

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на XI 2018 – X 2023 гг.; развитие методики мониторинга сейсмического процесса
С.А. Федотов^{1,2}, А.В. Соломатин¹, А.В. Кирюхин¹

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

² *Институт физики Земли РАН, Москва, 123995, e-mail: karetn@list.ru*

Представлены результаты работ по методу долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) для Курило-Камчатской дуги и пятилетний прогноз на период XI 2018 – X 2023 гг. Полученные результаты подтверждают полную необходимость продолжения работ по сейсмоукреплению и обеспечению сейсмобезопасности в районе г. Петропавловск-Камчатский. В качестве развития методики оперативной оценки сейсмической опасности предложен способ построения временного хода сейсмического процесса на основе вероятностного представления его временных и энергетических характеристик.

1. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на XI 2018 - X 2023 гг. (по оценкам на ноябрь 2018 г.)

Апробированный метод долгосрочного сейсмического прогноза основан на закономерностях размещения очагов сильнейших землетрясений (сейсмические бреши) и сейсмического цикла [1-3]. Последнее изложение метода ДССП, дополнений к нему и прогноз для Курило-Камчатской дуги на XI 2018 - X 2023 гг. приведены в работе [5].

В соответствии с данными за предыдущий пятилетний период наиболее вероятными местами следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7,7$ и глубиной очагов $H \leq 80$ км на период XI 2018 - X 2023 гг. остаются (рис. 1):

- участок 11б, Южная Камчатка - вероятность землетрясения с $M \geq 7,7$, $P(M \geq 7,7)$ в указанный период в этом участке и имеющего силу до 8 баллов в г. Петропавловск-Камчатский, равна 20,9 %;
- для Авачинского залива, участок 12б, вероятность такого землетрясения силой до 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский равна 15,0 %.

Суммарная вероятность землетрясений с $M \geq 7,7$ в участках 11а, 11б, 12а, 12б, 13а, 13б, которые могут иметь силу 7-9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский может достигать на следующее пятилетие 49,5 %.

На Курильских островах наиболее высока сейсмическая опасность в районе Средних Курильских о-вов (6, 8 и 9 участки) – общая пятилетняя вероятность сильнейшего землетрясения $M \geq 7,7$ здесь составляет 23 %. Эта обширная сейсмическая брешь является второй по степени сейсмической опасности.

Повышена сейсмическая опасность также в районе Камчатского залива (участок 15), где $P(M \geq 7,7) = 9,3$ %, и в районе мыс Сириха - п-ов Немуро (участок 1), где $P(M \geq 7,7) = 7,0$ %.

В остальных участках сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги вероятность $P(M \geq 7,7)$ сопоставима со средней пятилетней – 3,6-4,2 %, или существенно, до 10 раз, ниже ее.

Таким образом, участки 11 и 12 являются наиболее вероятными местами очага следующего в регионе сильнейшего землетрясения с ожидаемой интенсивностью 8-9 баллов в районе г. Петропавловск-Камчатский. В полной мере сохраняется необходимость неотложных мер по обеспечению сейсмобезопасности, повышению устойчивости жилых домов, объектов и систем жизнеобеспечения в Камчатском крае.

Приведенный долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги должен использоваться, как это делалось с предыдущими прогнозами для обоснования государственных мер по сейсмозащите и сейсмоукреплению.

