

Посвящается светлой памяти моего учителя академика РАН
Сергея Александровича Федотова

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ПРИЛОЖЕНИИ К ДОЛГОСРОЧНОМУ СЕЙСМИЧЕСКОМУ ПРОГНОЗУ И СРЕДНЕСРОЧНО-КРАТКОСРОЧНОМУ УТОЧНЕНИЮ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

© 2021 г. А. В. Соломатин*

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия
*e-mail: alf55@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2020 г.
После доработки 29.10.2020 г.
Принята к публикации 11.12.2020 г.

Анализируется развитие сейсмического процесса в очаговых зонах сильнейших ($M \sim 8$) землетрясений Тихоокеанского сейсмоактивного пояса и Юго-Восточной Азии. Для повышения однородности данных, относящихся к различным сейсмоактивным регионам, предложено представление об обобщенном энергетическом классе землетрясений. Это представление является перспективной альтернативой существующей методике энергетической классификации землетрясений. Рассмотрена важная характеристика развития очаговой зоны сильнейшего события – энергетический спектр сейсмического процесса, первым приближением которого считается закон Гутенберга–Рихтера. Предложена методика ее исследования, выявлены значимый пикообразный рост наклона графика повторяемости землетрясений в период от 5 до 10 лет до сильнейшего события и его уменьшение непосредственно перед ним. Отмеченные пиковые аномалии, предположительно, носят повторяющийся, квазипериодичный характер, причем периоды их проявления перед сильнейшим событием могут отличаться в разных регионах. Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы как для повышения надежности долгосрочных сейсмических прогнозов, так и для среднесрочно-краткосрочных уточнений степени сейсмической опасности.

Ключевые слова: сейсмический процесс, закон Гутенберга–Рихтера, энергетический спектр сейсмического процесса, сейсмический прогноз

DOI: 10.31857/S0203030621020073

ВВЕДЕНИЕ

Приведенные в статье исследования относятся к важнейшему направлению сейсмологии: мониторингу сейсмического процесса и прогнозированию на его основе природных сейсмических катастроф. Важная проблема сейсмического прогноза заключается в сложности и многостадийности процесса развития очагов землетрясений и, прежде всего, очагов наиболее опасных из них – сильнейших, а также в широком спектре определяющих это развитие факторов. Эти аспекты, наряду с недостаточной изученностью сейсмотектонических механизмов, не позволяют к настоящему времени построить точную и надежную методику оценки сейсмической опасности.

Как правило, наибольшей надежностью обладают долгосрочные сейсмические прогнозы, осно-

ванные на самых общих и потому более устойчивых долговременных закономерностях развития сейсмического процесса. Временная точность таких прогнозов обычно невелика.

Среднесрочные и краткосрочные сейсмические прогнозы опираются на относительно кратковременные закономерности, поэтому обладают большей временной точностью. При этом важно отметить, что такие закономерности в значительной степени осложнены локальными вариациями условий развития сейсмического процесса. Этот фактор существенно снижает надежность таких прогнозов.

Концепция решения проблемы сочетания надежности и точности сейсмического прогноза представлена в предложенном акад. С.А. Федотовым методе долгосрочного прогноза сейсмической опас-

ности для Курило-Камчатской дуги и Северо-Восточной Японии – ДССП (ДолгоСрочный Сейсмический Прогноз). Этот метод, разработанный более полувека назад, успешно развивается вплоть до настоящего времени [Федотов, 1965, 1968, 2005; Федотов и др., 1980; Федотов, Соломатин, 2019]. Главная идея указанной концепции заключается в том, что долговременные, наиболее устойчивые, закономерности развития очагов сильнейших землетрясений представляются базовым элементом изучения механизма сейсмической активности и прогноза ее развития, так и основой для краткосрочно-среднесрочного уточнения уровня сейсмической опасности. Как следствие, результаты работ по долгосрочному сейсмическому прогнозу должны определять развитие и применение методов среднесрочных и краткосрочных прогнозов [Федотов, 2005; Федотов и др., 1993, 2012; Соломатин, 2013].

Не будет большим преувеличением считать, что в последние десятилетия долгосрочным, наиболее фундаментальным и устойчивым характеристикам сейсмической активности в сейсмологии уделяется недостаточное внимание. Поиск таких характеристик на основе распределения землетрясений по их величине (в дальнейшем также – энергетического спектра сейсмического процесса) на заключительной стадии развития очагов сильнейших землетрясений – одна из основных задач настоящей работы.

В полном соответствии со сложившейся практикой работ по методу ДССП в дополнение к долгосрочным оценкам сейсмической опасности в статье предлагается также направление развития среднесрочно-краткосрочных методик ее уточнения.

О ПРИНЦИПАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА

Учитывая существующий пессимистический взгляд на возможность сейсмического прогноза, определяемый серией неудач целевых исследовательских проектов конца прошлого века, а также отсутствием решения этой важнейшей прикладной задачи до настоящего времени, необходимо обоснование принципиальной ее разрешимости.

Прежде всего, в методе ДССП выделяется класс сильнейших землетрясений ($M \geq 7.7$), для очагов которых характерны долгосрочные, устойчивые закономерности развития. Именно такие землетрясения во многих случаях, в частности в Курило-Камчатской дуге и прилегающих регионах, являются критически опасными.

Представление о “сейсмических брешах” – важнейшее положение, позволяющее прогнозировать наиболее вероятные места следующих сильнейших землетрясений [Федотов, 1965; Фе-

дотов и др., 2008]. Это положение метода ДССП апробировано уже в течение более чем полувекового периода. В работах [Соломатин, 2013; Моги, 1988] в развитие этого представления отмечена общность сейсмических брешей разных рангов, а также определены тенденции их развития в период подготовки сильнейших землетрясений.

Позитивный взгляд на возможность прогноза сильнейших землетрясений во временном плане основан на таком базовом положении метода ДССП, как цикличность развития их очагов [Федотов, 1968]. В дополнение к этой идее в работе [Федотов и др., 1993] была предложена эффективная методика краткосрочного сейсмического прогноза, основанная на предвещающих сильнейшие землетрясения сильных ($M \geq 6$) событиях, – “сценарий форшоков”. Такие события за двое суток предвещают примерно четверть сильнейших Тихоокеанских землетрясений. Учитывая малый период ожидания сильнейшего события, этот метод прогноза, несмотря на определенные недостатки, обладает очень высокой эффективностью.

В работах [Федотов и др., 2011; Соломатин, 2014] была показана возможность прогноза сильнейших землетрясений на основе некоторых других долгосрочных (годы–десятилетия) периодичностей. Подобные периодичности и возможность сейсмического прогноза на их основе были рассмотрены в работах [Широков, 1978; Гусев, 2008; Хаин, Халилов, 2008; Серафимова, Широков, 2012 и др.].

О СЕЙСМИЧЕСКИХ АКТИВИЗАЦИЯХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СПЕКТРЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Заканчивая рассмотрение важных предпосылок, принципиально позволяющих построить в достаточной степени точный и одновременно надежный метод сейсмического прогноза, необходимо остановиться на одном из базовых параметров сейсмического процесса – уровне его интенсивности, также используемом в методе ДССП [Федотов, 1968, 2005; Федотов и др., 1980, 2011; Родкин, 2008].

В работе [Соломатин, 2013] показано, что активизации являются важнейшей составляющей сейсмического процесса. На подобном представлении основан и широко используемый для представления хода сейсмического процесса метод ETAS [Ogata, 1989], а также его более современные модификации. Однако повышение уровня сейсмической активности нельзя считать однородным по всему энергетическому диапазону [Соболев и др., 2009]. Учитывая это, естественным выглядит представление об энергетическом спектре сейсмического процесса, фактическим и

первым приближением которого является закон Гутенберга–Рихтера.

