРИЛО-КАМЧАТСКИЙ РЕГИОН

© 2020 г. М. В. Родкин^{a, b, *}, М. Ю. Андреева^b, О. О. Григорьева^c

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

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

^cСахалинский филиал Единой геофизической службы РАН, ул. Тихоокеанская, 2-а, Южно-Сахалинск, 693010 Россия

*e-mail: rodkin@mitp.ru

Поступила в редакцию 25.06.2020 г.

После доработки 22.07.2020 г.

Принята к публикации 20.08.2020 г.

Предложенный и реализованный в серии работ [Родкин, 2008, 2020; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016] метод построения обобщенной окрестности сильного землетрясения ранее применялся только для анализа мировых каталогов землетрясений. Использование этого метода при анализе региональных каталогов предполагает снижение порога магнитуд сильного события и возможность учета региональных особенностей сейсмического режима. Проведено построение обобщенной окрестности по региональным данным для Курильских островов и Камчатки. Выявлены те же особенности режима сейсмичности, что и в обобщенной окрестности, построенной по мировым данным, в частности, эффект всплывания очагов в близкой окрестности сильного землетрясения. Однако по региональным данным неожиданно сильно выявился эффект временного группирования сильных землетрясений, в том числе и значительно удаленных друг от друга. Районы активизации охватывают значительные участки зоны субдукции, сильно разнесенные вдоль желоба и по глубине. Оценены характерные параметры кластеров активизации и доля статистически зависимых и независимых сильных событий. Рассмотрено взаимное влияние разноглубинной сейсмичности.

Ключевые слова: обобщенная окрестность сильного землетрясения, временные кластеры сейсмичности, зона субдукции

DOI: 10.31857/S0203030620060176

ВВЕДЕНИЕ

Метод построения обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) ранее применялся только для анализа мировых каталогов землетрясений, обеспечивавших максимально возможную статистику и осреднение [Родкин, 2008, 2020; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016]. Под обобщенной окрестностью здесь понимается объединение данных по большому числу (до 1000) пространственно-временных окрестностей индивидуальных сильных землетрясений. Такое объединение позволяет резко увеличить статистику и, за счет этого, повысить детальность описания фор- и афтершокового режима, четче выявить его типовые черты, для каждого конкретного сильного землетрясения маскируемые сильной случайной изменчивостью сейсмического режима. Для получения более четких результатов пространственный размер окрестности нормируется на зависящий от магнитуды размер очага данного

сильного события. Расстояние от очага сильного землетрясения для входящих в его окрестность слабых землетрясений считается при этом не в километрах, а в долях размера очага. Для определения размера очага в разных работах использовались разные формулы. На качественном уровне результаты от выбора формулы не зависят; различия появляются при расчете коэффициентов регрессионных связей между разными параметрами. В данной работе мы использовали наиболее простой вариант связи размера очага L и магнитуды M по формуле [Соболев, 1993]. Попадающими в обобщенную окрестность считаются землетрясения, отстоящие от главного события не более чем на 5 размеров очага:

$$\log(L, \text{ км}) = 0.5M - 1.9. \quad (1)$$

Ниже предлагается пример реализации такого подхода на основе региональных каталогов. Целью работы исходно были адаптация методики

построения ООСЗ для региональных данных и выявление возможной региональной специфики ООСЗ. При этом представляется возможным и необходимым снизить пороги учета событий и уровень магнитуд сильных событий. Статистическая обеспеченность результатов при работе с региональными каталогами обычно хуже, так как число формирующих обобщенную окрестность сильных событий меньше. При этом, однако, может возрасти детальность каталога (лучше представлены более слабые события) и представляется возможность рассмотреть региональные особенности сейсмического режима. В данной работе мы используем региональный каталог сейсмичности Курильских островов и Камчатки. При этом, ввиду худшей статистической обеспеченности, мы вынужденно вернулись к ранее использовавшемуся [Родкин, 2008] варианту использования при построении обобщенной окрестности также и части событий, с магнитудами ниже порога надежной регистрации M_c . В работах [Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016] была продемонстрирована возможность такого подхода для интенсивных параметров очагов, таких как координаты и время события, явным образом не зависящих от магнитуды землетрясения. Для этих параметров неполно представленные события меньших магнитуд могут рассматриваться как случайная выборка из истинной совокупности землетрясений и, тем самым, адекватно отражать многие характеристики этой истинной полной совокупности. Было показано, что на качественном уровне характер выявляемых аномалий оказывается правильным при использовании землетрясений с $M < M_c$. Количественное описание регрессионных соотношений, описывающих развитие наблюдаемых в ООСЗ аномалий [Rodkin, Tikhonov, 2016], потребовало бы более строгий отбор событий, в частности, с учетом одностороннего расположения станций в большинстве зон субдукции.

КАТАЛОГ И РЕГИОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Регион Курильских островов и Камчатки характеризуется сильной, в том числе и глубокой, сейсмичностью. Основой данной работы являлся каталог Курило-Камчатских землетрясений [Андреева, Ким, 2012] с 1737 г., пополняемый авторами из бюллетеня ISC [ISC = [International Seismological Centre] ..., 2020] и продолженный до середины марта 2020 г. В данной работе использован этот вариант формирования базы данных как более единообразный по территории, тогда как региональные каталоги Геофизической службы Камчатки и Курильских островов существенно разнородны по своей наполненности [Смирнов и др., 2019]. В анализируемую далее подборку данных включены события Камчатского региона, Курильских островов, широкофокусные события

Охотского моря ($\varphi = 40\text{--}75^\circ \text{ N}$, $\lambda = 120\text{--}175^\circ \text{ E}$). Из настоящего исследования были исключены мелкофокусные события о-ва Сахалин. В такой список входит 44153 землетрясения с магнитудой $M \geq 3.0$. Представительными для Курильского региона могут считаться землетрясения с магнитудой четыре и более [Sasorova et al., 2013]; но и такие события полностью представлены только с 1998 г. В данной работе мы используем данные с 1964 г., т.к. именно тогда увеличились регистрационные возможности сети и количество событий возросло в три раза. По указанным выше соображениям, мы вынуждены рассматривать также и события, с магнитудами $M \geq 3.0$, ниже порога надежной регистрации (такие события относительно надежно регистрируются только на Камчатке, но не на Курилах). Составленный таким образом каталог обеспечивает уже приемлемую статистику 40491 события с глубиной очага $0 \leq H \leq 700$ км, что позволяет строить обобщенную окрестность для землетрясений Курило-Камчатской сейсмоактивной зоны. На рис. 1 показано пространственное распределение землетрясений в рассматриваемом регионе. Синими точками даны эпицентры землетрясений, другие обозначения будут описаны ниже.

