

УДК 550.34, 551.24, 51-73

О СЕЙСМИЧЕСКОМ ПРОГНОЗЕ, СВЯЗИ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И КОНЦЕПЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПРЕДЕЛЕННОСТИ

© 2025 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 24.04.2024 г.

После доработки 08.08.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Рассмотрен в общем виде ряд проблем, решаемых в той или иной мере при прогнозе наиболее опасных — сильнейших землетрясений. В качестве важнейших из них представлены следующие: эффективность сейсмического прогноза на основе представления о сценариях — базовых закономерностях развития очагов сильнейших землетрясений; мониторинг развития таких сценариев на основе сейсмологических данных; моделирование связи сейсмических и геодинамических процессов, определяющих эти сценарии. Для решения последних двух проблем предложено использовать представления об энергетическом и динамическом спектрах сейсмической активности геосреды, а особенностью предлагаемого решения является введение математической концепции информационной определенности. В качестве примера использования предложенных методик в статье представлено обоснование гипотетического многолетнего колебательного движения при погружении океанической плиты в Камчатской зоне субдукции с периодом около 8.57 лет. Предполагается, что такие колебания в существенной мере определяют наиболее вероятные периоды возникновения региональных сильнейших землетрясений.

Ключевые слова: сейсмический прогноз, сейсмический мониторинг, спектр сейсмического процесса, геодинамическая модель, зона субдукции, нечеткие оценки, информационная определенность

DOI: 10.31857/S0203030625010055, EDN: HGNCWZ

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмичность в самом широком диапазоне масштабов является одним из наблюдаемых проявлений динамических процессов развития сложной, близкой к критическому состоянию сейсмоактивной геосреды. При этом в сейсмическом процессе отражаются, с одной стороны, собственная активность ее самых различных компонентов, с другой — ее активные отклики на внешние воздействия различной природы. Все это определяет существенную сложность изучения закономерностей развития геосреды на основе сейсмологических данных, в том числе и в важнейшем практическом

направлении — прогнозировании наиболее опасных — сильнейших землетрясений.

В то же время, геодинамические процессы на всех уровнях их иерархии в определенной степени инерционны и, как следствие, несмотря на многообразие сценариев развития, они, как и их отражение в сейсмическом и других процессах, в значительной степени предсказуемы.

Исходя из вышесказанного, проблему сейсмического прогноза нужно рассматривать не в соответствии с общим принципом отнесения землетрясений к критическим проявлениям в развитии геосреды, а на основе разделения периода подготовки его очага на длительный

предсказуемый сценарный интервал развития и относительно короткий интервал критического состояния некоторой эффективной для генерации главного события области. Именно на неопределенность исхода последнего этапа в идеальном случае должна распространяться вся неопределенность прогноза. Заметим, что на основе такого представления рационально предсказывать не столько само землетрясение, сколько критическое возрастание его вероятности.

На сценарном принципе построен метод долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП), представленный в трудах академика РАН С.А. Федотова [Федотов, 1965, 1968, 2005; и др.]. Сейсмический прогноз на основе метода ДССП предполагает в качестве оптимальной стратегии сочетание апробированного на протяжении уже почти шести десятилетий долгосрочного сценария — сейсмического цикла развития очагов сильнейших землетрясений с развитием других сценариев уточнения сейсмической опасности [Федотов и др., 2008, 2011; и др.].

Для оценки интервала критического повышения вероятности сильнейшего землетрясения в методе ДССП используется двухсуточный сценарий сильных ($M \geq 6$) форшоков, в четверти случаев предвещающих сильнейшие ($M \geq 7.7$) Тихоокеанские землетрясения [Федотов и др., 1993, 2005, 2012].

Проблема долгого отсутствия в методе ДССП среднесрочного сценария была решена в работе [Соломатин, 2021б], но в то же время, для создания полной системы изучения свойств сейсмического процесса и прогноза развития сильнейших землетрясений в настоящее время требуется построение методики сейсмического мониторинга более адекватной имеющимся представлениям, чем известные.

Потенциально задача сейсмического мониторинга могла бы решаться на основе развитых методик Epidemic Type Aftershock Sequences (ETAS) [Ogata, 1988, 1998; Baranov et al., 2019; и др.]. Однако в их основе лежит неоднозначная характеристика сейсмического процесса — уровень сейсмической активности.

Иной, на основе достаточно полного комплекса параметров A_{10} , A_{11} и D , подход к определению уровня активности сейсмического процесса используется в методе ДССП. Указанные

параметры отражают, соответственно, сейсмическую активность исследуемого участка сейсмогенной зоны в диапазоне относительно слабых ($K = 10-11$), средних (условно: $K = 11-12$) и наиболее сильных землетрясений (параметры A_{10} , A_{11} и D соответственно).

Важной характеристикой сейсмического процесса, связывающей в самом первом приближении параметры A_{10} , A_{11} и D , является основной параметр закона Гутенберга–Рихтера (ЗГР) — наклон графика повторяемости землетрясений. В то же время относительная независимость этих параметров [Федотов и др., 2008] приводит к идее более общих представлений о распределении величин сейсмических событий.

Такая идея в виде концепции энергетического баланса сейсмического процесса была предложена в работе [Соломатин, 2011], а в еще более общем виде, на основе представления об энергетическом спектре сейсмического процесса, успешно применена в статье [Соломатин, 2021б]. Тем не менее, даже такое, максимально общее — спектральное представление неэффективно в неизменном виде для построения детального сейсмического мониторинга. Решение этой проблемы в качестве математической концепции является одним из основных направлений настоящего исследования.

Необходимо заметить, что метод ДССП развивался на базе представлений о самых общих сценариях развития сейсмотектонического процесса в качестве наиболее адекватной основы совместного использования с прогнозными данными других методов, в частности М8 [Матвиенко, 1998]. В то же время, в случае построения детальных и комплексных сценариев, в том числе совместно с данными других геофизических методов наблюдений за состоянием геосреды [Gavrilov et al., 2022; и др.], согласование результатов разумно искать на основе общих представлений, что и определяет важность развития концепции отражения в сейсмическом процессе изменений динамических процессов в геосреде.

Нельзя не отметить, что это направление уже представлено авторитетными исследователями. В качестве наиболее характерных в отечественной литературе можно представить исследования Ю.Л. Ребецкого [Ребецкий и др., 2017]. Несмотря на теоретическую развитость используемых в таких исследованиях представлений

о связи геодинамики и механизма сейсмических очагов, исходный материал построения такой связи также не может быть основой детального мониторинга.