Существенным аспектом сейсмического процесса являются также сейсмические затишья, наиболее изученным в практическом применении примером которых являются упомянутые выше “сейсмические бреши” в области очагов готовящихся сильнейших землетрясений [Федотов, 1965, 2005]. Представления о сейсмических брешах рассматриваются также в работах [Моги, 1988; Wyss, Habermann, 1988; Тихонов, 2005 и др.]. На характер тенденций их заполнения на заключительном этапе подготовки очагов сильнейших землетрясений Курило–Камчатской дуги указано в работе [Соломатин, 2013]. Тем не менее, удовлетворительного решения задачи определения роли сейсмических брешей в сейсмическом процессе, по-видимому, до сих пор нет. Вследствие этого, в дальнейшем они используются в качестве простой, аддитивной составляющей сейсмической активности.

Величина наклона графика повторяемости γ – основного параметра закона Гутенберга–Рихтера [Соболев и др., 2009], определяется физикой процесса разрушения или, согласно [Востриков, 1994], процесса сейсмического течения. Рост параметра γ в обоих случаях связан с преобладанием проявления сравнительно мелких разрывов (слабых землетрясений). Предполагается также [Соболев и др., 2009], что при определенной концентрации таких нарушений сплошности среды возникают взаимодействия между мелкими разрывами вплоть до слияния, что приводит к уменьшению наклона графика повторяемости, наблюдающегося перед образованием главного разрыва (сильнейшего события).

Подобные физические модели – мощный инструмент исследования энергетических свойств сейсмического процесса. Тем не менее, аспект проблемы, заключающийся в представлении этих свойств не для всего энергетического диапазона – в виде наклона графика повторяемости, а для его отдельных, относительно независимых, частей – в виде энергетического спектра, не имеет до сих пор адекватного решения.

В дополнение к закону Гутенберга–Рихтера в работе [Соломатин, 2011] с опорой в теоретическом плане на работу [Садовский, Писаренко, 1999] было предложено представление об энергетическом балансе сейсмического процесса. В общем виде этот баланс определяет соотношение средних энергий выше и ниже каждого из энергетических уровней. В идеальном случае ($\gamma = 1/2$) такие средние величины постоянны во всем диапазоне.

Важно, что энергетический баланс сейсмического процесса [Соломатин, 2011] представлен в виде двух независимых выражений. Это указыва-

ет на закономерность его локальных нарушений в некоторых точках энергетического диапазона. На практике это приводит к характерным изломам на графиках повторяемости. Считая эталонным энергетический спектр сейсмического процесса при строгом соответствии закону Гутенберга–Рихтера, можно говорить об искажении линейной формы первого. Такое же представление напрашивается и на основании более детального рассмотрения отмеченных выше моделей развития сейсмичности [Востриков, 1994; Соболев и др., 2009].

В качестве перспективного направления, проблема изучения формы энергетического спектра сейсмического процесса должна рассматриваться с учетом влияния на разрывообразование флюидной компоненты [Киссин, 2016; Kiryukhin et al., 2018]. Такая гипотетическая роль глубинных флюидов прослеживается как в квазипериодичности сейсмических активизаций, так и в чувствительности сейсмоактивной среды к удаленным воздействиям [Федотов и др., 2012; Федотов, Соломатин, 2015; Герус, Викулин, 2017; Тарасов, 2017; Соболев, 2018; Соболев и др., 2018; Федотов, Соломатин, 2019; Тарасов, Тарасова, 2019].

Таким образом, задача изучения энергетического спектра сейсмической активности является сложной, многоплановой и крайне важной. Не претендуя на полное ее решение, предлагаемая работа является продолжением в этом направлении планомерных полувекровых исследований свойств сейсмического процесса на основе метода долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) С.А. Федотова с целью его развития, повышения надежности и точности прогнозных оценок на его основе.

МОДЕЛЬ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Для настоящего исследования важно предположение об относительной независимости энергетического аспекта сейсмической активности и, как следствие, о потенциальной информативности его вариаций в дополнение к другим методам исследования. Результаты работы [Соломатин, 2011] позволяют сделать это предположение.

При аномалиях сейсмической активности, проявляющихся в различных частях ее энергетического диапазона и приводящих к нелинейности при представлении данных о величинах землетрясений соотношением Гутенберга–Рихтера, оценки значений наклона графика повторяемости становятся нестабильными. Эта нестабильность проявляется в большей степени при использовании метода [Аки, 1965], в несколько меньшей степени – при использовании регрессионных оценок на основе закона Гутенберга–Рих-

тера, и в еще меньшей степени – регрессионных оценок на основе метода [Соломатин, 2011] (см. выражения (6)–(8) соответственно). В результате, сравнение оценок на основе указанных выражений может в самом первом приближении использоваться для изучения свойств энергетического спектра сейсмического процесса.

МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ ОБОБЩЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КЛАССА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Важной идеей настоящей работы, позволяющей существенно упростить исследования, является введение строго подчиняющегося закону Гутенберга–Рихтера обобщенного энергетического класса землетрясений K_F . Его основой является энергетический класс K землетрясений, связанный с их магнитудным представлением M , выражением:

$$K = 1.5M + 4.6 [\text{Федотов, 1972}]. \quad (1)$$

Вместе с тем, принципиальной характеристикой K_F является то, что наклон графика повторяемости γ для K_F фиксирован в случае достаточно представительных выборок и строго равен 1/2. Согласно [Соломатин, 2011], при этом соблюдается строгий энергетический баланс спектра сейсмического процесса – равенство средних значений энергии, соответствующих различным участкам последнего.

Последовательное развитие идеи обобщенного энергетического класса в дальнейшем предполагает уход от существующего представления энергетической классификации землетрясений за счет переноса акцента в этой проблеме с аппаратно-методического аспекта их регистрации на аспект генерации землетрясений в сейсмическом процессе. Аппаратно-методические проблемы, как и подобные выражению (1) соотношения, естественно, при этом не исчезают, но ставятся в подчиненное положение.

Рассмотрим упрощенный, в значительной степени – концептуальный, алгоритм построения обобщенного энергетического класса. Пусть имеется выборка из N землетрясений с магнитудами M , которая охватывает достаточно большой временной интервал наблюдений в исследуемой области. На этом основании выборка считается полной для потенциально точного соответствия закону Гутенберга–Рихтера с учетом сбалансированности энергетического спектра представляемого ей сейсмического процесса. В этом случае предполагается, что ей можно поставить в соответствие выборку обобщенных энергетических классов K_F (в дальнейшем для упрощения индексных выражений – K), которая, будучи упоря-

доченной по убыванию, в точности удовлетворяет соотношению Гутенберга–Рихтера:

$$K_i = -\text{Lg}(i/N)/0.5 + K_{\min}, \quad (2)$$

где K_{\min} – некоторое значение, общее для всех выборок, используемых в работе.

Далее упорядоченные по убыванию значения магнитуд M заменяются на значения обобщенного энергетического класса K , рассчитанные в соответствии с (2):

$$M_{\max} \rightarrow K_1, \dots, M_i \rightarrow K_i, \dots, M_{\min} \rightarrow K_N \equiv K_{\min}. \quad (3)$$

При этом в выражении (2) на основе (1) принимается нормировка:

$$M = 6 \rightarrow K = 13.6. \quad (4)$$

Условный выбор в качестве нормировочной точки значения $M = 6$, как предполагается, оптимален для совмещения различных магнитудных шкал землетрясений.

Таким образом, предложенная процедура, с одной стороны, приводит к точному соответствию каждой из исследуемых выборок, взятых в целом, закону Гутенберга–Рихтера с фиксированным параметром $\gamma = 1/2$, с другой стороны, она сохраняет ранговые соотношения величин землетрясений в соответствующих этим выборкам временных рядах.

