

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на I 2025–XII 2029 гг. Модель детального мониторинга регионального сейсмического процесса

Соломатин А.В.

Long-term seismic forecast for the Kuril-Kamchatka Arc: I 2025-XII 2029. Detailed regional seismic monitoring model

Solomatina A.V.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: alf55@mail.ru

Представлены актуальные данные долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) на 2025-2029 гг., полученные на основе метода С.А. Федотова, для Курильских островов и Камчатки. В работе также уделено внимание построению сценария подготовки событий регионального энергетического класса $K \geq 12$.

Долгосрочный сейсмический прогноз на I 2025 – XII 2029 гг.

На основе базового метода ДССП [2, 3] представлен прогноз наиболее сильных землетрясений для Курило-Камчатского региона на период с I 2025 по XII 2029 гг. Основные результаты исследования следующие.

Наиболее высокая сейсмическая опасность сохраняется в районе города Петропавловск-Камчатский (рисунок, прогнозные участки 11-13), где вероятность возникновения землетрясения с магнитудой $M \geq 7.7$ – $P(M \geq 7.7)$ и интенсивностью воздействия $I = 7-9$ баллов в Петропавловск-Камчатской городской агломерации в течение пяти лет достигает 50.2 %. Вероятность того, что величина I достигнет 9 баллов с катастрофическими для городской агломерации последствиями, превышает 18.1 %, что в 4-5 раз выше среднего значения для всей Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, которая, в свою очередь, является наиболее сейсмически активным регионом России.

На Курильских островах вероятность сильнейшего землетрясения существенно ниже. Здесь наибольшая вероятность возникновения сильнейшего события относится к району Средних Курильских островов, участкам 6, 8 и 9. Вероятность такого события в них оценивается величинами: 8 %, 3.1 % и 9.3 %, соответственно.

Пятилетняя повышенная опасность сильнейшего землетрясения отмечается также для района Камчатского залива (участок 15), где вероятность $P(M \geq 7.7)$ составляет 12.1 %. В то же время, эта величина в значительной степени связана с последствиями сильнейшего Ближне-Алеутского землетрясения 2017 г. Также существует опасность возникновения землетрясения в районе мыса Сириха и полуострова Немуро (участок 1), где вероятность $P(M \geq 7.7)$ составляет 3.9 %.

Представленный долгосрочный сейсмический прогноз следует использовать в качестве важной основы для принятия необходимых государственных мер по предотвращению катастрофических последствий и ущерба в Камчатском крае. Для этого в наиболее угрожаемых районах, в частности, в г. Петропавловск-Камчатский, необходимо ежегодно увеличивать количество граждан, проживающих в сейсмоустойчивых зданиях.

Приведенный сейсмический прогноз является одновременно прогнозом больших цунами в качестве последствий ожидаемых сильнейших землетрясений в прибрежной зоне Курильских о-вов и Камчатки.

Введение: о проблеме мониторинга сейсмического процесса

Сейсмоактивная среда представляет собой чрезвычайно сложный для изучения объект. Это обусловлено ее многоуровневой структурой, охватывающей широкий диапазон пространственно-временных и энергетических характеристик, а также факторами различной природы, часть из которых до сих пор остаются неизученными.