При построении обобщенной окрестности отбирается некоторое большое число сильнейших землетрясений данного каталога. Порог отбора диктуется параметрами каталога и желанием увеличить число отбираемых сильных землетрясений; в большинстве предыдущих работ, при работе с мировыми каталогами данных, этот порог был в окрестности $M = 7.0$. Ограничение меньшим числом наиболее сильных землетрясений не продуктивно, так как при этом увеличивается вклад случайных особенностей сейсмического режима при отдельных сильнейших землетрясениях. Сильно понижать порог также не продуктивно, так как вклад слабых событий с малым числом фор- и афтершоков загрязняет обобщенную окрестность фоновыми землетрясениями. Для используемого в данной работе каталога оптимальным значением порога принято $M \geq 6.3$.

На рис. 2а, б представлены выбранные таким образом события с магнитудой $M \geq 6.3$, их магнитуды и глубины. На рисунке обращает на себя внимание неравномерность распределения землетрясений по времени; эта их особенность будет обсуждаться ниже, где будет показано что этот эффект не порождается афтершоками. На рис. 2б хорошо видно (и это было известно ранее, например, в работах [Баранов и др., 1989; Тараканов, 1997; Тараканов, Андреева, 2012]) разграничение формирующих обобщенную окрестность сильных событий на два этажа по глубине; отсутствуют события с глубиной 300–400 км, и только одно сильное землетрясение имеет глубину в интервале 200–300 км. Это дает основание разделить сильные

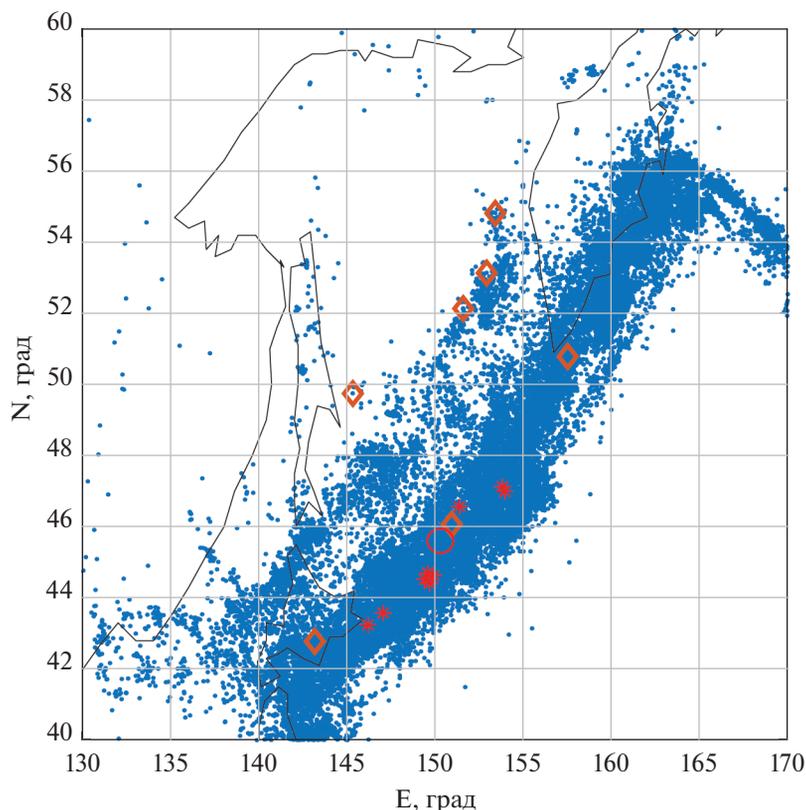


Рис. 1. Расположение эпицентров землетрясения (синие точки). Сильные землетрясения, вошедшие в обобщенную окрестность и формирующие два обозначенных на рис. 2 кластера сейсмичности обозначены красными звездочками и ромбами, размер очага сильнейшего из этих землетрясений – красный круг.

землетрясения по глубине на два класса – до 300 км и глубже 400.

В предыдущих работах по построению и анализу обобщенных окрестностей выбирались разные диапазоны глубин землетрясений, и расстояние между очагами L рассчитывалось с учетом глубины землетрясений; при этом глубокие, и неглубокие землетрясения заведомо попадали в разные окрестности. В данном случае, учитывая результаты предыдущих работ [Захарова, Рогожин, 1999, 2004; и др.], указывавших на взаимодействие сейсмического процесса на разных глубинах, мы решили не ограничивать обобщенную окрестность по глубине и допустить возможность попадание глубоких землетрясений в окрестность неглубоких землетрясений и наоборот. Ниже отдельно рассматриваются обобщенные окрестности для сильных землетрясений с глубиной очага $H < 300$ и $H > 400$. Попадающими в обобщенную окрестность полагались события, отстоящие от эпицентра основного землетрясения не более чем на 5 размеров очага по формуле (1); отсюда, для используемого диапазона магнитуд главных событий, размеры обобщенной окрестности варьируют примерно от 100 до 300 км.

АНАЛИЗ ОБОБЩЕННОЙ ОКРЕСТНОСТИ

При анализе обобщенной окрестности естественно сначала рассмотреть изменчивость потока фор- и афтершоков. Для описанной выше обобщенной окрестности по региональным данным для Курильских островов и для Камчатки эта зависимость дана на рис. 3, где отдельно даны окрестности 72 событий $M \geq 6.3$ с глубиной $H < 300$ км и окрестности 12 землетрясений $M \geq 6.3$ и $H > 400$ км. Эти обобщенные окрестности включают данные о более 199 тыс. землетрясений и о 1498 событиях соответственно; причем в обеих этих обобщенных окрестностях представлены и глубокие и неглубокие землетрясения (как отмечалось выше разница глубины очагов при расчете расстояния не учитывалась). На рис. 3 черными точками даны значения интенсивности потоков событий для групп из 60 последовательных по времени событий для окрестности 72 сильных событий с глубиной $H < 300$ км. Шаг составлял половину от размера группы (30 событий). Красной штриховой линией показаны данные для обобщенной окрестности 12 землетрясений с глубиной $H > 400$ км, соседние точки рассчитаны для групп из 16 событий с шагом 8. Естественно, вынужденно