Особенно важно, что приведенная выше методика построения обобщенной энергетической шкалы величин землетрясений позволяет избежать проблемы с нелинейностью используемых шкал и проблемы пересчета между ними, а также повысить однородность данных.

Выбор минимального уровня магнитуд для всех выборок может в значительной мере повлиять на общий результат, и для наилучшей точности построения необходимо, чтобы общее значение $M_{\min}(K_{\min})$ было определено выше уровня надежной регистрации землетрясений. Для исследования этого аспекта в работе рассмотрены различные варианты его выбора $M_{\min}(K_{\min})$.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

С 1965 г. работы по методу ДССП традиционно охватывают наиболее активные участки сейсмогенной зоны Курило-Камчатской островной дуги и Северо-Восточной Японии [Федотов, 1965, 1968]. Этот район отличается очень высокой сейсмичностью. Здесь возникают сильнейшие землетрясения с $M = 9$, способные вызвать мощные катастрофические цунами, такие как цунами после Большого Камчатского землетрясения 4 ноября 1952 г. и цунами после землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г. Все это определяет практическую для данного региона важность продол-

жения и развития работ по сейсмическому мониторингу и прогнозу.

В настоящей работе район исследования существенно расширен, в него включена значительная часть неглубоких землетрясений других сейсмоактивных областей Тихоокеанского сейсмического пояса, а также Юго-Восточной Азии. Естественно при этом ожидать определенной неоднородности сейсмологического материала. Ниже этот аспект учитывается наряду с другим подобным аспектом – значительным промежутком времени, охваченным исследованием: в этот длительный, в несколько десятилетий, период происходило существенное развитие международной сети наблюдений, что вело к росту полноты получаемых на ее основе сейсмологических данных.

В работе использованы сейсмологические данные каталога ISC [International ..., 2020], удобного для доступа к большим выборкам, и каталога NEIC [USGS ..., 2020], удобного для предварительного просмотра выборок землетрясений. Одно из наиболее значимых изменений для этих каталогов, как показали предварительные оценки, относится к 1990-ым гг. Подобные изменения могут оказать существенное влияние на долгосрочные (несколько десятилетий) оценки при использовании широкого энергетического диапазона землетрясений, включающего наиболее слабые из них. Использование в расчетах наиболее слабых землетрясений, как показано ниже, имеет важное значение в рамках настоящей работы.

В Тихоокеанском регионе и районе Юго-Восточной Азии на основе указанных каталогов с 1997 г. были отобраны наиболее сильные ($M = 7.5-7.6$ и выше) – сильнейшие. К выделенному классу “сильнейших”, в соответствии с методом ДССП, относятся землетрясения с $M \geq 7.7$. Необходимо отметить, что в данной работе предполагается снижение границы землетрясений этого класса до указанного выше уровня $7.5-7.6$. Это сделано исходя из необходимости увеличения объема используемого материала и принципиально допустимо. Для работы были отобраны землетрясения, чьи очаги в первые семь суток после основного события уверенно выделялись афтершоками на фоне сейсмичности окружающих областей и при этом не перекрывались с афтершоковыми областями предыдущих сильнейших землетрясений. Было выделено таких 35 событий (табл. 1).

В качестве модели области очага каждого из выделенных сильнейших землетрясений в работе применен прямоугольник, охватывающий основную часть его афтершоков первых семи суток или их наибольший обособленный кластер. Последний вариант использовался для исключения вероятной сопутствующей главному событию ак-

тивизации в соседних сейсмодетекторных структурах.

За период 01.01.1964 г. по 31.12.2016 г. для 26-ти из указанных сильнейших событий количество предшествующих землетрясений с $K_{\min} = 10$ ($M_{\min} = 3.6$) в их очагах оказалось больше 50-ти – условного минимума¹. Для 23-х событий эти пространственно-временные выборки содержали более чем 50 землетрясений с $K_{\min} = 12$ ($M_{\min} = 4.9$) (см. табл. 1).

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ВАРИАЦИЙ СЕЙСМИЧНОСТИ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ПРОЦЕСС ПОДГОТОВКИ СИЛЬНЕЙШЕГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

С учетом большого временного интервала используемых данных и принципиального для настоящей работы включения в рассмотрение наиболее слабых событий, в точности линейному соотношению Гутенберга–Рихтера обобщенные энергетические классы K , построенные по указанной выше методике, удовлетворяют лишь в целом. В большей мере ему должны удовлетворять последние, наиболее полные данные, однако использованная при построении K процедура приводит к искажениям и в этом случае. Тем не менее, такие искажения в настоящей работе – допустимый и контролируемый компромисс, позволивший эффективно объединить в общий ряд временные выборки по очаговым областям всех сильнейших землетрясений.

Объединение выборок по рассматриваемым очагам сильнейших землетрясений в общий ряд, который, как предполагается, представляет наиболее устойчивые характеристики сейсмичности на завершающей стадии подготовки очага сильнейшего землетрясения, проводилось методом “наложения эпох” с нулевым отсчетом – сильнейшим землетрясением для каждой из рассматриваемых выборок:

$$t_q = t_{ij} - t_{0j} \forall i \in \{1 \dots N_j\} \text{ и } \forall j \in \{1 \dots L\} \text{ и при } q \rightarrow \{i, j\}, \quad (5)$$

где t_{ij} – время события i из временной выборки по области очага сильнейшего землетрясения j при общем числе таких событий N_j ; t_{0j} – время сильнейшего землетрясения j (см. табл. 1) при общем числе таких землетрясений L ; t_q – время события i из выборки j в общей временной шкале развития сильнейшего землетрясения при сведении всех значений t_{0j} к нулю.

¹ Указанный минимум размера используемых выборок в 50 событий обеспечивает приемлемую устойчивость оценок при достаточном количестве исследуемых областей очагов сильнейших землетрясений.

Таблица 1. Параметры использованных землетрясений класса “сильнейшие” 1997–2018 гг. и соответствующих им выборок предварающих событий 1964–2016 гг.

№ п/п	Дата, дд.мм.гггг	H , км	M	Координаты эпицентра (NEIC)		Количество событий в выборке
1	05.12.1997	33	7.8	162.035°E	54.841°N	112/54
2	29.11.1998	33	7.7	124.891°E	2.071°S	7/5
3	20.09.1999	33	7.7	120.982°E	23.772°N	15/10
4	16.11.2000	30	7.8	153.102°E	5.233°S	1087/729
5	13.01.2001	60	7.7	88.660°W	13.049°N	120/47
6	23.06.2001	33	8.4	73.641°W	16.265°S	118/81
7	08.09.2002	13	7.6	142.945°E	3.302°S	81/64
8	10.10.2002	10	7.6	134.297°E	1.757°S	250/168
9	22.01.2003	24	7.6	104.104°W	18.770°N	11/10
10	25.09.2003	27	8.2	143.910°E	41.815°N	168/112
11	17.11.2003	33	7.8	178.650°E	51.146°N	258/133
12	23.12.2004	10	8.1	161.345°E	49.312°S	0/0
13	26.12.2004	30	9.1	95.982°E	3.295°N	578/317
14	20.04.2006	22	7.6	167.089°E	60.949°N	38/22
15	03.05.2006	55	8.0	174.123°W	20.187°S	639/423
16	15.11.2006	10	8.3	153.266°E	46.592°N	663/351
17	01.04.2007	24	8.1	157.043°E	8.466°S	821/557
18	15.08.2007	39	8.0	76.603°W	13.386°S	99/49
19	19.03.2009	31	7.6	174.660°W	23.043°S	696/437
20	15.07.2009	12	7.8	166.562°E	45.762°S	29/20
21	29.09.2009	18	8.1	172.095°W	15.489°S	1597/826
22	07.10.2009	35	7.8	166.382°E	12.517°S	1015/664
23	27.02.2010	23	8.8	72.898°W	36.122°S	372/254
24	11.03.2011	29	9.1	142.373°E	38.297°N	2521/1183
25	06.07.2011	17	7.6	176.340°W	29.539°S	594/391
26	31.08.2012	28	7.6	126.638°E	10.811°N	79/24
27	28.10.2012	14	7.6	132.101°W	52.788°N	9/5
28	01.04.2014	25	8.2	70.769°W	19.610°S	156/79
29	19.04.2014	43	7.5	155.024°E	6.755°S	912/567
30	16.09.2015	22	8.3	71.674°W	31.573°S	515/267
31	13.11.2016	15	7.8	173.054°E	42.737°S	47/31
32	08.12.2016	40	7.8	161.327°E	10.681°S	516/329
33	17.07.2017	10	7.7	168.857°E	54.443°N	290/136
34	08.09.2017	47	8.2	93.899°W	15.022°N	188/87
35	23.01.2018	14	7.9	149.166°W	56.004°N	–/–