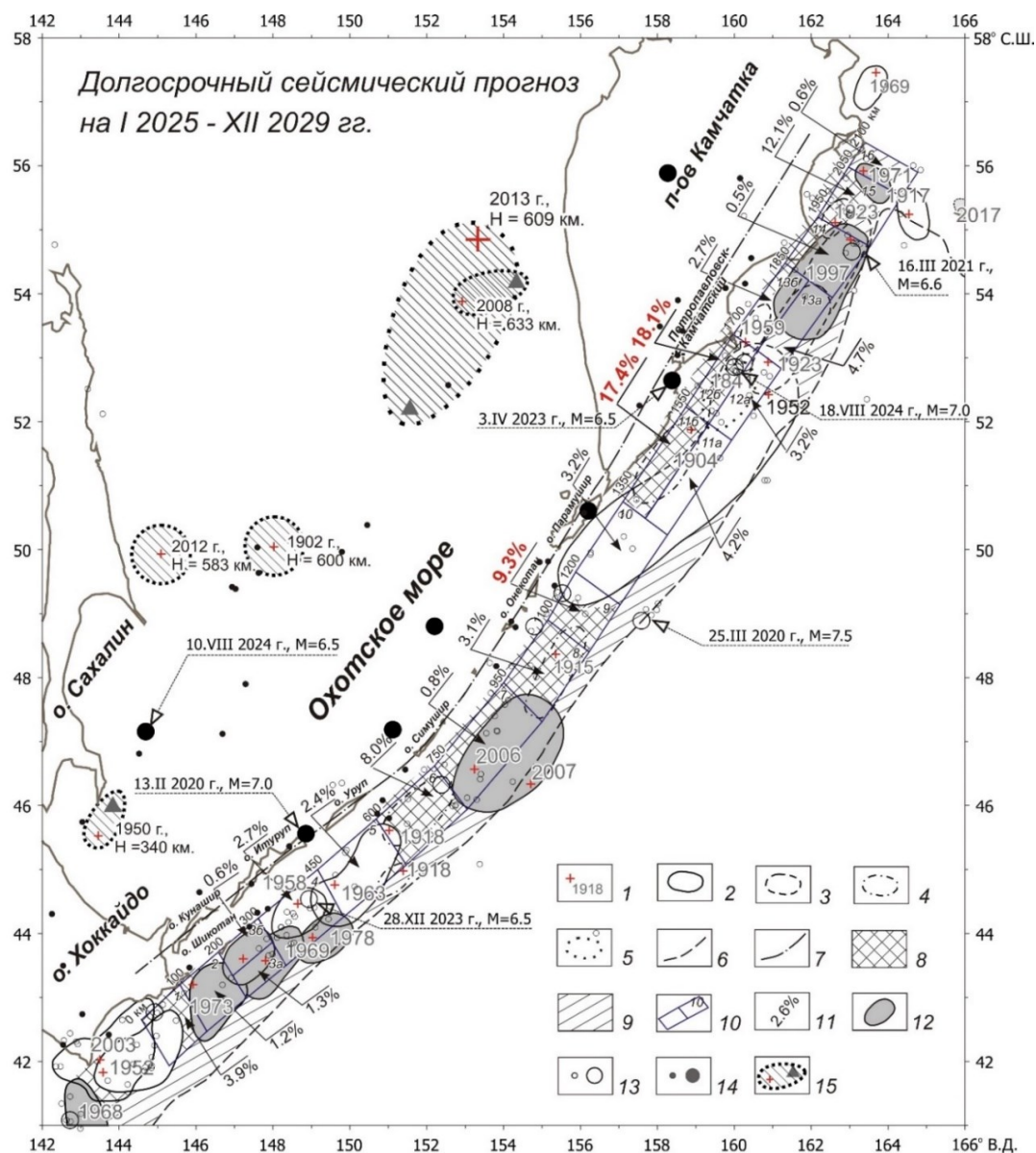


Рисунок. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги на период I 2025 – XII 2029 гг. и очагов уже реализовавшихся сильнейших ($M \geq 7.7$) землетрясений: 1 – инструментальные эпицентры и годы главных толчков сильнейших землетрясений; 2-5 – границы их очагов, проведенные с различной точностью; 6-7 – оси глубоководных желобов и вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 8-9 – наиболее вероятные и возможные места следующих сильнейших землетрясений; 10-11 – границы, номера участков прогноза и вероятности неглубоких сильнейших землетрясений в них в I 2025 – XII 2029 гг.; 12 – области очагов сильнейших землетрясений, которые произошли после 1965 г. в предсказанных сейсмических брешах; 13 – эпицентры более слабых неглубоких землетрясений за период I 2020 – XII 2024 гг., меньший кружок, соответствует $m_b = 5.0-5.9$, больший – $M = 6.0-7.5$, $H < 80$ км; 14 – то же с $H \geq 80$ км; 15 – эпицентры и предположительные области очагов глубоких ($H > 300$ км) сильнейших землетрясений, треугольники – положение их главных афтершоков.

Современные методы наблюдения за сейсмическим процессом, использующие такие его параметры, как сейсмическая активность A_{10} , нормированная выделившаяся сейсмическая энергия D [2], наклон графика повторяемости γ , а также некоторые другие, не могут в полной мере отразить свойства сейсмического процесса на разных уровнях и в разных аспектах его проявления.

Предполагая первоочередную важность прогноза наиболее опасных, – сильнейших землетрясений, необходимо, тем не менее, отметить, что оперативный

сейсмический мониторинг является также важной задачей. Именно мониторинг позволяет отслеживать соответствие сейсмического процесса на завершающих этапах подготовки сильнейших землетрясений прогнозным сценариям его развития.

В данной работе автор представляет методику детального мониторинга сейсмического процесса, которую он разрабатывает для решения сейсмологических задач Совета по прогнозу землетрясений и извержений Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН.

Р-шкала как основа изучения свойств сейсмического процесса

Рассмотрим некий параметр $X(t)$, который, как предполагается, описывает определенные свойства сейсмического процесса и представлен дискретной временной последовательностью. На основе гипотетически представительной выборки значений X построим нормированную ранговую статистику – P . Соотношение $P(X)$ играет важную роль в дальнейшем, поэтому введем для него специальное общее определение: P -шкала исследуемых параметров.

P -оценка – $P(t)$ для очередного наблюдаемого значения $X(t)$ по построению представляет собой вероятность того, что это значение принадлежит к классу «больших», что по смыслу совпадает с нечеткой оценкой величины $X(t)$.

Методом, альтернативным ранговому представлению, хотя и не всегда рациональным для построения P -шкалы, является использование аналитической функции статистического распределения значений параметра X .

Помимо того, что параметр P является оценкой вероятности, о которой говорилось ранее, для дальнейшего не менее важно, что его значения равномерно распределены на отрезке $[0; 1]$, или, другими словами: спектр этих значений – плоский.

