

**Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на I 2024 – XII 2028 гг. Концепция статистической уверенности при сейсмическом мониторинге геодинамических процессов**

**Соломатин А.В.**

**Long-term seismic forecast for the Kuril-Kamchatka arc for I 2024 – XII 2028. The concept of statistical certainty in seismic monitoring of geodynamic processes**

**Solomatina A.V.**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;  
e-mail: alf55@mail.ru*

Представлены актуальные данные долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) по методу С.А. Федотова для Курильских островов и Камчатки. Предложена концепция статистической уверенности/определенности при сейсмическом мониторинге геодинамического состояния сейсмоактивной среды. Приведен пример ее применения для Камчатского участка региона.

**Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на I 2024 – XII 2028 гг.**

На основе базового метода ДССП [4, 5] представлен прогноз сильнейших землетрясений для Курило-Камчатского региона на период I 2024 – XII 2028 гг. Основные результаты прогноза заключаются в следующем.

Сохраняется очень высокая сейсмическая опасность в районе г. Петропавловск-Камчатский (прогнозные участки 11-13, рис. 1), где пятилетняя вероятность возникновения землетрясения с магнитудой  $M \geq 7.7$  и силой 7-9 баллов достигает величины  $P(M \geq 7.7) = 46.1\%$ . Пятилетняя вероятность того, что такое землетрясение будет иметь силу 9 баллов и катастрофические последствия в Петропавловск-Камчатской городской агломерации, превышает 15.7 %, что в 4-5 раз выше средней такой опасности в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне, являющейся наиболее сейсмичной территорией в Российской Федерации.

На Курильских островах опасность сильнейшего землетрясения существенно ниже, при этом она максимальна в районе Средних Курильских о-вов (участки 6, 8 и 9, рис. 1), вблизи концов главного разрыва Симуширского землетрясения 15.IX 2006 г.,  $M=8.2$ . Вероятности  $P(M \geq 7.7)$  в этих участках оцениваются величинами 8.3 %, 4.3 % и 10.5 %, соответственно.

Участок 10 в районе Северных Курильских островов, расположенный между двумя указанными выше протяженными сейсмическими брешами, также характеризуется максимально высокой сейсмической активностью, что указывает на значительную вероятность его охвата очагом следующего сильнейшего землетрясения.

Для лучшего понимания текущего уровня сейсмической опасности в регионе, особенно в Авачинском заливе, необходимо продолжать и развивать непрерывные наблюдения за сеймотектоническими процессами всеми имеющимися методами.

Повышенную опасность представляют также сейсмические бреши в районе Камчатского залива (участок 15,  $P(M \geq 7.7) = 11.2\%$ ), где до сих пор проявляются тектонические последствия сильнейшего Ближне-Алеутского землетрясения 2017 г., и в участке 1 (м. Сириха – п-ов Немуро,  $P(M \geq 7.7) = 6.4\%$ ), рис. 1.

В целом, приведенный долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги следует использовать, как это делалось с предыдущими такими прогнозами, для обоснования и принятия необходимых государственных мер по предотвращению катастрофических потерь и ущерба в Камчатском крае, неизбежных без таких мер. Для этого в угрожаемых районах и, прежде всего, в г. Петропавловск-Камчатский, ежегодно должно существенно возрастать количество сейсмоустойчивых домов для проживания населения, а также других объектов инфраструктуры.

Приведенный сейсмический прогноз является одновременно прогнозом больших цунами как последствий сильнейших землетрясений на Курильских о-вах и Камчатке.