Примечание. Через слэш приведены: объем пространственно-временных выборок землетрясений с $K_{\min} = 10$ ($M_{\min} = 3.6$), предшествовавших каждому из рассмотренных главных событий в его очаговой области с 1964 г., и объем аналогичных выборок при $K_{\min} = 12$ ($M_{\min} = 4.9$); серым фоном выделены главные события, для которых пространственно-временные выборки содержат более чем 50 событий, удовлетворяющих первому критерию. Жирным шрифтом выделены события, выборки которых содержат более 50 землетрясений, удовлетворяющих второму критерию.

После указанного объединения выборка t_q ($t_q < 0$) упорядочивается по возрастанию и считается временной шкалой $T-T_0$ развития обобщенного сейсмического процесса, предшествовавшего сильнейшему событию в области его готовящегося очага. Изучаемые вариации сейсмичности отражаются парами значений $\{t_q; K_q\}$.

На рис. 1 представлены данные $\{t_q; K_q\}$ для пяти сильнейших землетрясений с наибольшим числом предварающих сейсмических событий. По объему эти данные составляют половину всего использованного в работе материала. Параметр K_q здесь представлен кумулятивным числом со-

бытий с $K_q \geq K_{\min}$. Область очагов этих пяти землетрясений относится к большому региону в южной части Тихого океана, расположенному между меридианами 153.1°E и 172.1°W (см. табл. 1, события 4, 21, 22, 29), а также включает землетрясение в Северо-Восточной Японии (событие 24).

Нормировка с учетом представительности данных для каждого из исследуемых участков в работе не проводилась – считается, что большое количество предшествующих событий позволяет лишь более уверенно выделить исследуемый эффект, существующий для всех выборок априори. Определение степени надежности полученного

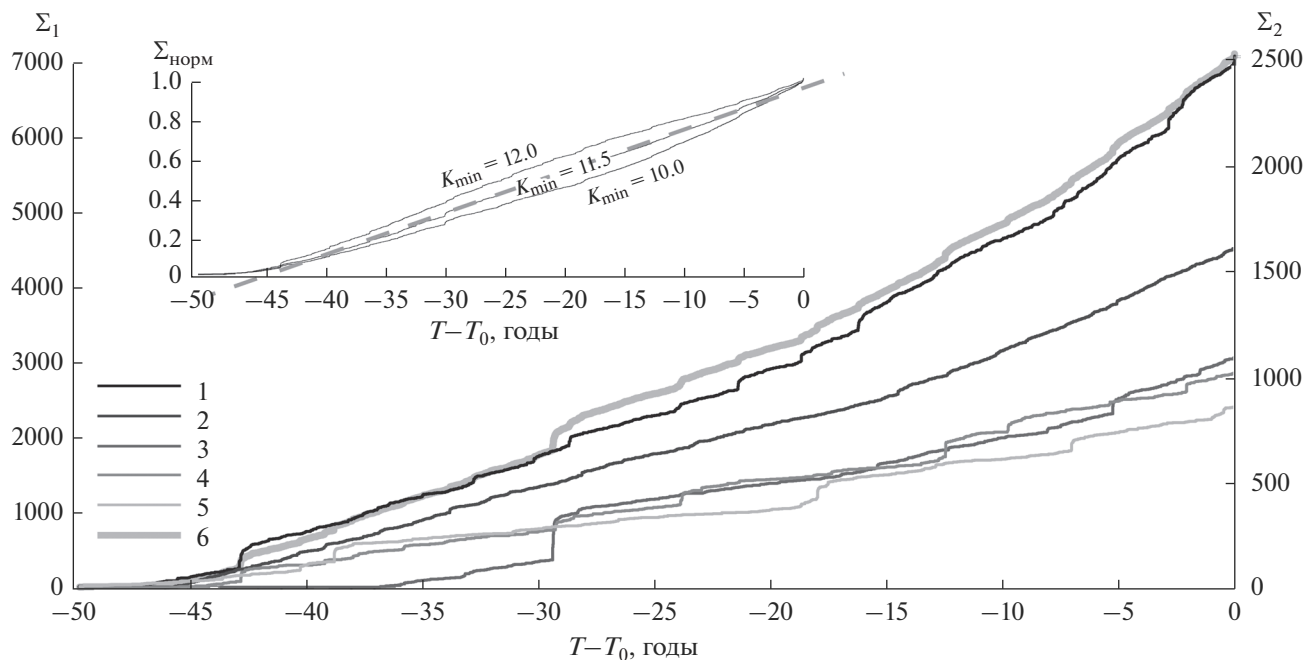


Рис. 1. Кумулятивные кривые числа событий по выборкам из очаговых областей сильнейших землетрясений (см. табл. 1) во временной шкале $T - T_0$. 1–5 – кумулятивные кривые для выборок №№ 24, 21, 4, 22, 29 соответственно (правая вертикальная ось Σ_2), $K_{\min} = 10.0$ ($M_{\min} = 3.6$); 6 – аналогичная, но общая для этих выборок кумулятивная кривая (левая вертикальная ось Σ_1). На врезке приведены нормированные по общему числу значений кумулятивные кривые по всем выборкам (см. табл. 1) с $K_{\min} = 10.0 - 12.0$ ($M_{\min} = 3.6 - 4.9$) и их аппроксимация прямой линией.

результата предполагается на основе других критериев.

Практически непрерывно увеличивающийся наклон кумулятивных кривых (см. рис. 1) при $K_{\min} = 10.0$ ($M_{\min} = 3.6$) отчасти отражает рост полноты данных мирового каталога в последние десятилетия. Этот же эффект, по-видимому, связан и с увеличением в среднем сейсмической активности на заключительной стадии сейсмического цикла [Федотов, 1965, 2005; Родкин, 2008; Федотов и др., 2011]. Монотонность роста полноты данных мировых каталогов, а также рассмотрение различных пороговых уровней позволяют далее сделать полезные выводы без дополнительного анализа возможности разделения этих аспектов.

Вид трех кумулятивных кривых с $K_{\min} = 10.0 - 12.0$ ($M_{\min} = 3.6 - 4.9$) (см. рис. 1, врезка) отражает зависимость их хода от величины нижнего уровня K_{\min} . При их построении использовались данные для всех 35-ти сильнейших событий. Учитывая относительную полноту данных при $K_{\min} = 12.0$ ($M_{\min} = 4.9$) за весь используемый интервал времени, а также удовлетворительную их полноту при $K_{\min} = 11.0$ ($M_{\min} = 4.3$), что показано ниже, различия формы всех трех кривых отражают изменения в графике повторяемости в период подготовки сильнейшего события. Это наиболее важный предварительный вывод.