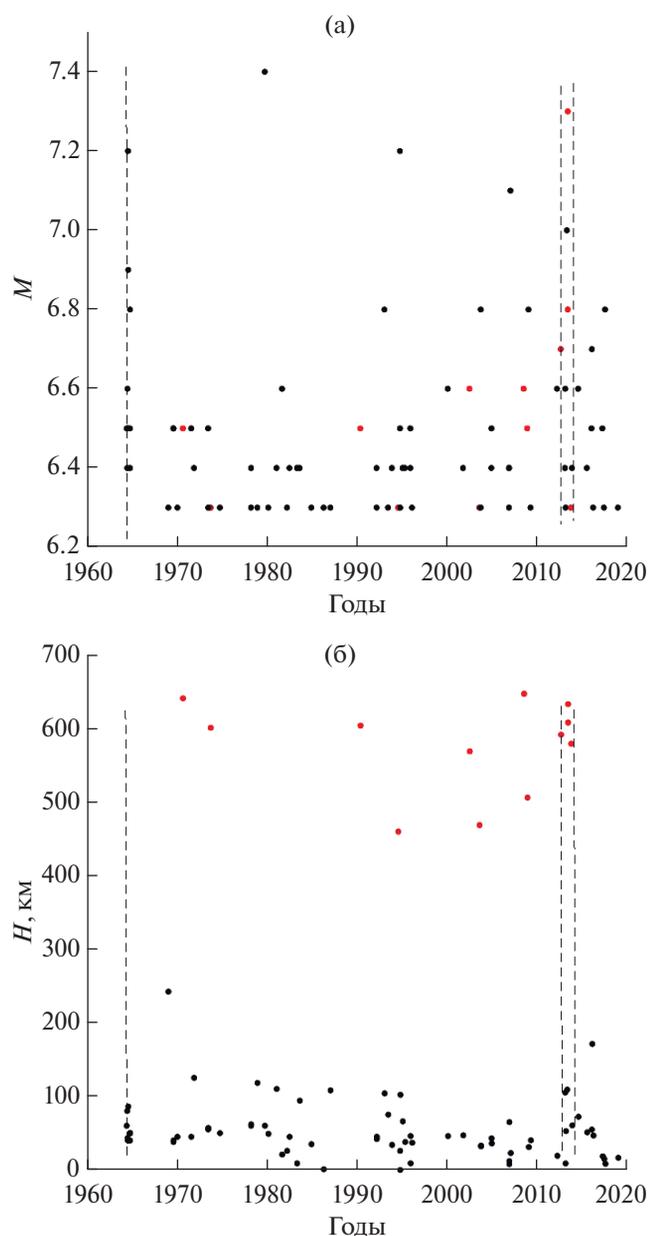


Рис. 2. Распределение по времени сильных землетрясений, формирующих обобщенную окрестность, величины магнитуд (а) и глубин (б); неглубокие и мало-глубинные ($H < 300$) землетрясения показаны черными звездочками, глубокие $H > 400$ — красными. Пунктирными линиями ограничены 2 временных кластера высокой сейсмичности.

меньший размер группы для глубоких землетрясений означает и больший случайный разброс.

На рис. 3а, как и ранее по результатам анализа обобщенной окрестности по мировым данным, видно, что рост числа форшоков начинается примерно за 100 дней до момента обобщенного сильного землетрясения. Аналогичным образом хорошо виден режим афтершоков, отвечающий обобщенному закону Омори (см. рис. 3б). Похожим

образом ведет себя обобщенная окрестность для глубоких землетрясений (красные штриховая линия и точки, см. рис. 3). В этом случае, естественно, данных много меньше, и результаты намного менее определенные. Обращает, однако, на себя внимание, что спад числа афтершоков в окрестности сильных событий с глубиной $H > 400$ км происходит быстрее, чем в окрестности сильных землетрясений с глубиной $H < 300$ км.

Несколько неожиданно выглядит большое число пиков, отвечающих фор- и афтершоковым последовательностям сильных землетрясений, происшедших близко по времени к моменту обобщенного сильного события, причем сами эти сильные события в подавляющем большинстве случаев не являются афтершоками сильнейшего события. В обобщенных окрестностях, построенных по мировым данным, подобные пики также присутствовали, но их число и степень выраженности были существенно слабее. Наличие пиков связано с группированием сильных землетрясений по времени (см. рис. 2, 3а), этот важный эффект мы обсудим ниже.

Ранее, по результатам анализа обобщенной окрестности, был выявлен эффект уменьшения глубин землетрясений вблизи обобщенного сильного землетрясения [Rodkin, Tikhonov, 2016; Родкин, 2020]; очаги землетрясений в окрестности сильного события как бы всплывают. Подобный эффект для отдельных случаев отмечался рядом авторов и ранее (например, [Рогожин, 2009]); использование метода построения и анализа обобщенной окрестности показало типичность этого явления. Этот эффект представляется важным как указание на существование в очаговой области связанной фазы флюидной компоненты, прорыв этого флюида в верхние горизонты и может обеспечивать наблюдаемый эффект “всплывания очагов”. Эффект всплывания очагов проявляется и по данным используемого нами каталога. На рис. 4 представлены средние глубины событий для последовательных групп землетрясений в обобщенных окрестностях сильных землетрясений с глубиной $H < 300$ и $H > 400$ км. Размер групп такой же, как и для описанного выше случая анализа потока числа фор- и афтершоков.

Результаты в обобщенной окрестности, сформированной сильными событиями с глубиной очага $H < 300$ км качественно повторяют результаты по общемировым данным для событий с глубиной очага $H < 70$ км. Примерно за 100 дней до момента обобщенного сильного землетрясения начинается уменьшение средней глубины землетрясений. Компенсирующий рост средней глубины землетрясений происходит в афтершоковой последовательности и длится 200–300 дней.