О важности развития в настоящее время концептуального подхода к решению сейсмологических задач

Учитывая, что предложенная работа посвящена решению ряда многолетних исследованных проблем сейсмологии, для лучшего понимания ее сути необходимо указать на ее поисковую, на уровне концепций, направленность.

Естественные пути доказательства полезности концептуальных исследований — доведение используемых в них гипотез либо до адекватного современным теоретическим представлениям уровня, либо — получение на их основе адекватного практического результата, в том числе и в качестве гипотетической основы новых теорий. Первый путь — традиционный, но при существующем разрыве между накопленным материалом наблюдений и современными теоретическими воззрениями представляется автору достаточно спорным. Второй путь представляет более естественное, “эволюционное” (а не “доказательное”) направление развития теоретических представлений. Автор является приверженцем второго подхода, а в качестве практического результата обычно, не исключая и этой статьи, использует построение сейсмического прогноза, проверяемого как ретроспективно, так и в реальном времени.

СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Сценарные представления, как непосредственные обобщения известных закономерностей, являются важным звеном, связывающим сейсмический прогноз с наблюдениями за развитием сейсмического процесса в активной геосреде, а в итоге — и динамических процессов, происходящих в ней. В методе ДССП сценарные представления основаны, с одной стороны, на закономерностях, определяющих в наиболее общем виде цикл развития очагов сильнейших ($M \geq 7.7$) землетрясений, а с другой — на детализации закономерностей их развития на III, заключительной стадии. Для очагов

землетрясений Курило-Камчатской дуги длительность сейсмического цикла составляет $T = 140 \pm 60$ лет, а заключительной стадии — 15–20 лет [Федотов, 1968, 2005; Федотов и др., 2008].

Сценарии, используемые в работах С.А. Федотова, а также в работе [Соломатин, 2021б], предназначены, в первую очередь, для построения долгосрочных, а также среднесрочных прогнозов с их последующим возможным краткосрочным сценарным уточнением. Вместе с тем, практическое применение метода ДССП предполагает также и фактор краткосрочной критической неопределенности в развитии очага, которая эффективно для практических задач моделируется сценарием форшоков [Федотов и др., 1993].

Важным направлением развития сценарного подхода к прогнозу землетрясений является концепция периодичности (квазипериодичности в общем случае) развития сейсмического процесса, обусловленной как факторами внешней природы [Широков, 1977; Широков, Серафимова, 2006; Гусев, 2008], так и свойствами самой геосреды [Хаин, Халилов, 2008; Федотов и др., 2011; Соломатин, 2014, 2021б]. Важно, что эта концепция потенциально предполагает и гипотезу о квазипериодичности возникновения временных интервалов критического развития очагов сильнейших землетрясений. Такие интервалы проявляются существенно (на годы) удаленными от основного события сейсмическими активизациями — нереализованными в прошлом сильнейшими событиями — и являются важным фактором для повышения эффективности сейсмических прогнозов.

Здесь необходимо отметить, что концепция квазипериодичности геодинамических процессов, используемая автором на основе результатов [Федотов и др., 2011; Соломатин, 2014, 2021б], предполагает очень высокую (с отклонением в первые проценты), учитывая сложность свойств геосреды, точность определения периодов.

В целом, развиваемую на основе метода ДССП концепцию сценарного подхода к прогнозу землетрясений характеризуют следующие особенности:

— максимальное внимание в методе ДССП уделяется наиболее опасным — сильнейшим —

землетрясениям, определение вероятных мест и закономерностей развития очагов которых является первоочередной задачей, при этом такие закономерности в существенной мере определяют весь региональный сейсмический процесс;

— метод ДССП предполагает последовательное согласование долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного, на основе непосредственных форшоков, сценариев развития очагов сильнейших землетрясений;

— в общем случае уточнения сейсмической опасности потенциальных очагов сильнейших землетрясений на основе краткосрочных сценариев важной задачей является определение соответствующих этим сценариям критических временных интервалов.

МЕТОДИКА ДЕТАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Широкое разнообразие геодинамических процессов, а также предполагаемый ускоренный характер их протекания при приближении к критической стадии развития очага землетрясения требуют разработки методик сейсмического мониторинга более развитых, чем существующие. В настоящей статье в качестве основы такой методики было выбрано представление об энергетическом и динамических спектрах сейсмического процесса, которые, как предполагается, в максимальной по отношению к обычным представлениям о сейсмическом потоке степени отражают динамику развития геосреды.

С учетом иерархичности изучаемых процессов предлагаемая методика мониторинга должна быть применима для широкого диапазона временных представлений: от обзорных — долгосрочных, до наиболее детальных — пособытийных. Этому условию удовлетворяют кумулятивные временные ряды, оптимальным образом выделяющие значимые тренды используемых параметров в любом временном масштабе.

Все это, а также идея о предпочтительности вероятностно-информационного представления сейсмологических данных легли в основу предлагаемой ниже методики.

Рассмотрим временной ряд значений энергетических классов землетрясений [Федотов,

1972] — $K(t)$, чьи гипоцентры относятся к некоторой достаточно однородной сейсмогенной области. Представим величины этих землетрясений в шкале обобщенного энергетического класса Федотова — K^F [Соломатин, 2021б, 2022б]. Тогда в предельном, невозмущенном и энергетически равновесном [Соломатин, 2011] состоянии сейсмоактивной среды общая выборка значений параметра $K^F(t)$ в максимальной степени подчиняется ЗГР с величиной наклона графика повторяемости $\gamma_0 = 1/2$.

В соответствии с ЗГР для указанной выборки, представленной в виде упорядоченных величин K^F с минимальным значением $K_{\min}^F$, выполняется соотношение:

$$\lg(1 - P(K_i^F)) = -\gamma_0 \cdot (K_i^F - K_{\min}^F) \quad (1)$$

или:

$$P(K_i) = 1 - 1/(E_i/E_{\min})^{\gamma_0}, \quad (2)$$

где $E = 10^K$ — сейсмическая энергия [Федотов, 1972].

На практике функция распределения $P(K)$ может быть построена на основе упорядоченных нормированных рангов значений параметра K^F , при этом величины $P(K)$, а следовательно и величины $1/(E/E_{\min})^{\gamma_0} = 1/(E/E_{\min})^{1/2}$, распределены равномерно в диапазоне $[0; 1]$ ¹. Таким образом, величины землетрясений в случае гипотетически невозмущенного сейсмического процесса представлены в Р-шкале плоским спектром. Заметим, что выражение $S = E^{1/2}$ определяет условные деформации по Беньофу, поэтому равномерно распределенными можно считать обратные этим деформациям величины $S_{\min}/S$ [Соломатин, 2022б].