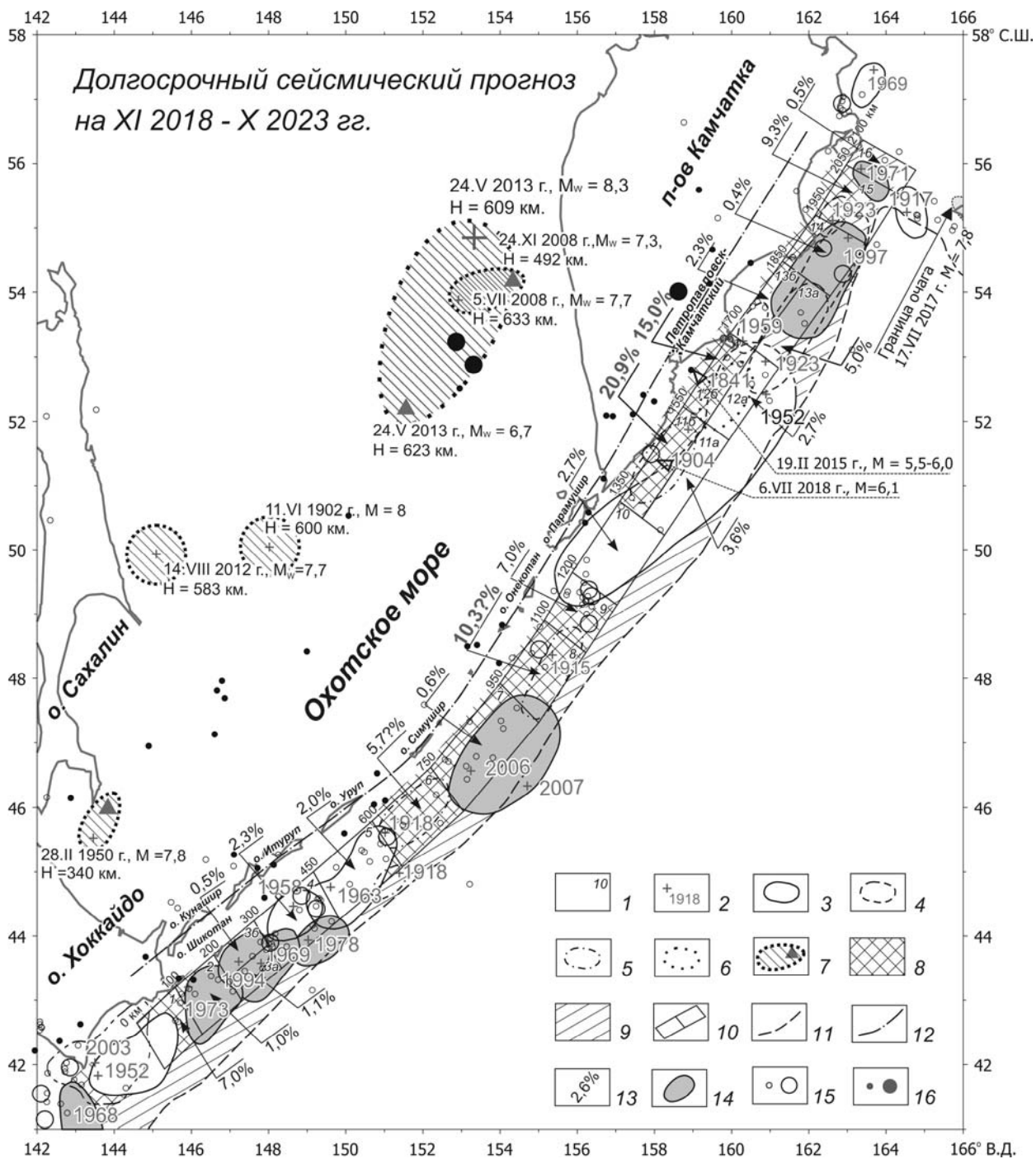


Рис. 1. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, очагов курило-камчатских землетрясений 1902-2018 гг. с $M \geq 7,7$ и вероятностей возникновения неглубоких ($H < 80$ км) таких землетрясений в XI 2018 - X 2023 гг. во всех участках полосы прогноза. 1 - номера участков; 2 - инструментальные эпицентры главных толчков землетрясений с $M \geq 7,7$; 3-6 - границы очагов землетрясений с $M \geq 7,7$, проведенные с разной точностью; 7 - эпицентры и предположительные области очагов глубоких ($H > 300$ км) землетрясений с $M \geq 7,7$, треугольники - положение их главных афтершоков; 8-9 - наиболее вероятные и возможные области очагов следующих землетрясений с $M \geq 7,7$; 10 - границы участков прогноза; 11-12 - оси глубоководных желобов и ось вулканического пояса; 13 - вероятности землетрясений $M \geq 7,7$ в период XI 2018 - X 2023 гг. 14 - области очагов землетрясений с $M \geq 7,7$, которые произошли после 1965 г. в предсказанных сейсмических брешах; 15 - эпицентры неглубоких землетрясений, произошедших в период 2013-2018 гг., меньший кружок, соответствует $m_b = 5,0-5,9$, больший - $m_b = 6,0-7,3$, $M < 80$ км; 16 - то же с $H \geq 80$ км. Средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7,7$ в одном месте в течение 5 лет равна 3,6-4,2%.

2. Представление временного хода сейсмического процесса на основе вероятностного представления его временных и энергетических характеристик

Для оперативных оценок сейсмической опасности различных участков сейсмоактивной зоны необходимо рассмотрение временного хода сейсмического процесса в них. В этом плане определенными преимуществами обладают кумулятивные ряды некоторых характеристик сейсмичности: суммарного числа событий, суммарной выделившейся сейсмической энергии, а также график Бенъоффа.

Накопленные суммы указанных параметров, как правило, отражают реальные физические характеристики процессов, на основе которых возможен, в том числе, сейсмический прогноз. Пример успешного подобного прогноза представлен в работе [3], аналогичные построения для уточнения данных ДССП приведены в [4].

Важно, что указанные кумулятивные временные ряды в недостаточной мере отражают сейсмические активизации. Это объясняется степенным характером распределения энергетических характеристик сейсмичности, что усложняет оценку ее средней величины в качестве «фонового» уровня. С другой стороны, использование абстрактных, без указания их величины, событий, хотя также имеет реальный физический смысл, не дает достаточной информации об энергетике процесса.

В настоящей работе предлагается подход на основе вероятностных оценок «неслучайности» последовательных событий и условного суммирования таких вероятностных величин при построении кумулятивного ряда.