Для сильных событий с глубиной очага $H > 400$ наблюдается (нижняя панель, см. рис. 4) проти-

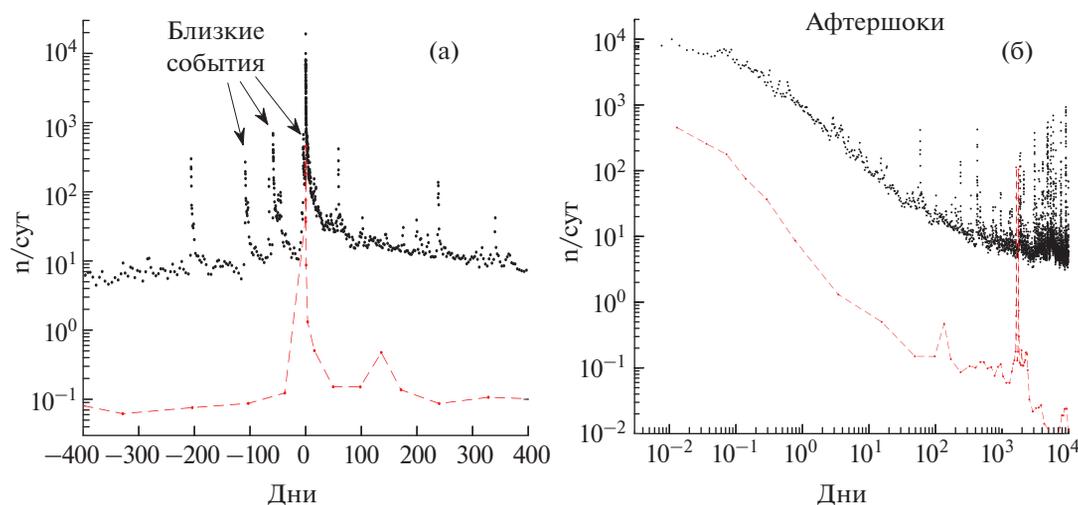


Рис. 3. Фор- и афтершоковая активность в обобщенной окрестности сильного землетрясения, в линейной шкале времени (а) и в логарифмической шкале времени для афтершоков (б); черные точки – основные события $H < 300$ км, красная штриховая линия и точки – $H > 400$. Стрелками (а) указаны некоторые близкие по времени события.

воположная тенденция, а именно, происходит рост средней глубины землетрясений. Заметим, что для землетрясений с $H > 400$ км вряд ли можно предполагать наличие в очаговой области заметных концентраций флюидной компоненты. Поэтому и гипотеза о связи изменений глубины землетрясений с прорывом вверх флюида малой плотности вряд ли оправдана в этом случае. В случае нашей подборки данных изменение средней глубины землетрясений может быть следствием концентрации большого числа фор- и афтершоков вблизи компактного по времени кластера сильных землетрясений с глубинами очагов около 600 км. Недостаток статистических данных по глубоким землетрясениям не позволяет получить более определенные результаты. Отметим только значительную длительность (200 и более дней) процессов увеличения средней глубины событий у форшоков и уменьшения глубины у афтершоков глубоких землетрясений.

Ранее было отмечено, что средняя глубина землетрясений в обобщенной окрестности сильного землетрясения изменяется как логарифм времени, до момента обобщенного сильного землетрясения. На рис. 5 показано изменение средней глубины событий в логарифмической шкале времени для афтершоков (для форшоков статистических данных заведомо недостаточно). Как видно на рис. 5, четкой логарифмической зависимости в данном случае не наблюдается; скорее всего, это связано с существенно худшей статистической обеспеченностью, чем при анализе мировых данных. При этом сам по себе эффект систематического изменения средней глубины землетрясений сомнений не вызывает.

В предыдущих работах по анализу обобщенных окрестностей рассматривалась также аномалия величин наклона графиков повторяемости b -value и аномалия среднего значения магнитуды M_{av} . Как следует из соотношения для расчета b -value методом максимального правдоподобия [Utsu, 1965; Marzocchi, Sandri, 2003]

$$b = \log e / (M_{av} - M_c), \tag{2}$$

где M_c – порог надежной регистрации землетрясений, M_{av} и b -value изменяются качественно аналогично, но с обратным знаком.

Учитывая вышесказанное, можно ограничиться рассмотрением одной из этих аномалий. Мы приводим аномалию M_{av} как имеющую более ясный физический смысл. Отметим, что, желая сохранить максимум статистики, мы не отбраковывали события в диапазоне меньших магнитуд, регистрируемых со значительными пропусками. При анализе величин магнитуды это приведет к относительно большим погрешностям, поэтому представленные аномалии значений средней магнитуды следует трактовать исключительно в качественном смысле, без оценки их числовых параметров.

На рис. 6 представлены аномалии изменения средней магнитуды землетрясений. Видно, что для обобщенной окрестности и менее глубоких ($H < 300$) и глубоких ($H > 400$) сильных землетрясений наблюдается рост средних значений магнитуды в окрестности момента обобщенного сильного события. Аномалия начинается за 200–300 дней до момента обобщенного сильного землетрясения. Заметим, что также довольно рано эта аномалия начинается для случаев анализа интенсивности потока событий и средней глубины землетрясений (см. рис. 3–5). Более бедная региональная