Для дальнейшего важно, что параметр P в его наиболее общем виде, условно $P(X)$, имеет дополнительный смысл оценки возможности отнесения события X к нечеткому классу больших его значений².

Для представления особенностей Р-шкалы в случае сейсмологических данных используем

¹ В (1) и (2), а также в дальнейшем вместо закрытого интервала $[0; 1]$ приближенно применяется открытый $]0; 1[$.

² Переход от конкретных величин к их нечетким оценкам вполне продуктивен, в частности, в теории возможностей или при логистическом регрессионном анализе.

выражение уже для произвольной величины γ [Aki, 1965]:

$$\gamma = -\lg(e) / (K_{\text{med}}^F - K_{\text{min}}^F). \quad (3)$$

Взяв за основу выражения (1) и (3), приняв в качестве предела средних оценок K_{med}^F отдельные значения последовательности — K^F , а также введя параметр $g = 1/\gamma$ и перейдя от десятичного к натуральному логарифму, построим точечные оценки:

$$g(K^F)/g_0 = -\ln(P(K^F)), \quad (4)$$

$$g'(K^F)/g_0 = -\ln(1 - P(K^F)), \quad (5)$$

где $g_0 = 1/\gamma_0 = 2$.

Заметим, что в выражениях (4) и (5) при определении вариаций коэффициента g/g_0 больший вес имеют наиболее слабые, а коэффициента g'/g_0 — наиболее сильные события. Такое представление о двух параметрах, описывающих вариации спектра величин событий сейсмического процесса, в полной мере согласуется с представлением о характере энергетического баланса последнего [Соломатин, 2011].

С учетом тождественных замен $f(K^F) \equiv f(K^F(t)) \equiv f(t)$ используем оценки на основе выражений (4) и (5) для построения следующих временных рядов:

$$C(t) = \sum g(t)/g_0 = -\sum \ln(P(t)) \text{ и } C'(t) = \sum g'(t)/g_0 = -\sum \ln(1 - P(t)). \quad (6)$$

Эти ряды, на основе расширения представлений ЗГР, отражают в кумулятивном виде отклонения спектра величин событий сейсмического процесса от базового.

Математический смысл логарифмического представления таких отклонений будет пояснен дальше, сейчас же, рассматривая преобразования $\ln(P)$ и $\ln(1 - P)$ в качестве нелинейных фильтров для асимметричного выделения вариаций Р-спектра в двух разных частях его диапазона, в качестве симметричной альтернативы можно ввести ряды:

$$C^0(t) = \sum (P(t) - 0.5) \text{ и } C'^0(t) = \sum (0.5 - P(t)) = -C^0(t), \quad (7)$$

где $\overline{P(t)} = 0.5$.

Ряды (7) отражают в интегральном виде текущую биполярную определенность преобладания событий верхней или нижней частей Р-спектра. Поскольку параметр P может измеряться в шансах, то условно, в тех же единицах, но кумулятивно и по отношению среднему уровню измеряются и параметры $C(t)$.

Характерной особенностью геодинамических процессов является дискретные переходы между относительно стабильными состояниями геосреды на различных уровнях ее иерархической структуры. Эти переходы, определяемые как внутренними, так и внешними процессами, на практике обычно отображаются в качестве ступенчатых кумулятивных графиков степеней энергии последовательности событий, а именно: $\Sigma E^0(t)$, $\Sigma E^{1/2}(t)$, $\Sigma E(t)$. Примеры содержательной интерпретации рядов $\Sigma E(t)$ представлены в [Федотов и др., 1987, 2011].

Учитывая вышесказанное, обычно используемый в сейсмологии список кумулятивных рядов можно дополнить рядом $\Sigma E^{-1/2}(t)$, эквивалентным ряду $\Sigma P(t)$. Более того, все эти степенные ряды можно дополнить еще и рядами (6) на основе логарифмирования. Таким образом, общий смысл построения всех указанных рядов — выделение в качестве фильтров определенных особенностей сейсмического процесса. В результате возникает идея построения и других подобных фильтров в наибольшей степени отражающих связь вариаций характеристик сейсмического процесса и вариаций соответствующих им геодинамических условий.

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К МОНИТОРИНГУ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА. ИНФОРМАЦИОННАЯ ОПРЕДЕЛЕННОСТЬ

Несмотря на простоту идеи подбора фильтра, необходимого для отображения того или иного аспекта геодинамических условий на основе представлений о “естественных” сейсмологических параметрах, этот подход вряд ли можно считать достаточно общим по сравнению с информационным подходом.

Для начала рассмотрим информационный аспект использования Р-параметра, введенного выше на основе энергетического класса K , в общем виде $P(X)$. Пусть рассматриваемая

выборка наблюдаемого параметра X имеет объем N . Построим следующую функцию плотности распределения:

$$U(X) = 2 \cdot P(X)/N = 2 \cdot P(X) \cdot Q(P). \quad (8)$$

Здесь учтено, что $\overline{P(X)} = 0.5$ и $Q(P)$ — детерминированное, с нулевой информационной составляющей, распределение: $Q(P) \equiv Q(P(X)) \equiv Q(X) = 1/N$.

Для каждого из значений X выражение (8) определяет нормированную вероятность того, что оно относится к классу больших ($P(X) \rightarrow 1$ с учетом определения $P(X)$).

Построим дивергенцию Кульбака–Лейблера (ДКЛ) для следующих распределений: оцениваемого — $U(X)$ и эталонного — $Q(X)$:

$$D_0 = \sum Q(X) \cdot \ln[Q(X)/(2 \cdot P(X) \cdot Q(X))] \quad (9)$$

или с учетом

$$1/N \cdot \sum \ln(P(X)) = \overline{\ln(P(X))} = -1 :$$

$$D_0 = -\ln(2) + 1. \quad (10)$$

Перейдем к временному аспекту задачи, построив ненормированную — кумулятивную по времени за вычетом среднего оценку ДКЛ:

$$D(t) = \sum (\ln(Q(t) / (2 \cdot P(t) \cdot Q(t)) - D_0)), \quad (11)$$

тогда:

$$D(t) = -\sum (\ln(P(t)) + 1). \quad (12)$$

Таким образом, информационный вклад, вносимый параметром P , отражается мерой Хартли, что вполне ожидаемо.