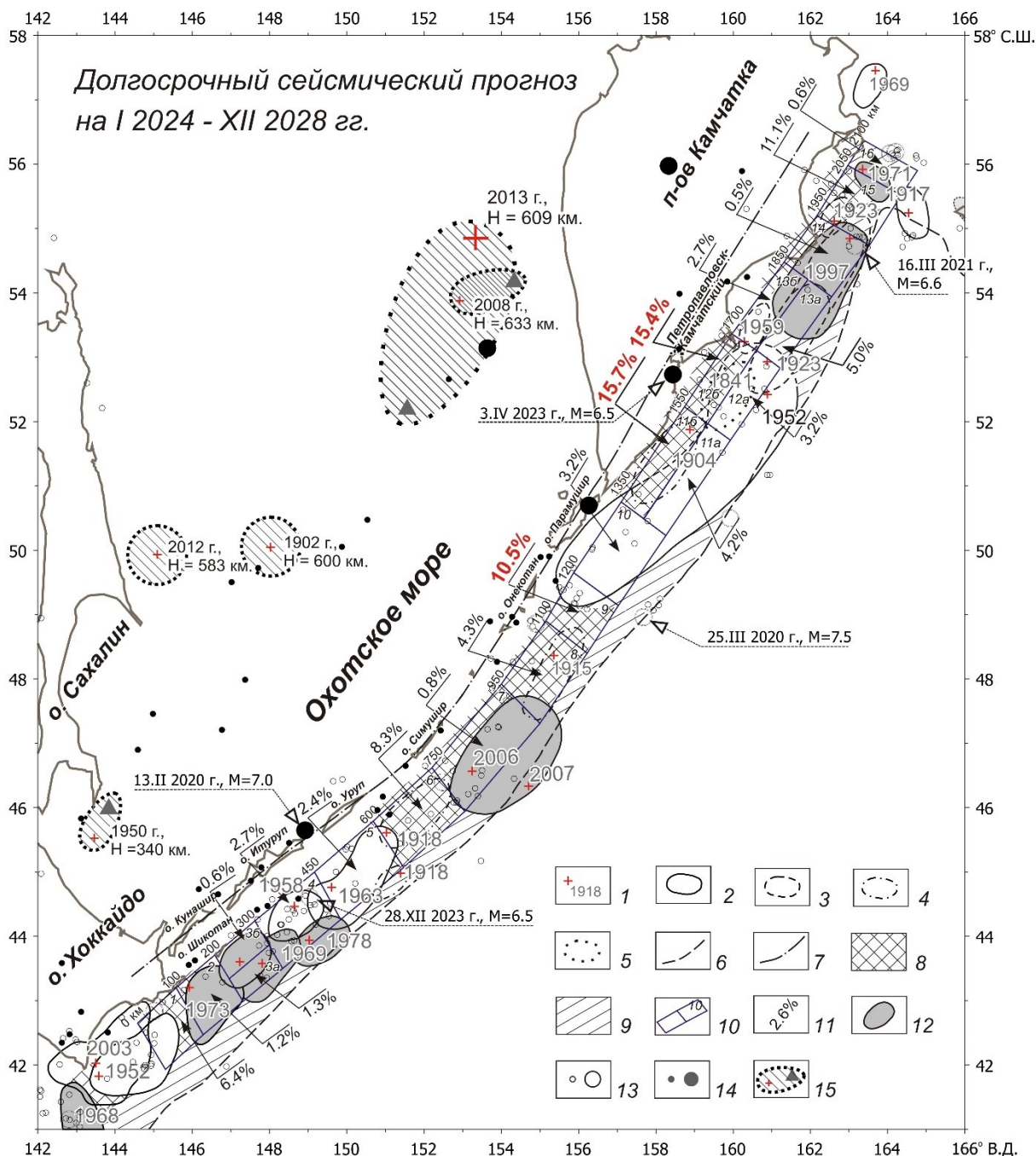


Рис. 1. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, очагов курило-камчатских землетрясений 1902-2023 гг. с  $M \geq 7.7$  и вероятностей возникновения неглубоких ( $H < 80$  км) таких землетрясений в I 2024 – XII 2028 гг. во всех участках полосы прогноза: 1 – инструментальные эпицентры и годы главных толчков землетрясений с  $M \geq 7.7$ ; 2-5 – границы очагов землетрясений с  $M \geq 7.7$ , проведенные с различной точностью; 6-7 – оси глубоководных желобов и вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 8-9 – наиболее вероятные и возможные места следующих землетрясений с  $M \geq 7.7$ ; 10-11 – границы, номера участков прогноза и вероятности неглубоких землетрясений  $M \geq 7.7$  в них в I 2024 – XII 2028 гг.; 12 – области очагов землетрясений с  $M \geq 7.7$ , которые произошли после 1965 г. в предсказанных сейсмических брешах; 13 – эпицентры неглубоких землетрясений, произошедших в период I 2019 – XII 2023 гг., меньший кружок, соответствует  $m_b = 5.0-5.9$ , больший –  $M_S = 6.0-7.5$ ,  $H < 80$  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. Средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с  $M \geq 7.7$  в одном месте в течение 5 лет равна 3.6-4.2 %.