Если рассматривать значения параметра X в качестве индикатора изменений некоторого состояния наблюдаемого процесса, то плоский спектр значений P , полученный в определенный промежуток времени, свидетельствует о статистическом равновесии этих состояний в данный период. Чтобы формально соотнести свойство «равновесие состояний» его макро-аналогу «равновесное состояние», необходимо гипотетически приписать последнее исходной, наиболее репрезентативной выборке значений X , характеризующейся плоским спектром значений P по построению.

Как правило, свойства сейсмотектонических процессов во временном представлении определяются ступенчатыми изменениями многих представляющих эти свойства параметров, что на практике хорошо отражается в виде близких к линейным временных трендов при представлении этих изменений кумулятивной функцией вида:

$$C(t) = \sum_{\tau=0}^t P(\tau) \quad (1).$$

Следует подчеркнуть, что такой способ представления данных наблюдений позволяет вести мониторинг изучаемых на их основе процессов в событийно. Это чрезвычайно важно для получения максимально детальных результатов. Кроме того, кумулятивное представление, рассматриваемое в качестве временного фильтра, эффективно выделяет в общей последовательности наиболее значимые для каждого временного масштаба изменения локальных трендов.

На практике предпочтительней использовать модифицированный ряд:

$$C(t) = \sum_{\tau=0}^t (P(\tau) - \bar{P}), \quad (2)$$

где $\bar{P} = 0.5$ – независимое от распределения параметра X среднее значение.

Потенциально временной ряд (2) может быть применен и непосредственно к параметру X , но использование P -шкалы имеет существенные преимущества, прежде всего, в плане близости к универсальному информационному подходу. В частности, можно показать, что использование в (2) преобразования $\ln(P)$ в виде функции:

$$D(t) = -\sum_{\tau=0}^t (\ln(P(\tau)) + 1) \quad (3)$$

отражает вариации дивергенции Кульбака-Лейблера для наблюдаемого и эталонного в представляемой модели равномерного распределения значений P .

Также можно заметить, что если в качестве параметра X использовать некоторую шкалу магнитуд землетрясений, то выражение (3) будет отражать изменения наклона графика повторяемости последних (также – пособытийно!). Более того, дополнительную для мониторинга сейсмического процесса информацию можно получить на основе исследования вариаций следующей функции:

$$D'(t) = -\sum_{\tau=0}^t (\ln(1 - P(\tau)) + 1) \quad (3')$$

Такие вариации отражают степень ограничения сейсмического процесса в диапазоне событий класса «большие». Такое ограничение, как правило, в конечном итоге компенсируется событием, значительно более сильным, чем его уровень.

Снова рассматривая выражения (2) и (3) в качестве фильтров на спектре значений параметра P , мы можем предположить, что существует более общая форма преобразования: $f(P)$. В частности, заслуживает внимания следующее выражение:

$$D'(t) = -\sum_{\tau=0}^t (\ln(1 - P(\tau)) - \ln(P(\tau))), \quad (4)$$

выделяющее, в отличие от выражений (3) и (3'), среднюю часть спектра P .

Модель мониторинга вариаций интенсивности сейсмического процесса

Отчасти интенсивность сейсмического процесса характеризует величина локального наклона хода функции $C'(t)$ в выражении (2). Тем не менее, рациональней использовать другое представление:

$$D^A(t) = -\Sigma(\text{Lg}(P^A(t)) - \overline{\text{Lg}(P^A)}) = -\Sigma(\text{Lg}(1 - [(1-P^T(t)) \cdot (1-P^E(t))]^{0.3}) - \overline{\text{Lg}(P^A)}), \quad (5)$$

где P^E и P^T – соответственно: P -оценки величин землетрясений некоторой пространственной области, и такие же оценки последовательных временных интервалов между ними. При этом величинам P в первом случае соответствуют наиболее сильные события, а во втором – минимальные временные интервалы. Степень 0.3 выбрана для приближения распределения величин P^A к равномерному. В целом вид выражения (5) предполагает максимум интенсивности сейсмического процесса на основе максимума хотя бы одной из указанных его компонент.

Хотя на основе представленной выше модели реализации мониторинга сейсмического процесса, при необходимости, можно получить и численные оценки, чаще достаточно изучения рядов, подобных (2)-(5), на качественном уровне.

Заключение

Представленная выше модель, наряду с представлением об энергетическом балансе сейсмического процесса [1], применяется на основе данных регионального каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН для еженедельного мониторинга сейсмического процесса Камчатского участка Курило-Камчатской сейсмогенной зоны. Результаты этого мониторинга используются в работе Общего совета по прогнозу землетрясений и извержений вулканов ИВиС ДВО РАН. В частности, обобщение вариаций указанных параметров перед региональными событиями энергетического класса $K \geq 12$ позволяет отслеживать и изучать процесс подготовки и реализации значимых событий на недельных интервалах времени, дополняя таким образом другие методики ДССП.

Список литературы

1. Соломатин А.В. Энергетический спектр сейсмического процесса в приложении к долгосрочному сейсмическому прогнозу и среднесрочно-краткосрочному уточнению сейсмической опасности // Вулканология и сейсмология. 2021. № 2. С. 67-79.
2. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
3. Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) 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.