Сопряженный для (12) ряд:

$$D'(t) = -\sum (\ln(1 - P(t)) + 1). \quad (13)$$

Система выражений (12) и (13) эквивалентна системе (6). Таким образом, представленный выше точечный мониторинг на основе расширенных представлений ЗГР эквивалентен информационной модели мониторинга вариаций энергетического спектра.

Для дальнейшего важно, что в случае сейсмотектонического процесса информационные вклады отдельных событий в выражениях (12) и (13) в общем случае не являются полностью случайными, а отражают в кумулятивном виде

текущие, вполне закономерные переходы между его состояниями. В качестве важной характеристики таких переходов предлагается на основе выражений (12) и (13) ввести концепцию их информационной определенности. Сказанное выше условно относится и к выражениям (7), которые являются дополнительным гипотетическим представлением о линейном в Р-шкале вкладе сейсмических событий в аналогичную информационную определенность, но на основе аддитивного, а не мультипликативного принципа³.

Достоинства вводимой таким образом математической концепции заключаются, во-первых, в существенном обобщении наблюдений статистически устойчивыми ранговыми соотношениями, во-вторых — в удобстве построения на основе таких наблюдений информационно-вероятностных моделей.

Также необходимо заметить, что существенно обобщенная оценка информационной определенности вариаций сейсмического процесса не является единственно возможным результатом мониторинга на ее основе. В частности, конкретные оценки для предварительно выделенных на ее основе характерных интервалов времени могут быть вычислены дополнительно.

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ Р-ПАРАМЕТРОВ

Рассмотрим некоторую однородную сейсмоактивную область. С учетом параметра $P^K(t)$, отражающего нечеткую оценку величины очередного события $K(t)$ в этой области, и параметра $P^T(t)$, отражающего такую же оценку уверенности в малости интервала между наблюдаемым и предыдущим событиями в этой же области, построим временной ряд:

³Условно можно говорить о спектре выражений для построения Р-шкалы на основе интервала между представлениями об аддитивном и мультипликативном принципах, аналогично тому, как первоначальное представление об энтропии осложнено в настоящее время целым рядом других представлений, в частности — спектром энтропий Реньи или Тсаллиса. Но это сильно усложняет задачу, либо переводя ее в существенно математическую плоскость, либо требуя построения рассматриваемой концепции на значительно более высоком уровне представлений о свойствах анализируемых данных.

$$P^A(t) = 1 - \left((1 - P^K(t)) \cdot (1 - P^T(t)) \right)^{0.3}, \quad (14)$$

где степень 0.3 выбрана достаточно произвольно и служит для удовлетворительного приближения функции распределения произведения Р-параметров к линейному виду.

Кумулятивная зависимость:

$$C^A(t) = \sum (P^A(t) - P^A_{\text{med}}) \quad (15)$$

по типу рядов (7) определяет вариации информационной определенности высокой сейсмической активности в равной степени как на основе $P^K(t)$, так и на основе $P^T(t)$.

Аналогично можно определить эти вариации в шкале информационной определенности по типу выражения (12), но с использованием десятичных логарифмов:

$$D^A(t) = -\sum \left(\lg(P^A(t)) - \overline{\lg(P^A(t))} \right). \quad (16)$$

ПОСТРОЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДЕТАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОСРЕДЫ

Результаты работы [Соломатин, 2014] указали на связь на уровне квазипериодичностей вулканической и сейсмической активности не только в Камчатском сегменте Курило-Камчатской дуги, но и во всем регионе. Этот факт позволяет предположить поступательно-колебательный характер в региональном масштабе погружающейся плиты как одной из наиболее вероятных причин такой связи.

Для проверки соответствия этой геодинамической концепции сейсмологическим данным далее предложена определенная концепция связи характеристик сейсмического процесса и геодинамических условий в зоне субдукции. Хотя полученные в результате этого анализа выводы не претендуют на полноту, сама успешность такого обоснования может служить весомым аргументом в пользу перспективности предлагаемого направления мониторинга вариаций геодинамики сейсмоактивной среды на основе сейсмических данных.

Выделим в качестве наиболее важных следующие два фактора геодинамического процесса в зоне субдукции: сброс и перераспределение напряжений. Отметим, что первому из них в большей мере отвечают сильные сейсмические события, а второму — фоновые, слабые⁴. На основе такого представления можно предложить следующую модель связи между свойствами сейсмического процесса в некоторой области зоны субдукции, заданной в виде контакта двух бортов разрыва, и геодинамическими условиями в ней: аномально большое количество сильных событий в этой области несет информацию об относительном преобладании в ней тангенциальных напряжений, а высокая активность в диапазоне фоновых событий — нормальных напряжений.

В качестве рабочего материала в статье использован региональный каталог землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН Камчатского участка сейсмогенной зоны в диапазоне географических координат: 49–55° с. ш. и 153–163° в. д. Для построения выборки сейсмических событий в качестве минимального значения энергетических классов этого каталога использовалась величина $K_S = 8.5$, обеспечивающая ее достаточную полноту.

Учитывая влияние на геодинамику региона сильнейшего глубокого Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г., данные были ограничены периодом 2015–2023 гг. Также из рассмотрения исключен 3-суточный интервал сейсмической активизации, связанный с сильным ($M = 7.5$) землетрясением, произошедшим в задуговой области 25 марта 2020 г., и отражающим процессы собственно в зоне субдукции скорее косвенным образом.

Данные о сейсмических событиях полученной таким образом выборки были разбиты по глубинам гипоцентров на два диапазона с границей на глубине $H = 100$ км.

Для определения характера воздействия на сейсмический процесс вариаций нормального (N) напряжения в соответствии с введенной гипотезой была выбрана зависимость (16),

⁴ Можно отметить чрезвычайную простоту постановки в терминах нечетких оценок сложных в традиционном для сейсмологии параметрическом представлении задач.