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НАКЛОНА ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ

На следующем этапе исследования на основе пар значений $\{t_q; K_q\}$ был проведен расчет наклонов графиков повторяемости. Расчет проводился с использованием субвыборок заданного объема N : $\{t_i; K_i\} \dots \{t_{i+N-1}; K_{i+N-1}\}$ и его результаты относились к последней по времени точке.

Использованные методы расчета наклона графика повторяемости для каждой из субвыборок выглядят следующим образом:

$$\gamma_1 = \text{Lg}(e) / \left(\sum_{i=1}^N K_i / N - K_{\min} \right) \quad [\text{Аки}, 1965]; \quad (6)$$

$$\text{Lg}(i/N) \sim \gamma_2 (K_i - K_{\min}) \quad (7)$$

(закон Гутенберга–Рихтера);

$$K_i - \text{Lg}(E_{med}^i) \sim \gamma_3 (K_i - K_{\min}) \quad (8)$$

[Соломатин, 2011].

Два последних соотношения являются регрессионными, при этом в выражении (8) $E_{med}^i = \left(\sum_{n=1}^i E_n \right) / i$ – средняя энергия по энергетическому диапазону наиболее слабых в выборке землетрясений до значения K_i включительно, при

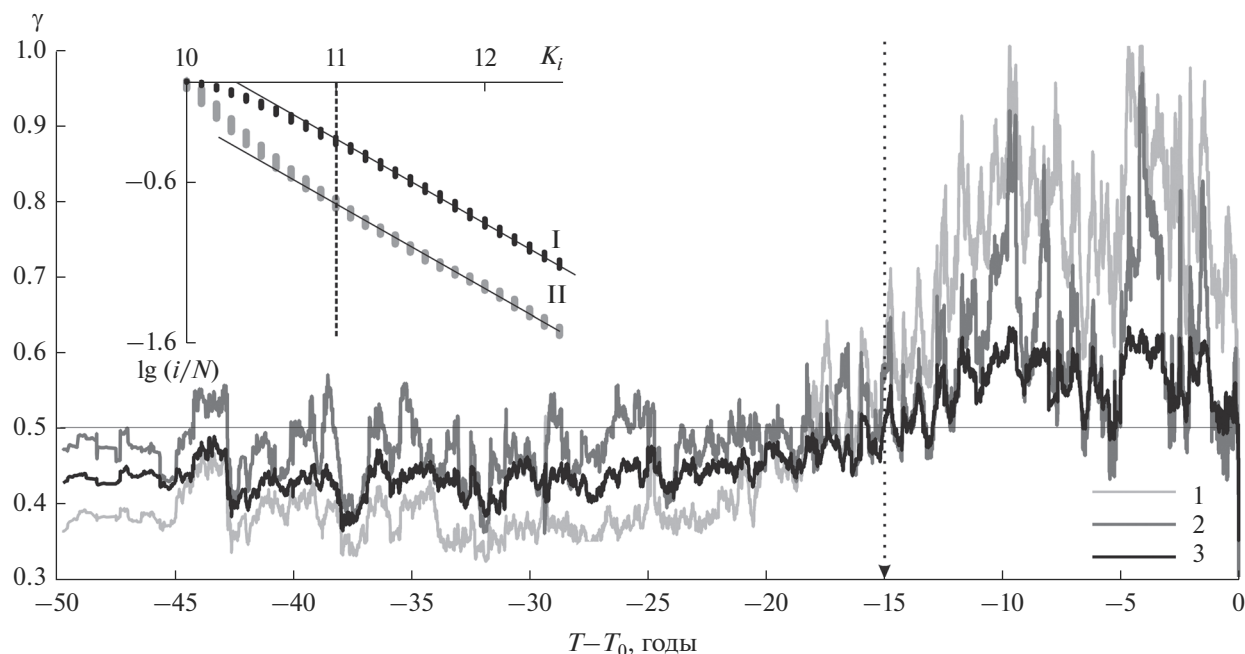


Рис. 2. Обобщенные вариации наклона графика повторяемости γ в очаге готовящегося сильнейшего события. 1–3 – вариации γ на основе выражений (6)–(8) соответственно. На врезке – фрагмент графиков повторяемости землетрясений на основе тех же данных: I – в интервале времени за 15 лет до сильнейшего события; II – то же в более ранний период. Параметры расчета указаны в тексте.

этом $E_n = 10^{K_n}$ – энергия, соответствующая энергетическому классу K_n .

Особенностью выражения (6) является то, что в нем наибольшее влияние на результат оказывают самые слабые события, и наклон в этой области наиболее значим в оценке γ .

Самыми сбалансированными и устойчивыми из представленных вариантов оценок величины γ являются результаты на основе регрессионного соотношения (8).

Регрессионное соотношение на основе закона Гутенберга–Рихтера (7) по устойчивости результатов к локальным вариациям в энергетическом спектре землетрясений занимает промежуточное положение [Соломатин, 2011]. Достаточно сильное влияние в этом последнем случае могут также оказывать отдельные, наиболее значимые по величине события.

ИЗУЧЕНИЕ ВАРИАЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПОДГОТОВКЕ СИЛЬНЕЙШЕГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

На рис. 2 представлен обобщенный ход величин наклона графика повторяемости γ в очаге готовящегося сильнейшего землетрясения за 50 лет

до него ($T - T_0 = -50-0$ лет). Его построение велось по методикам, представленным выше.

Величины γ для ветвей графика 1–3 рассчитаны на основе выражений (6)–(8), соответственно, с использованием скользящих субвыборок объемом $N = 151$. Общее число временных отсчетов при использованном ограничении $K_{\min} = 10$ ($M_{\min} = 3.6$) – 14292.

Выбор наиболее низкого порога K_{\min} при построении графиков на рис. 2 позволяет оценить уровень, обеспечивающий полноту используемых данных, а использованная величина объема субвыборок N обеспечивает высокую разрешающую способность оценок.

Пониженная оценка средней величины $\gamma = 0.35-0.45$ в начальной, при $T - T_0 < -15$ лет, части графиков рис. 2 (использованная при этом отметка -15 лет соответствует началу заключительной стадии сейсмического цикла согласно методу ДССП) с учетом заданного при построении шкалы K значения $\gamma = 1/2$ связана с неполнотой используемых данных в области слабых землетрясений в более ранние периоды сейсмологических наблюдений.

Согласно фрагменту графиков повторяемости (см. рис. 2, врезка), удовлетворительная полнота данных за весь исследуемый период обеспечивается при $K_{\min} = 11$ ($M_{\min} = 4.3$). Симметричная нелинейность обоих графиков объясняется, с одной