Считается, что сейсмический процесс каждого из исследуемых участков сейсмогенной зоны (Раздел 1) представлен потоком сейсмических событий разного энергетического класса K_s . Параметр, характеризующий сейсмичность исследуемого участка, который можно назвать «уровень активизации», удобно определять функцией вероятности $P(K_s, \Delta t)$ последовательных пар событий, разделенных промежутком времени Δt , причем первое из пары событий имеет энергетический класс K_s :

$$P(K_s, \Delta t) = 1 - [(1 - P(K_s)) \cdot (1 - P(\Delta t))]^{1/2}, \quad (1)$$

где:

$$P(K_s) = 10^{-\gamma \cdot (K_s - K_0)}, \quad (2)$$

$$1 - P(\Delta t) = 1 - \text{Exp}[-\Delta t/\tau]. \quad (3)$$

Правые части формул (2) и (3) представляют соответственно: закон Гутенберга-Рихтера (с минимальным энергетическим классом K_0 и средним наклоном графика повторяемости γ) и функцию экспоненциального распределения (с масштабом τ), предполагающая независимость событий. Параметр τ определяется как средняя по используемой выборке значений Δt величина. Оба выражения обобщают представление о «фоновой», невозмущенной, части сейсмического процесса, при этом распределение оценок $P(K_s)_i$ и $P(\Delta t)_i$ близко к равномерному распределению в интервале от 0 до 1.

Вид выражения (1) подобран эмпирически в предположении определяющего влияния на уровень активизации или каждого из факторов: $P(\Delta t)_i$ и $P(K_s)_i$, или их композиции, при этом предполагается зависимость между ними.

Представленное выражение обеспечивает относительную равномерность распределения величин $P(K_s, \Delta t)_i$ в случае отсутствия влияния значимых активизаций и сравнительно редких периодов затиший. Оба эти свойства определяют эффективность средних оценок, равных в общем случае величине 0,5. Отклонения от представленной модели «фоновой» части процесса, также как и вариации интенсивности сейсмичности приводят к отклонению параметра $P(K_s, \Delta t)_i$ от этого уровня.

Чтобы сгладить краткосрочные вариации параметра $P(K_s, \Delta t)_i$ и отслеживать его крупномасштабные тренды рассматривается кумулятивное представление:

$$P^*(t_i) = 1/N \cdot \sum_{j=1}^i P(K_s, \Delta t)_j - 0,5. \quad (4)$$

К концу рассматриваемого временного интервала этот кумулятивный параметр пропорционален средней за весь период вероятности отклонения сейсмичности участка

от «фонового» процесса с учетом всех затиший ($P'(t_i) \sim -0,5$) и активизаций ($P'(t_i) \sim 0,5$). На графике (рис. 2), построенном на основе выражения (4) для участка 11б (рис. 1), локальный уровень активизации определяется наклоном отрезка, аппроксимирующего исследуемый локальный участок графика.

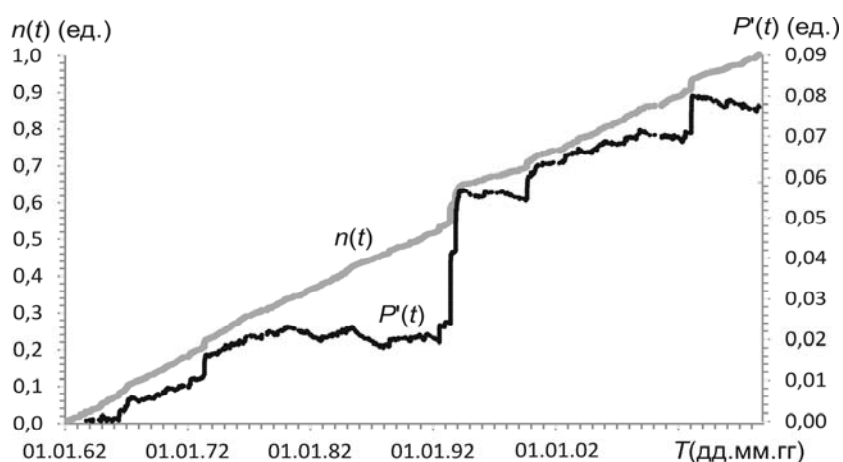


Рис. 2. Кумулятивные графики вариации сейсмичности для участка 11б (рис. 1). $n(t)$ – кумулятивный график числа землетрясений с $K_s \geq 8,5$. $P'(t)$ – кумулятивный график хода уровня активизации для той же выборки и $\gamma = 0.47$.

Активизации отражаются аппроксимирующими график отрезками с положительным, вплоть до практически вертикального, наклонами. Нулевой наклон отрезков соответствует «фоновому» процессу, а отрицательный – относительным затишьям. Очевидно (рис. 2), что эффективность предложенной методики отслеживания периодов активизаций различных временных масштабов очень высока.

Свойства предлагаемой методики позволяют также обобщать ход сейсмического процесса участков с существенно различными базовыми параметрами сейсмичности. Это позволяет значительно расширить возможности используемой в методе ДССП методики «сценарий форшоков» за счет отмеченных в предыдущих работах удаленных по времени форшоков, обнаруживающих определенные периодичности.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта № 18-5-002 Программы ДВО РАН «Дальний Восток».

Список литературы

1. Федотов С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Труды Института Физики Земли АН СССР. № 36 (203). М: Наука, 1965. С. 66-93.
2. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.
3. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
4. 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.
5. 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.