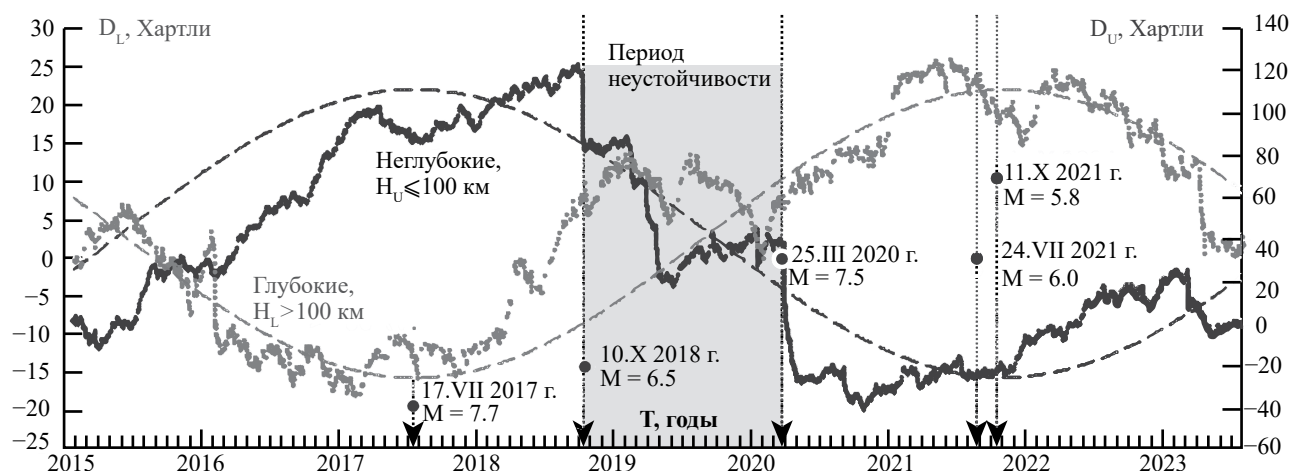


Рис. 1. Вариации информационной определенности на основе выражения (17) для неглубоких — $D_U(t)$ (черные точки) и глубоких — $D_L(t)$ (серые точки) землетрясений Камчатского участка сейсмогенной зоны. Пунктирные линии — аппроксимации зависимостей D гармонической частью зависимости (19) — функцией $F_G(t)$ с периодом $T = 8.57$ лет и экстремумом в точке 17.VII 2017 г. Приведены также характерные региональные события за период с 2015 г.

которая выделяет минимальную сейсмическую активность:

$$D_N(t) = -\Sigma((\lg(P^A(t)) - \overline{\lg(P^A(t))}) \quad (17)$$

Аналогично для отображения преобладания воздействия вариаций тангенциальных (Т) напряжений исследовался ряд на основе выражений (12) и (13):

$$D_T(t) = -\Sigma(\lg(1 - P^K(t)) - \lg(P^K(t))), \quad (18)$$

выделяющий вклад в энергетический спектр наиболее сильных событий по отношению к вкладу наиболее слабых.

Графики на рис. 1, построенные на основе выражения (17), указывают на различия в знаках вариаций параметра $D_N(t)$ для глубоких (L) и неглубоких (U) событий, что вполне согласуется с введенной моделью колебательных движений погружающейся океанической плиты вокруг достаточно глубокой оси. При этом в исследуемый период кумулятивные вариации нормальных напряжений для каждого из выделенных диапазонов глубин гипоцентров вполне удовлетворительно описываются зависимостью на основе общей гармонической функции $F_G(t) = \pm \cos(2 \cdot \pi \cdot (t - t_0)/T)$ с периодом T , близким к 9-ти годам.

Полный вид зависимости $N(t) \sim D_N(t)$ можно записать в мультипликативной форме на

основе введения некоторой модулирующей функции $A_M(t)$:

$$\begin{aligned} N(t) &= A_M(t) \cdot F_G(t) = \\ &= A_M(t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot (t - t_0)/T). \end{aligned} \quad (19)$$

Логично попытаться на основе предлагаемой модели объяснить периодичности в диапазоне $T = 8.40 - 9.12$ лет, выявленные в геодинамическом развитии региона [Соломатин, 2014]. Достаточно хорошо для этого подходит период $T = 8.57^5$ лет. В качестве нулевой точки t_0 условно может быть принята дата сильнейшего Ближне-Алеутского землетрясения 17 июля 2017 г. Это последнее из зарегистрированных по настоящее время землетрясений класса “сильнейшие”, в существенной мере связанное с региональным сейсмическим процессом [Федотов, Соломатин, 2019].

Как показано на рис. 1, подобное выражение (19) с использованием указанных выше значений периода и нулевой точки вполне удовлетворительно представляет гармонические колебания, описываемые в идеальном виде функцией $F_G(t)$. При этом с учетом интегрального вида кривых (17) экстремальные точки

⁵ Точное задание тестируемого периода T значением 8.57 объясняется тем, что он является кратным к периоду 2.86 лет или 1044 ± 15 сут. Именно в таком интервале наблюдается удаленная по времени повышенная активность перед наибольшими ($M = 8.0$ и выше) землетрясениями региона [Соломатин, 2022a].

этой функции соответствуют гипотетическим минимальным эффективным нормальным напряжениям.

На рис. 1 показан всего один период вариаций ряда $N(t)$, что для обоснования регулярности колебательных движений в виде (19) недостаточно, при этом аналогичный анализ всех данных сильно осложнен влиянием, в частности, Охотоморского землетрясения. Но поскольку в оцениваемой концепции предполагается лишь квазипериодичность $N(t)$ и монотонность связи $N(t) \sim D_N(t)$, относительно полный анализ вполне может быть ограничен сравнением экстремумов зависимости $F_G(t)$ и моментов сильнейших региональных землетрясений.

Для такого анализа было отобрано 14 сильнейших землетрясений с 1841 г. в границах протяженного участка сейсмогенной зоны, включающего стык Курило-Камчатской и Алеутской дуг: от очага Ближне-Алеутского землетрясения 17.VII 2017 г. с $M = 7.7$ в районе о-вов Беринга и Медный до очага землетрясения 1.V 1915 г. с $M = 7.8$ в районе группы о-вов Онекотан — Шиашкотан (табл. 1).

Строка 13 в таблице соответствует прогнозу 2021 г. на основе сценарного подхода высокой (на уровне 30% на 3-летний период) опасности сильнейшего землетрясения в районе острова Парамушир — юг Камчатки [Соломатин, 2021a, 2022a] и гипотетически заполняющего пропуск в области прошлого экстремума $F_G(t)$.

Результаты сравнения времен экстремумов t_e зависимости $F_G(t)$ и моментов землетрясений t_E в виде отклонений $\Delta t_E = t_E - t_e$ представлены в таблице. Для анализа этих отклонений строки упорядочены и сгруппированы по абсолютной величине Δt_E , что отражено в последних столбцах. Серым фоном выделены данные для наиболее глубоких ($H \sim 500$ км), а жирным шрифтом — для наиболее сильных ($M \geq 8.3$) событий.