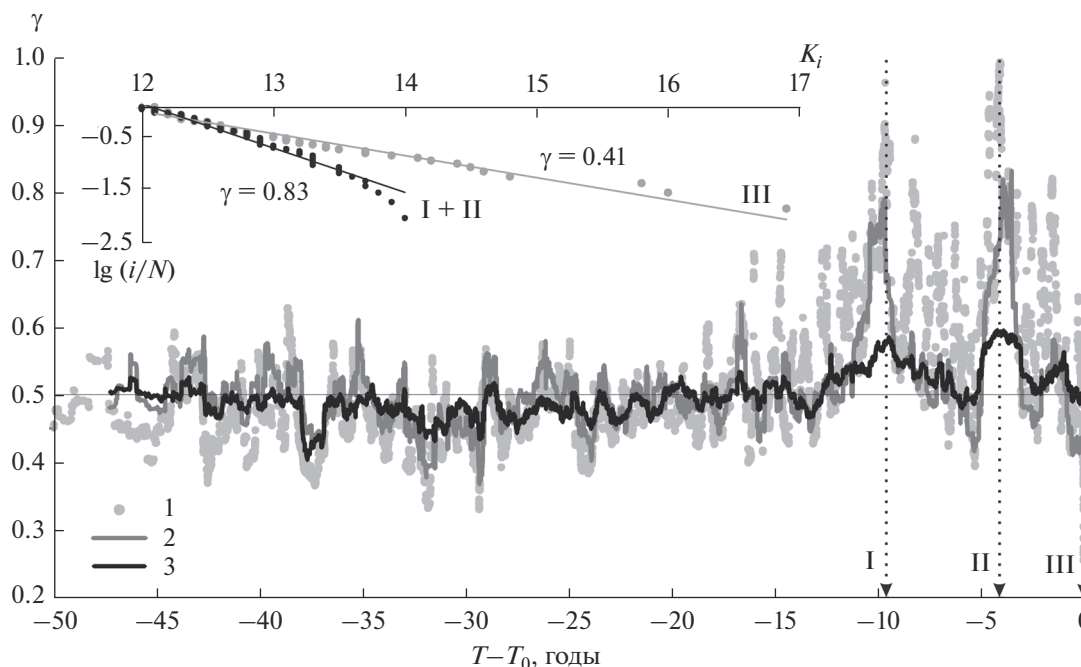


Рис. 3. Обобщенные вариации наклона графика повторяемости γ в очаге готовящегося сильнейшего события при $K_{\min} = 11$ ($M_{\min} = 4.3$) и $K_{\min} = 12$ ($M_{\min} = 4.9$).

1 – вариации γ для данных при $K_{\min} = 11$ на основе выражения (7); 2 – то же для данных при $K_{\min} = 12$; 3 – вариации γ на основе выражения (8), см. текст, при $K_{\min} = 12$. На врезке – графики повторяемости для данных во временных диапазонах вблизи пиковых величин I и II (данные при построении объединены) и на интервале снижения γ в форшоковый период – III.

стороны, неполнотой данных, преимущественно, в начальной части временной шкалы, с другой – упрощениями при построении обобщенного энергетического класса K .

Здесь важно отметить, что на всех трех линиях (см. рис. 2) наблюдается существенное повышение величин γ в периоды ΔT ($\Delta T = T_0 - T$) около 2–5 и 8–12 лет до момента главного события T_0 . Форшоковый, непосредственно предшествующий главному событию, интервал времени характеризуется резким уменьшением γ до среднего значения и даже ниже его, в полном соответствии с моделью [Соболев и др., 2009].

На рис. 3 представлены графики, построенные аналогичным образом для более полных данных – при $K_{\min} = 11$ и 12 (общее число временных отсчетов в 13701 и 7406 соответственно) на основе выражений (7) и (8).

Согласно [Соломатин, 2011], эти выражения отличаются слагаемым, определяемым величинами наиболее сильных землетрясений в выборках. Для приведения величин γ к единому уровню с учетом этого эффекта была введена соответствующая коррекция для выражения (8) равная +0.02.

Очевидно, что энергетические диапазоны землетрясений при ограничении $K_{\min} = 11$ –12 для целей определения наклона графика повторяемости

вполне приемлемы: все три графика вариаций величины γ вплоть до ее пиков вблизи отметок 10 лет имеют наклон, близкий к исходному (1/2) и не показывают заметных аномалий.

При сопоставлении рис. 2 и 3 с учетом свойств оценок на основе выражений (6)–(8) очевидно, что отмеченные выше значимые аномалии относятся, главным образом, к более слабым событиям.

Ход кривых графика повторяемости для объединенных данных вблизи временных отметок –10 лет ($\Delta T = 9.5$ –10.5 лет) и –4 года ($\Delta T = 3.7$ –4.4 года) (см. рис. 3, врезка) кроме высокой величины $\gamma \sim 0.8$ указывает также на дополнительное, нелинейное ограничение в районе максимальных для этих данных уровней классов $K = 13.5$ –14.0 ($M = 5.9$ –6.3).

Линейная аппроксимация графика повторяемости в форшоковый период ($\Delta T \leq 0.12$, см. рис. 3, врезка – ветвь графика III) с наклоном до значений $\gamma \sim 0.4$ включает в себя форшоки этого периода, по уровню близкие к сильнейшим событиям [Федотов и др., 1993]. На это указывают наибольшие по K значения, максимальное из которых $K = 16.9$, согласно (1), соответствует $M = 8.2$.

Важной проблемой, еще не решенной до этого момента, является доказательство того, что полученные результаты в их характерном аспекте –

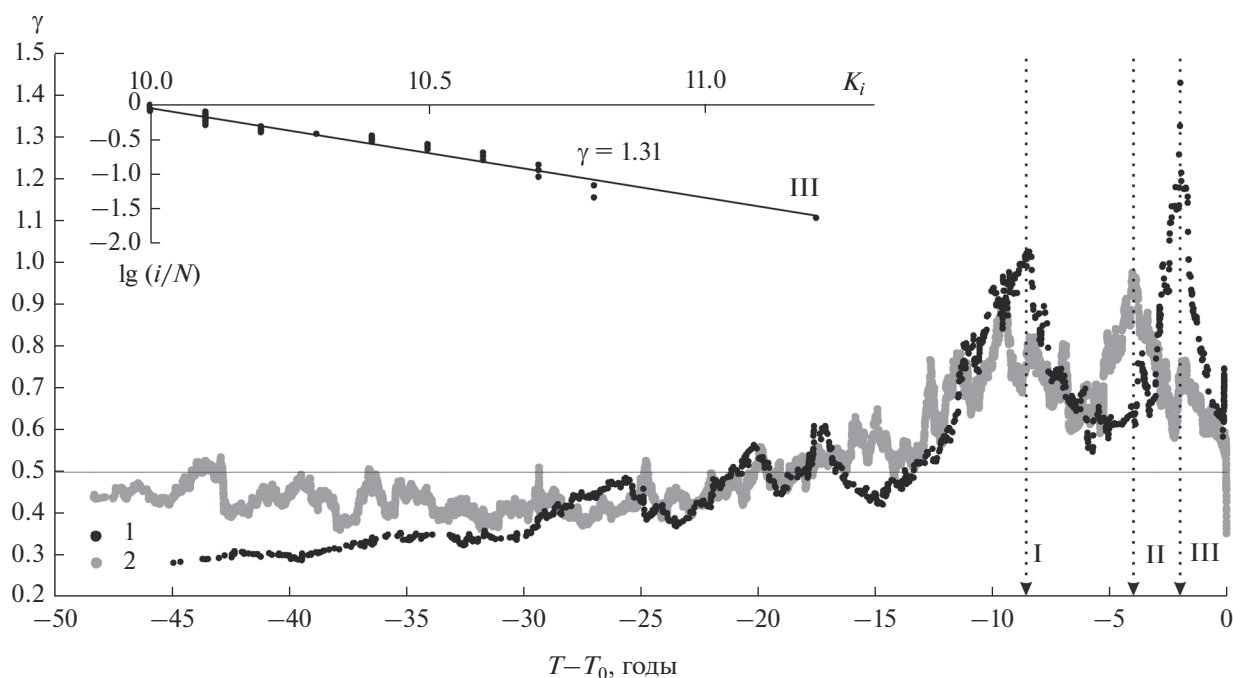


Рис. 4. Обобщенные вариации наклона графика повторяемости γ на основе выборок для очаговых областей сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги и прилегающих районов, а также землетрясений для очаговых областей других регионов.