### О параметре возможности $P$

При изучении сложных процессов, кроме теоретико-вероятностного, представляется перспективным подход на основе нечетких оценок возможности. Вводимый при этом параметр  $P(X)$  строится на основе нормированной ранговой статистики величин исходного параметра  $X$  или на основе его функции распределения. Как и обычная вероятность, параметр  $P(X)$  заключен в интервале  $[0; 1]$  (условно –  $]0; 1[$ ), но в отличие от нее сохраняет информацию о величине параметра  $X$ .

### О смысле кумулятивного ряда с использованием $P$ -шкалы

Рассмотрим кумулятивный ряд:  $C(t) = \sum_{\tau=0}^t P(\tau)$ . Здесь  $P(\tau)$  –  $P$ -оценка возможности отнесения исследуемого параметра  $X$ , наблюдаемого в момент времени  $\tau$ , к нечеткому классу «больших» значений. Как правило, при мониторинге важно оценить отличия исследуемого параметра на интервале  $[t_i, t_j]$ :  $C(t_i, t_j) = \sum_{\tau=t_i}^{t_j} P(\tau)$  от его долговременных средних значений. При этом «средние долговременные» значения параметра  $X$  в  $P$ -шкале определяются его медианным значением  $X_{med}$ :  $P_{med} = 0.5$ .

Во временном ряду  $C(t)$  величины его трендов  $C(t_i, t_j)/(t_j - t_i)$  определяются интегрально, что позволяет говорить о средней *уверенности/определенности (certainty)* в повышенных (или пониженных) значениях  $X$  на указанном временном интервале. Единицей измерения  $C$  в этом случае являются «шансы». Хотя при необходимости можно получить и статистическую оценку, для мониторинга чаще бывает достаточно способности интегральных кривых наглядно отражать наиболее значимые тренды и временные участки их смены относительно долговременного среднего уровня:

$$C(t) = \sum_{\tau=0}^t (P(\tau) - 1/2) \quad (1)$$

### О кумулятивных рядах $P$ -оценок интенсивности сейсмического процесса и его энергетического спектра

Построим еще один кумулятивный ряд значений  $P$  в виде:

$$C^L(t) = -\Sigma(\text{Ln}(1 - P(t)) + 1), \quad (2)$$

где по образцу (1) учитывается равенство:  $\overline{\text{Ln}(1 - P)} = -1$ .

С использованием информационной дивергенции Кульбака-Лейблера легко показать, что выражение (2) отражает кумулятивное изменение информации о величинах землетрясений в  $P$ -шкале, близкое к информационным оценкам Хартли.

С другой стороны, используя представление об обобщенном энергетическом классе  $K^F$  [1, 3], представление закона Гутенберга-Рихтера в виде:

$$\text{Lg}(1 - P(K^F)) = \gamma \cdot (K^F - K_{min}^F), \quad (3)$$

а также оценку на основе максимального правдоподобия коэффициента его наклона  $\gamma$ , согласно [6], можно показать, что выражение (2) и дополнительное к нему:

$$C^H(t) = -\Sigma(\text{Ln}(P(t)) + 1) \quad (4)$$

представляют вариации уверенности в уровне сейсмических событий: относительно как наиболее слабых – (2), так и наиболее сильных из них – (4).

Рассмотрим кумулятивный временной ряд интенсивности сейсмического процесса –  $P^A$  для некоторой пространственной области в виде:

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

где  $P^E$  –  $P$ -оценка величин землетрясений, а  $P^T$  –  $P$ -оценка временных интервалов между ними. Вид выражения (5) предполагает максимум интенсивности  $P^A$  на основе максимума любой из его компонент.

### Модель Камчатского участка Курило-Камчатской сейсмогенной зоны

Используем (5) для отражения хода сейсмического процесса в Камчатском регионе для двух диапазонов гипоцентров землетрясений: выше и ниже 100 км на основе регионального каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН.