Для демонстрации относительной близости гипотетических величин нормальных напряжений в момент землетрясений с такими же гипотетическими экстремальными значениями приведены также значения $F_G(t_E)$ (см. табл. 1).

Учитывая представление о сильном влиянии на конкретное время сильнейших

землетрясений лунных приливов (в частности, интервалы между близкими парами сильнейших Курильских землетрясений: 7.IX 1918 г. — 8.XI 1918 г. и 15.XI 2006 г. — 13.I 2007 г., равные 62 и 59 сут соответственно, близки к удвоенным периодам лунного месяца — 29.53 сут), в табл. 1 представлен второй, уточненный на среднюю длительность лунного месяца вариант определения нулевой точки для построения функции $F_G(t)$, а именно: $t'_0 = t_0 + 0.081$ (в годах) или конкретная дата t'_0 : 15.VIII 2017 г.

Анализ отклонений Δt_E (см. табл. 1) указывает на вполне определенные закономерности. Прежде всего, 11 из 15 представленных событий с учетом поправки к t_0 в 0.081 года имеют отклонения Δt_E в диапазоне около полугода. Более того, разброс Δt_E в каждую из сторон для группы из 7-ми событий определен крайне узкими границами: 0.50–0.55 года. Для группы 4-х других событий полный разброс в половину меньше: 0.26–0.06 года. Важно, что к двум этим категориям относятся все наиболее сильные события. Отнесение к ним же и самых глубоких событий оправдывает общность предлагаемой геодинамической модели для всех глубин по направлению субдукции.

Лишь 4 события из 15 близки к точкам нулевых значений $F_G(t)$. Это обстоятельство вполне соответствует выделенному на рис. 1 периоду неустойчивости сейсмического процесса, когда гипотетически могут происходить достаточно необычные и не самые значимые для региона сильнейшие события, аналогичные Кроноцкому землетрясению 5.XII 1997 г., $M = 7.8$, или Жупановскому землетрясению 4.V 1959 г., $M = 7.9^6$.

С учетом свойств глубинной геосреды естественно допустить кинематическую природу вариаций нормальных напряжений, определяемых движением участков океанической плиты по нормали к ее условной плоскости. В этом

⁶Учитывая построение метода ДССП в работах С.А. Федотова также и для сейсмогенной зоны Северо-Восточной Японии, можно отметить, что сильнейшее в этом районе событие — катастрофическое землетрясение Тохоку 11.III 2011 г. с $M = 9.1$ произошло с отклонением всего в двое суток от точки нулевого значения $F_G(t)$. Вряд ли такое совпадение случайно, поэтому отмеченный факт может стать исходной точкой расширения предлагаемой модели уже на весь Курило-Камчатский регион и прилегающие к нему области.

Таблица 1. Соответствие сильнейших землетрясений Камчатского участка Курило-Камчатской сейсмогенной зоны экстремумам гармонической составляющей $F_G(t)$ зависимости (19) в период 1841–2023 гг.

№	Дата события, t_E	M	$F_G(t_E)$	Отклонения Δt_E (годы)	Интервалы отклонений Δt_E (годы)
0	17.VII 2017 г.	7.7	—	—	—
1	30.I 1917 г.	8.0	–0.173 / –0.115	–1.91 / –1.99	$\pm(1.65\text{--}1.91) / \pm(1.71\text{--}1.99)$ — близкие к максимальному (± 2.14 года) отклонения Δt_E
2	5.XII 1997 г.	7.8	–0.241 / –0.298	1.81 / 1.73	
3	25.VI 1904 г.	7.7	0.354 / 0.298	–1.65 / –1.73	
4	4.V 1959 г.	7.9	0.258 / 0.315	1.79 / 1.71	
5	15.XII 1971 г.	7.9	–0.894 / –0.919	0.63 / 0.55	$\pm(0.42\text{--}0.63) / \pm(0.50\text{--}0.55)$ — полугодовые отклонения Δt_E
6	1.V 1915 г.	7.8	0.896 / 0.921	0.63 / 0.55	
7	5.VII 2008 г.	7.7	0.943 / 0.922	–0.46 / –0.54	
8	17.V 1841 г.	8.4	–0.948 / –0.927	–0.44 / –0.52	
9	11.VI 1902 г.	8.0	–0.906 / –0.930	0.60 / 0.52	
10	15.IX 1905 г.	7.8	0.952 / 0.932	0.43 / –0.51	$(-0.18\text{--}0.14) / (-0.26\text{--}0.06)$ — четвертьгодовые отклонения Δt_E
11	04.XI 1952 г.	9.0	–0.952 / –0.933	–0.42 / –0.50	
12	03.II 1923 г.	8.4	0.991 / 0.982	–0.18 / –0.26	
13	25.VIII 2021 г.	≥ 7.8	–0.991 / –0.982	–0.18 / –0.26	
14	24.V 2013 г.	8.3	–0.995 / –0.999	0.14 / 0.06	

Примечание. В колонках приведены последовательно: даты сильнейших ($M \geq 7.7$) землетрясений исследуемого региона, включая доинструментальный период наблюдений, t_E ; их магнитуды на основе данных мирового каталога NEIC и данных из работ С.А. Федотова; значения функции $F_G(t_E) = \cos(2 \cdot \pi \cdot (t_E - t_0)/T)$ в двух вариантах t_0 : даты Ближне-Алеутского землетрясения 17.VII 2017 г. без поправки и с поправкой, равной средней длительности лунного месяца; отклонения времени t_E соответствующего землетрясения от времени t_e — ближайшего экстремума функции F_G в тех же двух вариантах t_0 ; интервалы отклонений Δt_E в тех же двух вариантах t_0 . Данные о времени Ближне-Алеутского землетрясения (строка 0), в том числе с указанной поправкой, служат оценкой значения t_0 .

случае экстремумы кривых на рис. 1 соответствуют крайним положениям гипотетических колебательных движений. Соответственно, в период времени после сильнейшего Ближне-Алеутского землетрясения и до конца 2021 г. проходила фаза подъема погруженной части плиты, а далее проходит фаза ее опускания.

Если движения при колебаниях плиты в разных по глубине участках погружения различны, то ее подвижки, определяемые для этих же участков влиянием вариациями тангенциальных напряжений $T(t) \sim D_T(t)$, должны быть общими (рис. 2). Эти графики, построенные для двух диапазонов глубин, описываются на основе той же функции $F_G(t)$, но со сдвигом на четверть периода:

$$T(t) = A'_M(t) \cdot F'_G(t) = A'_M(t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (t - t_0)/T), \quad (20)$$

где $A'_M(t)$ — некая модулирующая функция формально аналогичная $A_M(t)$ в (19).