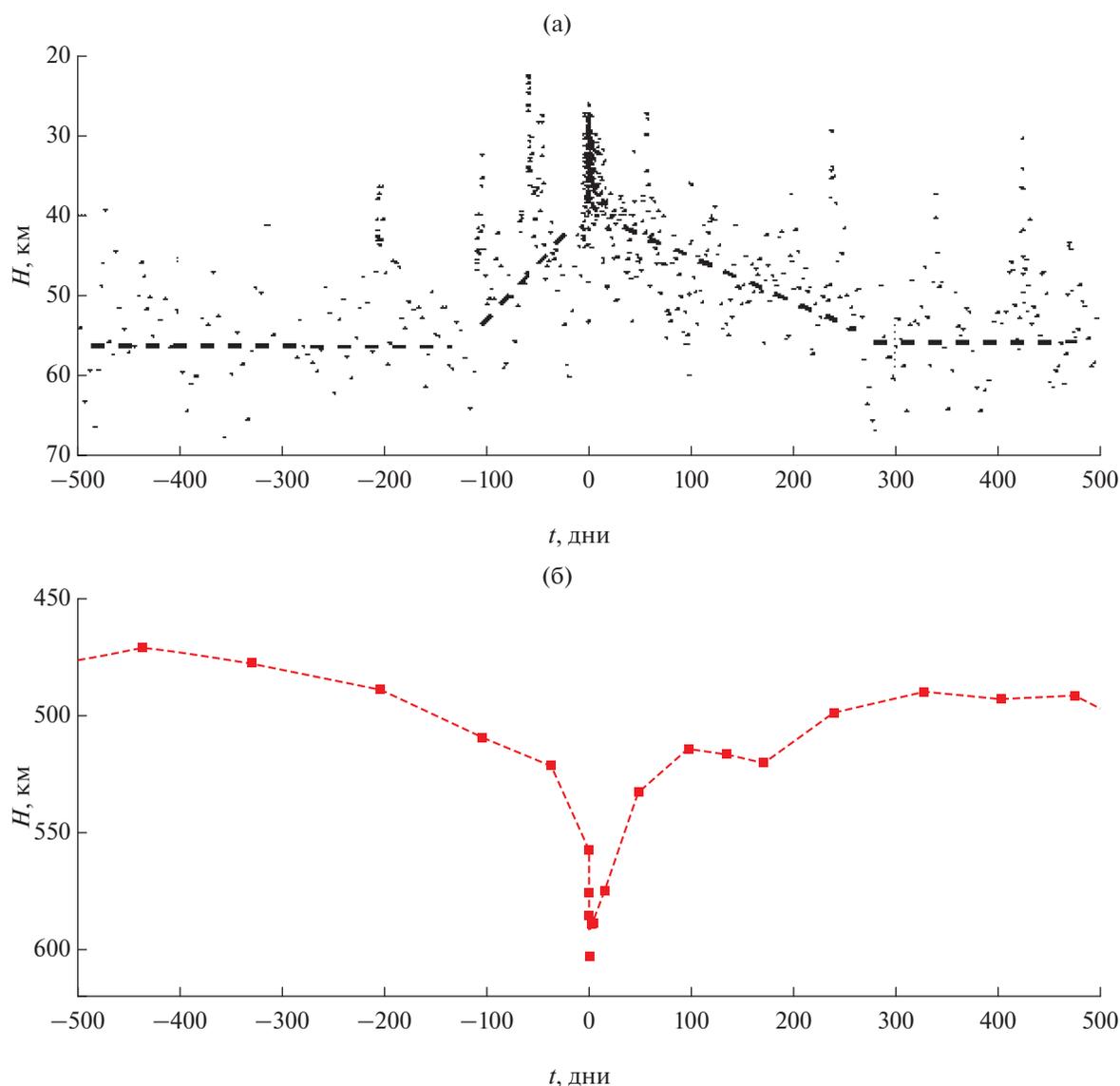


Рис. 4. Изменение средней глубины событий в обобщенной окрестности, сформированной сильными землетрясениями с глубиной $H < 300$ км (а) и $H > 400$ км (б), черной штриховой линией (а) обозначена тенденция изменения средней глубины землетрясений.

статистика и не полная регистрация используемых при построении обобщенной окрестности землетрясений не позволяет исследовать закон развития аномалии, как это было сделано ранее по мировым данным, согласно которым [Родкин, 2008, 2020; Rodkin, 2012; Rodkin, Tikhonov, 2016], амплитуда аномалии возрастает к моменту обобщенного сильного землетрясения t_c как $-\log(|t - t_c|)$, где t — текущее время. По указанным выше причинам, характер развития аномалии здесь не рассматривается, этот вопрос детально освещается в работе [Родкин, 2020].

Выше мы упоминали указания на связь глубоких и неглубоких землетрясений. Метод обобщенной окрестности позволяет рассмотреть этот

вопрос со статистических позиций. На рис. 7 показано расположение глубоких землетрясений в обобщенной окрестности сильных землетрясений с глубиной $H < 300$ км и более мелких, в обобщенной окрестности сильных глубоких событий с $H > 400$ км. Явной аномалии режима глубоких землетрясений во временной окрестности сильных менее глубоких очагов и, наоборот, числа мелких событий во временной окрестности сильных глубоких не наблюдается, что может объясняться и разнесением существенно разноглубинных землетрясений по горизонтали в связи с наклоном погружающейся плиты. В предположительном плане можно отметить несколько более высокую активность глубокой сейсмичности в окрестности

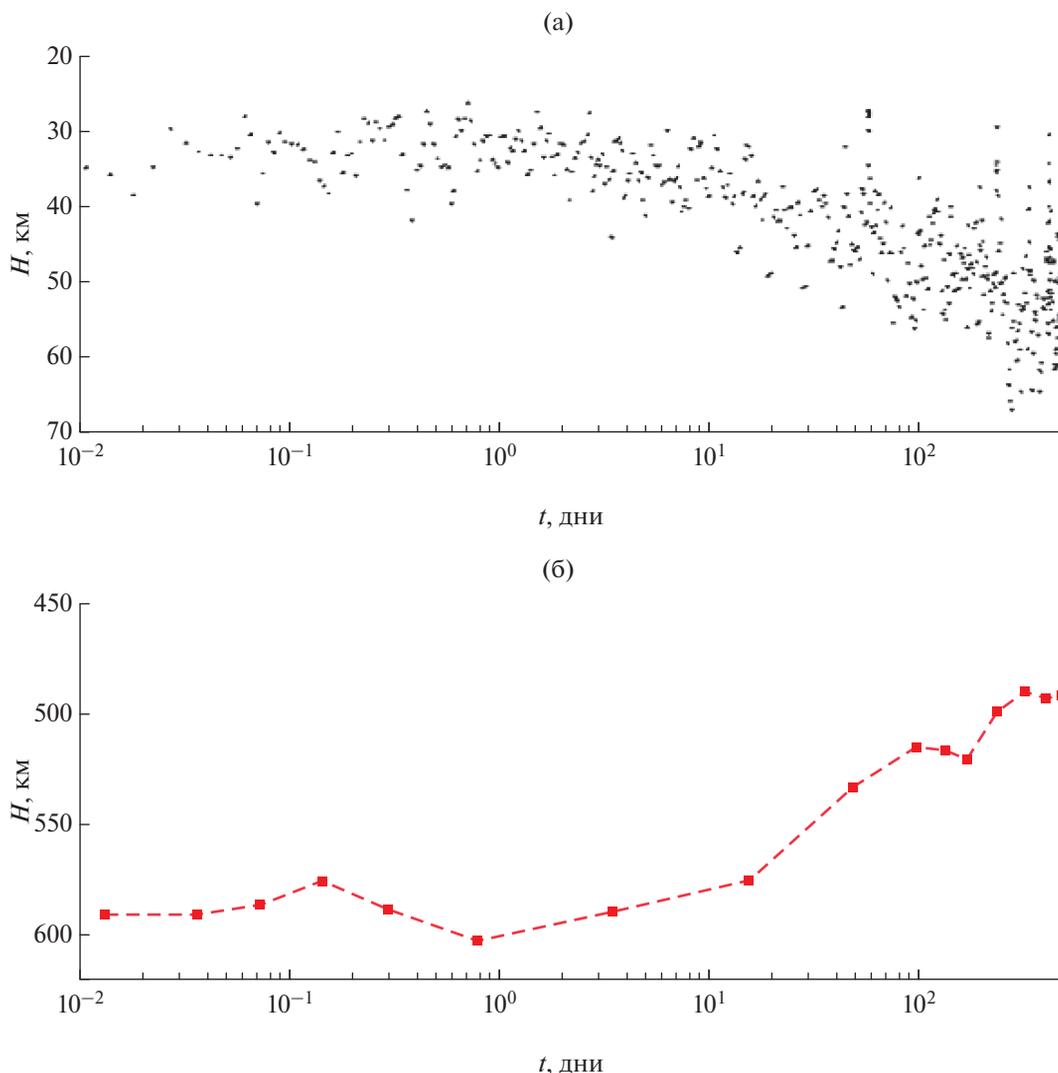


Рис. 5. Изменение средней глубины афтершоков в обобщенной окрестности, сформированной сильными землетрясениями с глубиной $H < 300$ км (а) и $H > 400$ (б).