1 – вариации параметра γ на основе выражения (6) для выборок по очагам сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги и прилегающих районов, $K_{\min} = 10$; 2 – то же по очагам других регионов, $K_{\min} = 11.5$. На врезке – график повторяемости для данных по очагам сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги и прилегающих районов в диапазоне $\Delta T = 1.5\text{--}2.8$ года (пик III).

пиковом характере аномалий хода параметра γ , не определяются особенностями отдельных выборок или сейсмоактивных районов, включающих ряд таких выборок.

На рис. 4 представлены вариации наклона графика повторяемости γ на основе двух разных выборок: 1) выборки для очаговых областей сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги и прилегающих районов (события №№ 1, 10, 16, 34, см. табл. 1); этот регион можно на основе исследований по методу ДССП считать однородным по сеймотектоническим условиям; 2) выборки на основе очаговых областей сильнейших, в основном – землетрясений южной части Тихого океана (события 4, 21, 22, 29, см. табл. 1); условно сюда же отнесена и область землетрясения Тохоку (событие 24, см. табл. 1), для которой имеющиеся данные не так детальны, как для первой выборки.

Графики на рис. 4 построены на основе выражения (6) – наиболее чувствительного в диапазоне слабых землетрясений. Уровни $K_{\min} = 10$ и $K_{\min} = 11$, а также длины выборок в скользящих интервалах расчетов ($N = 71$ и 151 соответственно) выбраны для максимально представительного отображения пиков параметра γ .

Очевидно существенное повышение наклонов графика повторяемости для очаговых зон Курило-Камчатской дуги и прилегающих районов с максимумами при $\Delta T = 8.6$ лет² (см. рис. 4, отметка I) и $\Delta T = 2$ года (отметка III). Для остальных сейсмоактивных регионов наиболее значимыми являются максимумы при $\Delta T = 9.6\text{--}10.2$ и 4 года (отметки I и II). Важно, что указанные выше пики при $\Delta T = 8.6$ и 2 года находят отражения и в этих данных. Это указывает на то, что в плане отмеченных аномалий Курило-Камчатская дуга и прилегающие районы не являются уникальными.

На врезке к рис. 4 приведен график повторяемости для пика III вблизи временного отсчета -2 года ($\Delta T = 1.5\text{--}2.8$ года). Как и на врезке к рис. 3, для указанных данных наклон графика повторяемости очень высок, но нелинейное ограничение в области максимальных значений K выражено несколько слабее, чем на рис. 3 и “компенсируется” событием с $K = 11.2$. Этот факт указывает на неустойчивость подобных ограничений для максимальных величин землетрясений и высокую вероятность последующей “компенсации” образу-

² В работе [Соломатин, 2014] период 8.5–8.6 выделен в качестве одного из основных для сейсмичности Курило-Камчатской дуги.

ющего дефицита отдельными, существенно более сильными событиями (форшоками, в том числе удаленными по времени). Это явление представляется очень важным и в дальнейшем требует более глубокого изучения.

В целом, все приведенные выше данные указывают на существование чередования наклонов графика повторяемости в пределах будущего очага сильнейшего землетрясения в процессе его подготовки. Значимо выделяются, по крайней мере, два максимума величины наклона графика повторяемости: во временных интервалах $\Delta T = 8-12$ и $2-5$ лет.

Наиболее вероятный фактор, определяющий процесс образования указанных пиков, — относительная активизация в диапазоне наиболее слабых землетрясений. Позже реализуется процесс выравнивания активности согласно закону Гутенберга—Рихтера в пределах всего энергетического диапазона сейсмических событий.

Можно заметить, что именно выделенные в настоящей работе и отмеченные выше пикообразные вариации в пределах энергетического спектра сейсмического процесса могут играть существенную роль в наблюдаемой его неоднородности. Такая неоднородность развития сейсмического процесса на III, заключительной стадии сейсмического цикла неоднократно отмечалась в работах по ДССП.

В то время как неоднородность сейсмического процесса, как правило, оказывает негативное влияние на устойчивость среднесрочно-краткосрочных прогнозов сейсмической опасности, указанные пики могут стать важным фактором среднесрочного уточнения сейсмической опасности. Кроме того, на основе дальнейшего слежения за уменьшением наклона графика повторяемости возможны и краткосрочные (первые месяцы) ее уточнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен важный аспект сейсмического процесса — изменения в распределении землетрясений по их энергиям в очагах готовящихся сильнейших ($M \geq 7.7$) землетрясений. Для описания этих изменений в статье предложено представление об энергетическом спектре сейсмического процесса. В самом первом приближении этот спектр определяется законом Гутенберга—Рихтера.

Для более полного описания энергетических характеристик сейсмичности использовано сопоставление результатов на основе трех методов определения наклона графика повторяемости, существенно отличающихся по степени представления различных энергетических диапазонов сейсмической активности.

Для устранения принципиальной нелинейности графика повторяемости, присущей практически всем энергетическим шкалам землетрясений, а также унификации данных, имеющихся для различных регионов, в работе предложено представление об обобщенном энергетическом классе K_F .

На основе реализации указанных идей для очагов сильнейших землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса и Юго-Восточной Азии показаны существенные пикообразные вариации наклона графика повторяемости γ , привязанные к некоторым фиксированным периодам подготовки сильнейшего землетрясения. Показано также существенное снижение величины этого параметра в форшоковый период.

В то же время, изменения в энергетическом спектре сейсмического процесса на практике имеют значительно более сложный характер. Поэтому необходимо развитие и других методов, в большей степени приспособленных к детальному представлению энергетических свойств сейсмичности.

Отмеченные в работе закономерности могут быть использованы непосредственно для повышения надежности долгосрочных прогнозов, а также для среднесрочно-краткосрочного уточнения уровня сейсмической опасности. В то же время, найденные закономерности предполагаются связанными с квазирегулярными периодичностями, поэтому высока вероятность “ложных” прогнозов на их основе. Эта проблема требует отдельного изучения.

В практическом плане пропуск сильнейшего землетрясения и неготовность к нему приводят к значительно худшим последствиям, чем “ложная” тревога при условии адекватности, комплексности и своевременности превентивных мер по обеспечению сейсмобезопасности. Важным примером здесь может служить катастрофическое по последствиям землетрясение Тохоку ($M = 9$), произошедшее 11.03.2011 г. Это землетрясение в точном соответствии со “сценарием форшоков” 09.03.2011 г. предварялось сильным, $M = 7.3$, событием-форшоком [Федотов и др., 2012], который, к сожалению, не был учтен. Этот пример хорошо подчеркивает важнейшую роль принципа сбалансированности текущих оценок уровня сейсмической опасности в ее долгосрочном и в среднесрочно-краткосрочном аспектах, с одной стороны, и необходимой степени готовности к ее возможным последствиям, с другой.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДССП

Самое активное внимание принципу сбалансированности сейсмического риска и готовности к его последствиям в одном из самых угрожаемых

в настоящее время регионов страны – на Камчатке – на протяжении многих лет уделял акад. С.А. Федотов. Благодаря его неустанной научной и организационной деятельности и при поддержке научных организаций, в том числе Института вулканологии ДВО РАН, ДВО РАН, РАН, а также РГ “Риск и безопасность”, МЧС, администрации Камчатского края и других заинтересованных организаций, на основе данных долгосрочного прогноза ДССП были развернуты государственной важности работы по обеспечению безопасности жителей экономического и культурного форпоста страны на Дальнем Востоке – г. Петропавловск-Камчатский. Эти работы в разное время поддерживались на самом высоком уровне: Советом Министров СССР, президентами РФ Д.А. Медведевым и В.В. Путиным. В результате масштабных строительных мероприятий к настоящему времени большая часть жилого фонда Краевого центра Камчатки имеет необходимую сейсмостойкость, в то время как по разным причинам она не была обеспечена в период наиболее массового строительства.