Логично предположить, что в предлагаемой модели приближение плиты к верхнему положению сопровождается ослаблением нормального напряжения в области верхней (выше предполагаемой оси колебания), наиболее жесткой зоне контакта, что, вероятно, и способствует возникновению значимых событий на всех глубинах (см. рис. 2, положительный наклон кривых). И наоборот, приближение плиты к нижнему положению приводит

к относительному дефициту достаточно сильных событий также на всех глубинах (см. рис. 2, отрицательный наклон кривых).

В целом, механизм реализации сильнейших землетрясений на основе предложенной выше идеализированной схемы периодических колебаний погружающейся плиты может быть функционально подобен анкерному часовому механизму.

ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ФЛЮИДОДИНАМИКА

Приведенный выше анализ (см. рис. 1, 2, табл. 1) указывает на определенный прогностический потенциал предложенной геодинамической модели. Согласно графику на рис. 1, предыдущий экстремум наблюдался 27.XI 2021 г. Следующая возможность реализации сильнейшего землетрясения в регионе, по-видимому, возникнет в годовом интервале возле следующего экстремума 11.III 2026 г.

Указанные данные должны быть отнесены к категории среднесрочного сценария, уточняющего данные прогноза на основе метода ДССП [Федотов, Соломатин, 2019] и двухтактной модели завершающей стадии развития очагов сильнейших Тихоокеанских землетрясений [Соломатин, 2021б], в рамках которого

этот же период 8.57 лет является частью более сложной временной структуры, а также на основе расширенной модели сценария форшоков, в которой периодически (с высокой временной точностью, но с существенной долей неопределенности в проявлении) возникавшие на III — завершающей стадии сейсмического цикла активизации рассматриваются в качестве потенциальных, но нереализованных возможностей возникновения сильнейших землетрясений [Соломатин, 2022а].

Обе последние модели, по-видимому, тесно связаны с флюидодинамикой сейсмогенных зон. Именно высокоподвижные флюиды способны обеспечивать высокую точность следования существенно инертных сейсмотектонических процессов определенным периодичностям [Федотов и др., 2011; Соломатин, 2014], а также усиливать динамическое взаимодействие сейсмотектонических процессов в значительно удаленных частях сейсмогенной зоны [Федотов, Соломатин, 2015, 2017, 2019].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важнейшей практической задачей сейсмологических исследований по-прежнему остается прогноз наиболее опасных землетрясений. В статье рассмотрен ряд вопросов, касающихся решения этой задачи на основе базовых идей

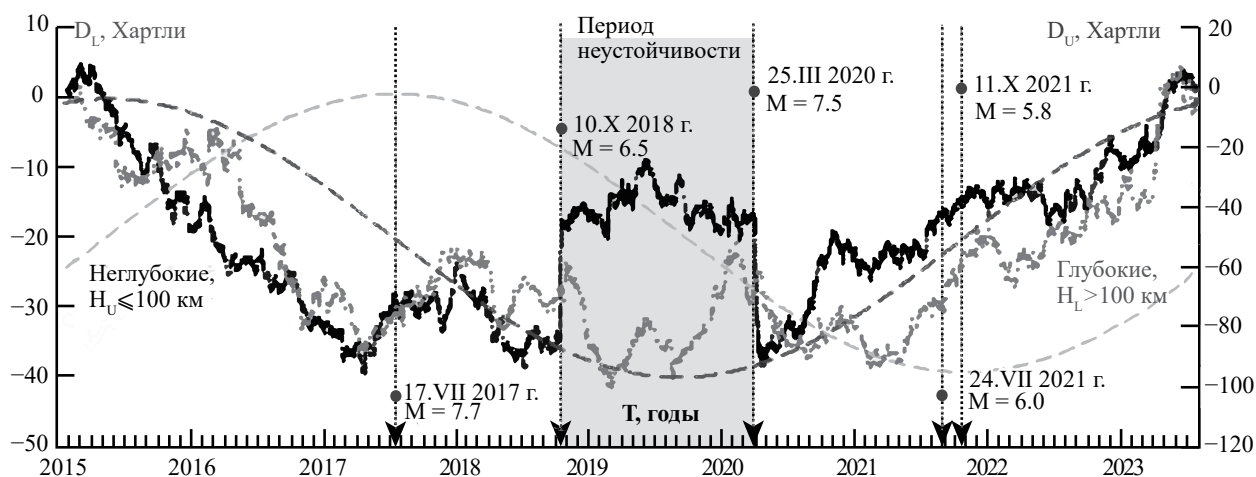


Рис. 2. Вариации информационной определенности на основе выражения (18) для неглубоких — $D_L(t)$ (черные точки) и глубоких — $D_L(t)$ (серые точки) землетрясений Камчатского участка сейсмогенной зоны. Темная пунктирная линия — общая аппроксимация зависимостей D функцией вида $F'_G(t)$, аналогичной $F_G(t)$, но со сдвигом на четверть ее периода. Светлым пунктиром приведена аппроксимация функции $F_G(t)$ для неглубоких событий (см. рис. 1).

апробированного метода долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) С.А. Федотова. Наибольшее внимание при этом уделено проблеме построения детального мониторинга сейсмического процесса в приложении к исследованию определяющих его геодинамических условий.

В качестве общего положения, определяющего принципиальную возможность построения эффективных методов сейсмического прогноза, в статье развит принятый в методе ДССП принцип, определяющий предсказуемость развития очагов наиболее опасных — сильнейших — землетрясений на основе сценариев этого развития: от долгосрочных — порядка сотен лет, до краткосрочных — в несколько суток. В то же время, можно предположить короткий интервал времени, в течение которого развитие очага проходит критическую стадию. Результат прохождения этой стадии определен в значительно меньшей степени, и именно от него непосредственно зависит текущая возможность реализации сильнейшего события. Как следствие, в гипотетическом случае успешной реализации всего комплекса прогнозных сценариев, полная оценка вероятности прогнозируемого события в качестве степени роста сейсмической опасности должна относиться лишь к указанному малому периоду. Именно такой подход применяется при определении критического возрастания опасности сильнейшего землетрясения на основе сценария форшоков метода ДССП [Федотов и др., 1993].