сильных менее глубоких землетрясений и пониженную активность мелких событий в окрестности глубоких землетрясений. В целом, результаты сопоставления не противоречат (но весомо и не подкрепляют) выводы о существовании глубоких предвестников сильных неглубоких землетрясений [Захарова, Рогожин, 1999, 2004; и др.].

Выше уже отмечался эффект группирования сильных землетрясений Курило-Камчатского региона по времени, приводящий к многочисленным сильным выбросам на графиках для обобщенной окрестности. Если сближенные по времени моменты сильных землетрясений формируют временные кластеры, они должны наблюдаться и на временной последовательности землетрясений. И такие кластеры действительно отчетливо видны (см. рис. 2). Здесь рассматриваются два таких кластера, выделенных на рис. 2 вертикальными ли-

ниями. Вертикальной линией 1964 г. выделена первая группа таких событий. Магнитуды этих 9 землетрясений, последовательно по времени, равны $M = 6.5, 6.4, 6.6, 6.5, 7.2, 6.9, 6.4, 6.8$ и 6.5 . По закону Бота магнитуда сильнейшего афтершока, в среднем, на 1.2 меньше магнитуды главного события [Bath, 1965]. Согласно уточнению закона Бота [Shcherbakov, Turcotte, 2004], различие магнитуды основного толчка и сильнейшего афтершока составляет $\Delta M = 1.11 \pm 0.29$. Отсюда заключаем, что события этого кластера, за редким исключением, не могут быть афтершоками, и должны рассматриваться как независимые основные события. Аналогично и для второго кластера (правый кластер, см. рис. 2), 4 из 8 событий которого формируют компактный по времени кластер с глубинами очагов около 600 км.

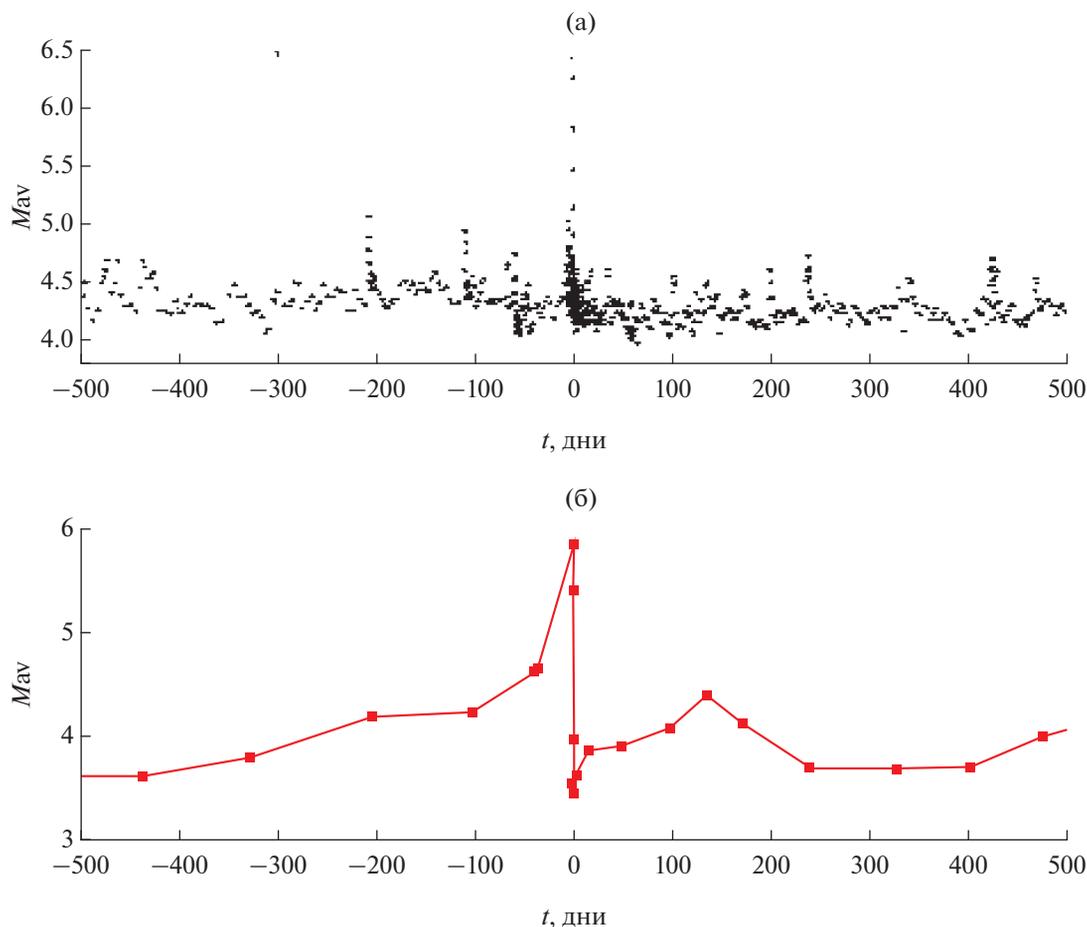


Рис. 6. Изменение средней магнитуды землетрясений в обобщенной окрестности, сформированной сильными землетрясениями с глубиной $H < 300$ км (а) и $H > 400$ (б).

Ряд авторов [Баранов и др., 1989; Sasorova et al., 2013] ранее уже обращали внимание на эффект группировки сильных землетрясений Курило-Камчатского региона по времени. По мировым данным на эффект возникновения связанных по времени, но пространственно сильно разнесенных сильных событиях, указывается, например, в работе [Godano, 2015].

С целью проверки гипотезы о группировке выбранных нами 84 сильных событий во времени были сопоставлены статистики минимального расстояния по времени между этими 84 событиями и для случайных независимых по времени событий, случайных образом произошедших на таком же интервале времени. Были построены распределения для 500 случайных реализаций и для данной эмпирической выборки. Результаты сопоставления даны на рис. 8. Видно, что распределение для фактических 84 сильнейших землетрясений радикальным образом отличается от случайных реализаций. Отклонения от пуассоновского распределения для независимых событий имеет ме-

сто примерно для половины случаев (около 35 событий) при значениях минимального расстояния по времени Δt_{\min} менее 20–30 дней. Отметим, что в линейных (не логарифмических) координатах по оси “у” различие модельных и эмпирической кривой могло бы оказаться незамеченным.