На рис. 2 представлены соответствующие ряды  $C^A(t)$  и кривая гармоники регионального геодинамического цикла с  $T = 17.15/2$  лет [2]. На ее экстремумы с высокой точностью приходятся времена известных сильнейших землетрясений региона: (23.III 1923 г. (-1.00 – минимум функции); 4.XI 1952 г. (0.96); 5.VII 2008 г. (-0.94); 24.V 2013 г. (1.00); 17.VII 2017 г. (-1 – по построению). Отметим, что изменения рядов (5) для глубоких и неглубоких событий противофазны.

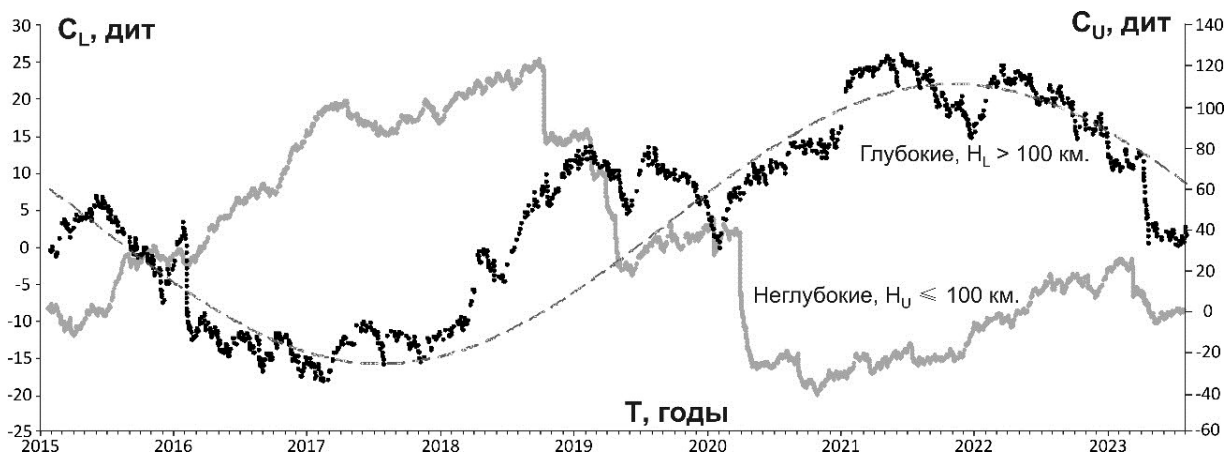


Рис. 2. Вариации уровня уверенности для глубоких (черные точки) и неглубоких (серые точки) землетрясений Камчатки. Первый ряд аппроксимирован в виде пунктира зависимостью:  $-\text{Cos}(2 \cdot \pi \cdot (t - t_0) / 8.575)$ . При этом временной интервал  $t - t_0$  выражается в годах, а  $t_0$  соответствует дате Ближне-Алеутского землетрясения: 17.VII 2017 г.

В то же время, выражение на основе (2) и (4):

$$C^K(t) = -\sum (\text{Lg}(1 - P^K(t)) - \text{Lg}(P^K(t))), \quad (6)$$

за счет максимализации вклада более сильных событий относительно вклада наиболее слабых, гипотетически отражает вариации субдукционных подвижек.

Графики  $C^K(t)$  для указанных выше диапазонов глубин синфазны, описываются той же гармонической кривой, но сдвинуты на четверть периода. Подобный сдвиг фаз указывает на возможность дискретной, аналогично маятниковому механизму, автогенерации колебаний субдукционного участка вокруг оси на глубине 50-100 км. При этом региональные сильнейшие события (включая Ближне-Алеутское землетрясение 2017 г.) приходятся в равной степени на ее крайние положения.

### Список литературы

1. Соломатин А.В. Закон повторяемости землетрясений и энергетический баланс сейсмического процесса // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. № 4. С. 39-48.
2. Соломатин А.В. Исследование связи вулканической активности и сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона // Вулканология и сейсмология. 2014. № 1. С. 61-76.
3. 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.
4. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
5. 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.
6. Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula  $\lg N = a - bM$  and its confidence limits // Bulletin of the Earthquake Research Institute. 1965. V. 43. P. 237-239.