В статье была предложена математическая концепция информационной определенности на основе нечетких оценок, обеспечивающая максимально информативное и максимально, на уровне отдельных событий, детальное представление данных мониторинга временных процессов. В качестве базовых для мониторинга сейсмического процесса использовались представления об энергетическом и динамическом спектрах сейсмического процесса, существенно расширяющие традиционные сейсмологические представления о затишьях и активизациях.

В качестве наиболее важного результата в статье предложена концептуальная модель отражения результатами детального сейсмического мониторинга геодинамических процессов.

Практическое использование указанной модели на сейсмологическом материале Камчатского региона (региональный каталог землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН) позволило ввести в качестве гипотезы предположение о многолетнем колебательном движении океанической плиты в зоне субдукции с периодом $T = 8.57$ лет. Предполагается, что такое движение в существенной мере определяет время возникновения в регионе сильнейших землетрясений.

В то же время, отклонения моментов сильнейших землетрясений региона от найденной закономерности заставляют предположить более сложный характер указанных колебаний, вполне вероятно включающих и компоненту с близким периодом $T \approx 9.1$ года [Соломатин, 2014].

Предложенная геодинамическая модель является недостаточно определенной для уточнения прогнозов сильнейших землетрясений, но в качестве долгосрочно-среднесрочного сценария может дополнять другие методы прогноза, в частности — сценарии метода ДССП.

Для обоснования краткосрочных сценариев развития сейсмического процесса, особенно в близком к критическому состоянию сейсмоактивной геосреды, вероятно, необходимо введение флюидодинамических представлений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по госзаданию ИВиС ДВО РАН в рамках темы научно-исследовательских работ “Тепломассоперенос, сейсмичность и минеральные преобразования в гидротермальных и вулканических системах, термогидродинамическое-геохимическое-геомеханическое моделирование, приложения для оценки геотермальных ресурсов, прогноза катастрофических гидротермальных процессов, извержений вулканов и сильнейших землетрясений” (FWME-2024-0007).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.
- Матвиенко Ю.Д. Применение метода М8 на Камчатке: успешный заблаговременный прогноз землетрясения 5 декабря 1997 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 27–36.
- Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы / Отв. ред. Ю.Г. Леонов. М.: ГЕОС, 2017. 234 с.
- Соломатин А.В. Закон повторяемости землетрясений и энергетический баланс сейсмического процесса // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. № 4. С. 39–48.
- Соломатин А.В. Исследование связи вулканической активности и сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона // Вулканология и сейсмология. 2014. № 1. С. 61–76.
- Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на XII 2020 — XI 2025 гг., среднесрочная оценка сейсмической опасности в районе юга Камчатки — севера Курильских островов // Материалы XXIV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021а. С. 105–108.
- Соломатин А.В. Энергетический спектр сейсмического процесса в приложении к долгосрочному сейсмическому прогнозу и среднесрочно-краткосрочному уточнению сейсмической опасности // Вулканология и сейсмология. 2021б. № 2. С. 67–79.
- Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на III. 2022 — II. 2027 гг.; анализ результатов среднесрочно-краткосрочного прогноза для района о-ва Парамушир, данного на осень 2021 г. / Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога “Вулканизм и связанные с ним процессы”. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022а. С. 107–110.
- Соломатин А.В. Энергетические свойства сейсмического процесса и возможность введения обобщенного энергетического класса землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2022б. № 4. С. 80–92.
- 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. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013 — VIII 2018 гг.; особенности сейсмичности дуги в период предшествующих 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 IV 2016 — III 2021 гг., его развитие и применение; особенности сейсмичности Курило-Камчатской дуги до и после глубокого Охотоморского землетрясения 24.V. 2013 г., $M = 8.3$ // Вулканология и сейсмология. 2017. № 3. С. 3–17.
- 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., 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.; вероятное место, время и развитие следующего сильнейшего землетрясения Камчатки с $M \geq 7.7$ // Вулканология и сейсмология. 2012. № 2. С. 3–26.
- 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.
- Федотов С.А., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных исследований // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 29–60.
- Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Пространственно-временные закономерности сейсмической и вулканической

активности. Burgas: SWB, 2008. 304 с. ISBN 978-9952-451-00-9

Широков В.А. Влияние космических факторов на геодинамическую обстановку и ее долгосрочный прогноз для северо-западного участка Тихоокеанской тектонической зоны // Вулканизм и геодинамика. М.: Наука, 1977. С. 103–115.

Широков В.А., Серафимова Ю.К. О связи 19-летнего лунного и 22-летнего солнечного циклов с сильными землетрясениями и долгосрочный сейсмический прогноз для северо-западной части Тихоокеанского тектонического пояса // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 120–133.

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.

Baranov S.V., Gvishiani A.D., Narteau C., Shebalin P.N. Epidemic type aftershock sequence exponential productivity // Russian Journal of Earth Sciences. 2019. V. 19. ES6003.

<https://doi.org/10.2205/2019ES000695>

Gavrilov V.A., Deshcherevskii A.V., Vlasov Yu.A. et al. Network of multidisciplinary borehole measurements at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic testing area // Seismic Instruments. 2022. V. 58(2). P. 121–138.

Ogata Y. Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes // J. Am. Stat. Assoc. 1988. V. 83. № 401. P. 9–27.

Ogata Y. Space-Time Point-Process Models for Earthquake Occurrences // Ann. Inst. Stat. Math. 1998. № 50. P. 379–402.

On Seismic Forecasting, the Relationship between Seismic and Geodynamic Processes and the Concept of Information Certainty

A. V. Solomatin

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia
e-mail: alf55@mail.ru*

The article considers a number of problems solved to one degree or another when forecasting the most dangerous — strongest earthquakes. The most important of them are: the problem of the effectiveness of seismic forecasting based on the idea of scenarios — basic patterns of development of foci of the strongest earthquakes; the problem of monitoring the development of such scenarios based on seismological data; the problem of modeling the relationship between seismic and geodynamic processes that determines these scenarios. To solve the last two problems, the article proposes to use the concepts of the energy and dynamic spectra of seismic activity of the geoenvironment, and the peculiarity of the proposed solution is the introduction of the mathematical concept of information certainty. As an example of using the proposed methods, the article presents a justification for a hypothetical multi-year oscillatory motion during the submersion of the oceanic plate in the Kamchatka subduction zone with a period of about 8.57 years. It is assumed that such oscillations largely determine the most probable periods of occurrence of regional strongest earthquakes.

Keywords: seismic forecast, seismic monitoring, seismic process spectrum, geodynamic model, subduction zone, fuzzy estimates, information certainty