По данным рис. 8 можно заключить, что за оценку возможной продолжительности кластера из нескольких (n) землетрясений можно принять $T = n \times 20$ дней. Исходя из этой оценки, рассмотрим пару визуально бросающихся в глаза кластеров, ограниченных на рис. 2 вертикальными пунктирными линиями. Формирующие эти два кластера сильные $M \geq 6.3$ землетрясения обозначены на рис. 1 красными звездочками и ромбами соответственно. Там же красным кружком показан примерный размер очага сильнейших землетрясений этих кластеров. Видно, что пространственный размер кластеров намного больше размера очагов, формирующих кластер землетрясений. Возникает естественный вопрос, если статистически выявляемые кластеры потока событий дей-

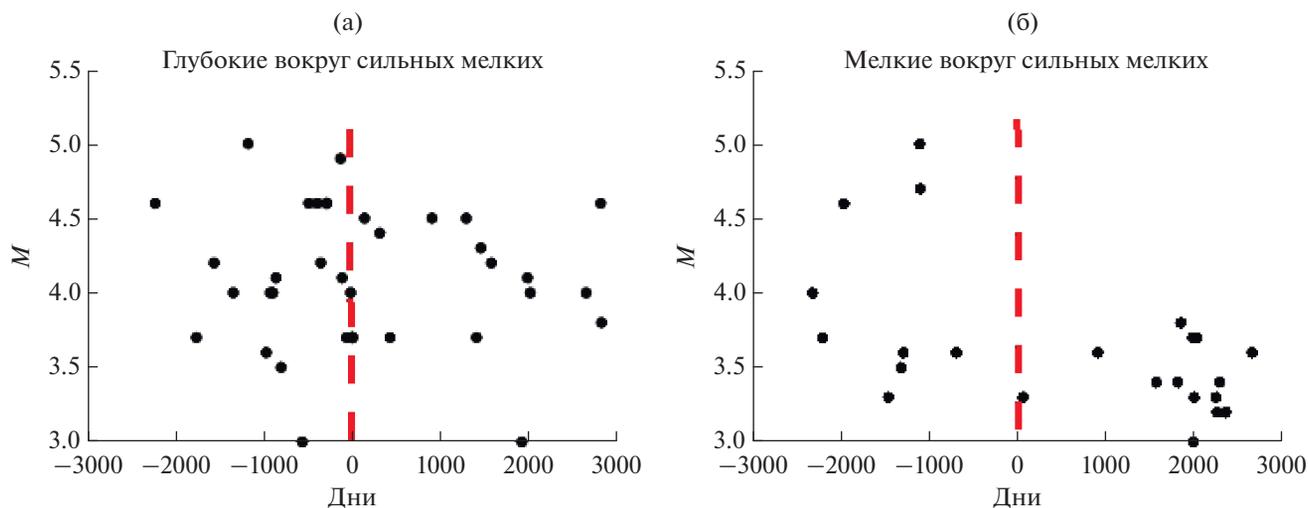


Рис. 7. Соотношение разноглубинных землетрясений в обобщенной окрестности сильных глубоких и менее глубоких землетрясений.

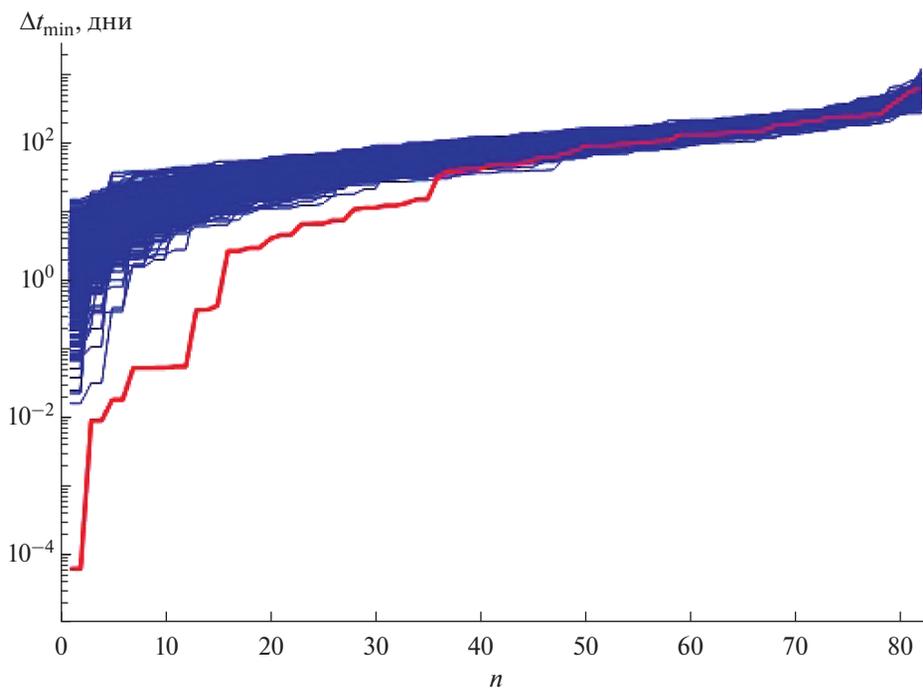


Рис. 8. Сопоставление модельных распределений величин минимального расстояния до другого землетрясения Δt_{\min} для 500 случайных независимых реализаций (синие линии) и для эмпирической реализации.

ствительно генетически связаны между собой, то каков может быть механизм их образования. Гипотетически можно предположить, что в данном случае очаги связаны общим полем напряжений жесткого сегмента погружающейся плиты, а сами землетрясения локально реализуются при выполнении неких (неизвестных) локальных же условий в общем изменяющемся внешнем поле напряжений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализован вариант использования метода построения обобщенной окрестности сильных землетрясений по региональным данным для региона Курильских островов и Камчатки. Региональный подход в данном случае позволил выявить эффект значительной кластеризации сильных землетрясений во времени; по мировым данным

этот эффект мог маскироваться наложением событий из разных регионов. Показана как полезность такого анализа, так и определенная ограниченность возможностей его использования ввиду более бедной статистики регионального каталога по сравнению с общемировыми данными.