Тем не менее, до сих пор значительная часть существующего жилого фонда г. Петропавловск-Камчатский не имеет необходимого уровня сейсмической безопасности, поэтому научно-организаторские работы по обоснованию необходимых превентивных мер должны продолжаться. Уже, к сожалению, без Сергея Александровича Федотова.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены частично при поддержке Программы ДВО РАН Дальний Восток, проект № 18-5-002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Востриков Г.А.* Связь параметров графика повторяемости, сейсмического течения и очага землетрясения // Труды ГИН. Вып. 482. М.: ГИН РАН, 1994. 292 с.
- Герус А.И., Видулин А.В.* Геодинамические волны деформации в блоковой геосреде и их модельное представление в виде волн миграции сейсмической и вулканической активности // Материалы XX региональной научной конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога, 30–31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 110–113.
- Гусев А.А.* О реальности 56-летнего цикла и повышенной вероятности сильных землетрясений в Петропавловске-Камчатском в 2008–2011 гг. согласно лунной цикличности // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 55–65.
- Киссин И.Г.* Флюидный режим очага и области подготовки землетрясения // Физика Земли. 2016. № 5. С. 102–119.
- Могилев К.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
- Родкин М.В.* Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 66–77.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* О параметрах закона повторяемости землетрясений // Геофизика и физика взрыва. Избранные труды / Под ред. М.А. Садовского. М.: Наука, 1999. С. 266–269.
- Серафимова Ю.К., Широков В.А.* Прогнозирование сильных землетрясений, вулканических извержений и цунами для различных регионов Земли на основе изучения их связи с лунным приливом 18.6 г. и 22-летним Хейловским циклом солнечной активности // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений / Под ред. Е.И. Гордеева, В.Н. Чеброва. Владивосток: Новая книга, 2012. С. 305–328.
- Соболев Г.А.* Возникновение колебаний 11-часового периода после землетрясения Тохоку // Докл. АН. 2018. Т. 480. № 3. С. 348–352.
- Соболев Г.А., Арора Б., Смирнов В.Б. и др.* Прогностические аномалии сейсмического режима. Т. II. Западные Гималаи // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 23–36.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Акатова К.Н.* Временная и пространственная структура длиннопериодных колебаний после землетрясений // Физика Земли. 2018. № 3. С. 1–15.
- Соломатин А.В.* Закон повторяемости землетрясений и энергетический баланс сейсмического процесса // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 39. № 4. С. 39–48.
- Соломатин А.В.* Развитие теории и методологии долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги (С.А. Федотов) / Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Петропавловск-Камчатский, 2013. <http://www.dslib.net/geo-fizika/razvitie-teorii-i-metodologii-dolgosrochnogo-sejsmicheskogo-prognoza-dlja-kurilo.html>
- Соломатин А.В.* Исследование связи вулканической активности и сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона // Вулканология и сейсмология. 2014. № 1. С. 61–76.
- Тарасов Н.Т.* О влиянии солнечной активности на сейсмичность Земли // Материалы IV Всероссийской конференции с международным участием “Триггерные эффекты в геосистемах”, 6–9 июня 2017 г. / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2017. С. 356–365.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В.* Влияние на сейсмичность электромагнитных полей и взрывов, геодинамические последствия // Материалы V Международной конференции “Триггерные эффекты в геосистемах”, 4–7 июня 2019 г. / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: Изд-во “ТОРУС ПРЕСС”, 2019. С. 113–122. <https://doi.org/10.26006/IDG.2019.5.34102>
- Тихонов И.Н.* Обнаружение и картирование сейсмических затихий перед сильными землетрясениями Японии // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. С. 1–17.
- Федотов С.А.* О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Труды ИФЗ АН СССР. 1965. № 36. С. 66–93.
- Федотов С.А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.

- Федотов С.А. Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Афтершоки и область очага Средне-Курильского землетрясения 15.XI 2006 г., $M_s = 8.2$; долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2008—III 2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 3—23.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2010—VIII 2015 гг., достоверность предыдущих прогнозов и их применение // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 3—27.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2011—VIII 2016 гг.; вероятные место, время и развитие следующего сильнейшего землетрясения Камчатки с $M \geq 7.7$ // Вулканология и сейсмология. 2012. № 2. С. 3—26.
- Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013—VIII 2018 гг.; особенности сейсмичности дуги в период предшествовавших глубоких охотоморских землетрясений 2008, 2012 и 2013 гг. с $M = 7.7, 7.7$ и 8.3 // Вулканология и сейсмология. 2015. № 2. С. 3—19.
- Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на VI 2019—V 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017—V 2019 гг. Развитие и практическое применение метода ДССП // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 6—22.
- Федотов С.А., Чернышев С.Д., Чернышева Г.В., Викулин А.В. Уточнение границ очагов землетрясений с $M \geq 7.3/4$ свойств сейсмического цикла и долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги // Вулканология и сейсмология. 1980. № 6. С. 52—67.
- Федотов С.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С. Оценка сейсмической опасности землетрясений с $M \geq 6$, сопровождающих сильнейшие ($M = 8$) тихоокеанские землетрясения // Вулканология и сейсмология. 1993. № 6. С. 3—12.
- Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Пространственно-временные закономерности сейсмической и вулканической активности. Burgas: SWB, 2008. ISBN 978-9952-451-00-9. 304 с.
- Широков В.А. Влияние девятнадцатилетнего прилива на возникновение больших камчатских извержений и их долгосрочный прогноз // Геологические и географические данные о БТТИ, 1975—1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 164—170.
- Aki K. Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\lg N = a - bM$ and Its Confidence Limits // Bull. Earthq. Res. Ins. 1965. V. 43. P. 237—239.
- International Seismological Centre (2020), On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
- Kiryukhin A.V., Fedotov S.A., Solomatin A.V., Kiryukhin P.A. Geomechanical Interpretation of Seismicity on Kamchatka Shelf: Applications for Seismic Forecast and Hydrocarbon Exploration // Geomodel 2018 – 20th Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development. 2018. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802430>
- Ogata Y. Statistical Model for Standard Seismicity and Detection of Anomalies by Residual Analysis. Earthquake Hazard and Prediction: Time-Variable Earthquake Hazard / Ed. F. Evison // Tectonophysics. 1989. 169 (spec. sect.). P. 159—174.
- USGS Earthquake Hazards Program (2020). <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>
- Wyss M., Habermann R.E. Precursory Seismic Quiescence // Pageof. 1988. V. 126. P. 319—332.

The Energy Spectrum of the Seismic Process in the Application to the Long-Term Seismic Forecast and Mid- and The Short-Term Seismic Hazard Accuracy Improving

A. V. Solomatin*

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
bulv. Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

**e-mail: alf55@mail.ru*

The development of seismic process in the focal zones of the strongest ($M \sim 8$) earthquakes in the Pacific seismic belt and South-East Asia is analyzed. In order to improve the homogeneity of data related to different seismic active regions, a generalized energy class of earthquakes has been proposed. This idea is also a promising alternative to the existing method of energy classification of earthquakes. An important characteristic of the development of the focal zone of the strongest event is considered — the energy spectrum of the seismic process, the first approximation of which is considered the Gutenberg—Richter Law. The methods of its research are proposed and it was noted a significant peak-shaped increase in the slope of the earthquake recurrence graph in the interval of 5—10 years before the strongest event and its decrease immediately before it. The marked peak anomalies are presumably of a recurring, quasi-periodical nature, and the periods of their manifestation before the strongest event may differ in different regions. The obtained results can be used in the future both for improving the reliability of long-term seismic forecasts and for the mid- and short-term seismic hazard level accuracy improving.

Keywords: seismic process, Gutenberg—Richter Law, energy spectrum of seismic process, seismic forecast