Полученные по региональным данным выводы в основном повторяют результаты, ранее полученные по мировым данным. При этом ряд регрессионных соотношений, выполняющихся по мировым данным, по региональным данным получить не удалось. Мы полагаем, что причиной этого является существенно меньший объем статистических данных, что не удалось в данном случае скомпенсировать использованием событий меньшей магнитуды, регистрируемых существенно не полно.

Новым предварительным результатом явилось рассмотрение характера взаимодействия режимов глубоких и менее глубоких землетрясений. Предварительно наблюдается большая продолжительность подготовки глубоких ($H > 400$ км) сильных землетрясений по сравнению с менее глубокими. Если в окрестности менее глубоких основных событий аномалии роста числа форшоков и глубины землетрясений начинаются примерно за 100 дней до момента обобщенного сильного землетрясения, то по предварительным данным для глубоких землетрясений, аналогичные аномалии, а также рост средней магнитуды начинают проследиваться за 200 и более дней до момента обобщенного глубокого сильного землетрясения. При этом афтершоковая активность спадает для глубоких землетрясений быстрее, чем для менее глубоких.

Метод анализа обобщенной окрестности оказался также удобным для выявления эффекта группировки сильных землетрясений региона во времени. Эффект группировки событий для Курило-Камчатского региона оказался существенно сильнее, чем по мировым данным. Возможно, это связано с тем, что по мировым данным совместно используются данные по разным регионам, что маскировало эффект группировки. Этот вопрос будет исследован в дальнейшем. Согласно проведенному статистическому анализу, более трети сильных землетрясений Курило-Камчатского региона могут оказаться не независимыми, а относиться к одному из временных кластеров активизации. При этом пространственный размер кластеров на порядок и более превышает размеры очага максимального, входящего в кластер землетрясения. Механизм формирования кластеров остается открытым. Представляется полезным учитывать эффект временной кластеризации сильных землетрясений Курило-Камчатского региона при прогнозе сейсмической активности.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (тема АААА-А19-119011490129-0) и Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (тема АААА-А18-118012290125-2.2) и поддержана РФФИ, проект № 19-05-00466.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева М.Ю., Ким Ч.У.* Землетрясения Курило-Камчатского региона (1737–2009 гг.). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2012. 384 с.
- Баранов Б.В., Викулин А.В., Лобковский А.В.* Мелкофокусная сейсмичность в тылу Курило-Камчатской островной дуги и ее связь с сильными землетрясениями в зоне подвига // Вулканология и сейсмология. 1989. № 6. С. 73–84.
- Захарова А.И., Рогожин Е.А.* Глубокофокусные предвестники сильных сейсмических событий на Камчатке // Геофизика на рубеже веков // Избранные труды ученых ОИФЗ РАН. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 265–275.
- Захарова А.И., Рогожин Е.А.* Пространственно-временные соотношения очагов сильных землетрясений и их глубокофокусных предвестников // Исследования в области геофизики (к 75-летию Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта). М.: ОИФЗ РАН, 2004. С. 13–19.
- 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.* Типовая фор- и афтершоковая аномалия — эмпирика, интерпретация // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 64–76.
- Смирнов В.Б., Отти С., Потанина М.Г., Михайлов В.О., Петров А.Г., Шапиро Н.М., Пономарев А.В.* Оценка параметров цикла разрушения литосферы по данным региональных каталогов землетрясений // Физика Земли. 2019. № 5. С. 3–21.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.
- Тараканов Р.З.* Сейсмический потенциал Курило-Охотского региона. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Т. VI. Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 1997. 240 с.
- Тараканов Р.З., Андреева М.Ю.* Роль сейсмофокальной зоны в формировании и развитии структур Курило-Охотского региона // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 6. С. 87–96.
- Bath M.* Lateral inhomogeneities in the upper mantle // Tectonophysics. 1965. V. 2. P. 483–514.
- Godano C.* A new expression for the earthquake interevent time distribution // Geophys. J. Int. 2015. V. 202. P. 219–223.

ISC = [International Seismological Centre]. URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/.html> (дата обращения: 16.03.2020).

Marzocchi W., Sandri L. A review and new insights in the estimation of b-value and its uncertainty // *Ann. Geophys.* 2003. V. 46. P. 1271–1282.

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. Washington, D.C.: AGU, 2012. V. 196. P. 27–39. <https://doi.org/10.1029/2011GM001060>

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.

Sasorova E.V., Andreeva M.Yu., Levin B.W. Dynamics of the seismicity of the Kuril arc based on multivariate statistical analysis // *Russian J. of Pacific Geology.* 2013. V. 7. № 1. P. 56–64.

<https://doi.org/10.1134/S1819714013010077>

Shcherbakov R., Turcotte D.L. A Modified Form of Bath's Law // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2004. V. 5. № 94. P. 1968–1975.

Utsu T. A method for determining the value of b in a formula $\log n = a - bM$ showing the magnitude-frequency relation for earthquakes // *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.* 1965. V. 13. P. 99–103 (In Japanese).

Analysis of the Generalized Vicinity of a Strong Earthquake from Regional Data; Kuril Islands and Kamchatka Region

M. V. Rodkin^{1,2,*}, M. Yu. Andreeva², and O. O. Grigorieva³

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 East Branch, Russian Academy of Sciences, Nauki str., 1B, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022 Russia*

³*Sakhalin Branch of the Unified Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Tikhookeanskaya str., 2-a, Yuzhno-Sakhalinsk, 693010 Russia*

*e-mail: rodkin@mitp.ru

Proposed and implemented in a series of works [Rodkin, 2008, 2012, 2020; Rodkin, Tikhonov, 2016], the method of constructing a generalized vicinity of a strong earthquake was previously used only for the analysis of world earthquake catalogs. The use of this method for the analysis of regional data assumes a decrease in the magnitudes of a strong events and the possibility of taking into account the regional features of the seismic regime. The construction of a generalized vicinity based on regional data for the Kuril Islands and Kamchatka has been carried out. The same features of the seismicity have been revealed as in the generalized vicinity constructed from the world data; in particular, the effect of a decrease of earthquake depths in the vicinity of a strong earthquake. Besides, the effect of a temporal clustering of strong earthquakes, including those significantly distant from each other, was unexpectedly revealed. The activation areas cover significant part of the subduction zone, widely spaced both along the deep trench and in depth. The parameters of clusters and the proportion of statistically dependent and independent strong events were estimated. The interrelation of seismicity at different depths is considered also.

Keywords: generalized vicinity of a strong earthquake, temporal clusters of seismicity, subduction zone