

**Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на XII 2020 – XI 2025 гг., среднесрочная оценка сейсмической опасности в районе юга Камчатки – севера Курильских островов**

**А.В. Соломатин**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: [alf55@mail.ru](mailto:alf55@mail.ru)*

Приведены результаты работ по методу долгосрочного сейсмического прогноза С.А. Федотова (ДССП) и его развитию. Представлены долгосрочный прогноз на XII 2020 – XI 2025 гг. для Курило-Камчатской дуги и среднесрочно-краткосрочный сценарий развития сейсмической опасности в районе юг Камчатки – о. Парамушир, при построении которого использована важнейшая характеристика сейсмического процесса – его энергетический спектр.

**1. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на XII 2020 – XI 2025 гг. (по оценкам на декабрь 2020 г.)**

Использованный в работе апробированный метод долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) С.А. Федотова основан на закономерностях размещения очагов сильнейших землетрясений (сейсмические бреши) и сейсмического цикла [2]. Последнее изложение метода ДССП, дополнений к нему и прогноз для Курило-Камчатской дуги на VI 2019 – V 2024 гг. приведены в [3].

По данным метода ДССП, в сейсмогенной зоне Курило-Камчатской островной дуги в следующий пятилетний период до XI 2025 г. наиболее опасными остаются сейсмические бреши в районе Камчатки и Средних Курильских островов. В них возможны землетрясения с магнитудой  $M$  до 8.5 с высокой вероятностью цунами.

На Камчатке наиболее вероятными районами следующих сильнейших ( $M > 7.7$ ) землетрясений являются (рис. 1): район Южная Камчатка – Авачинский залив (пятилетняя вероятность землетрясения с сотрясаемостью 7-9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский – 48 %); Камчатский залив – вероятность сильнейшего землетрясения на следующие пять лет равна 8 %. В районе Курильских о-вов наиболее опасными являются сейсмические бреши в участках 6, 8, 9, пятилетняя вероятность сильнейшего землетрясения в которых – 27-28 %.

В целом, по данным ДССП сохраняется необходимость продолжения практических мер по обеспечению сейсмической безопасности в населенных пунктах Камчатки, в том числе по неотложному повышению до необходимого уровня сейсмоустойчивости жилья и систем жизнеобеспечения в наиболее угрожаемых районах: Петропавловск-Камчатская городская агломерация и поселок Усть-Камчатск.

В дополнение к оценкам сейсмической опасности по методу ДССП, необходимо также учитывать высокую активность сеймотектонических процессов на границе двух наиболее крупных сейсмически опасных областей – в прогнозном участке 10 (рис. 1). Этот участок формально, по данным ДССП, не является сейсмической брешью, вследствие чего сейсмическая опасность в нем может быть существенно недооценена стандартной методикой. В настоящем исследовании, с учетом максимальной накопленной сейсмической энергии в районе Камчатки, рассмотрен в качестве вероятного варианта развития очага сильнейшего землетрясения в пределах 10 и 11 участков сейсмогенной зоны. Альтернативный вариант реализации гигантского очага, охватывающего 8, 9 и 10 участки, здесь не рассматривается, в том числе и как менее опасный.

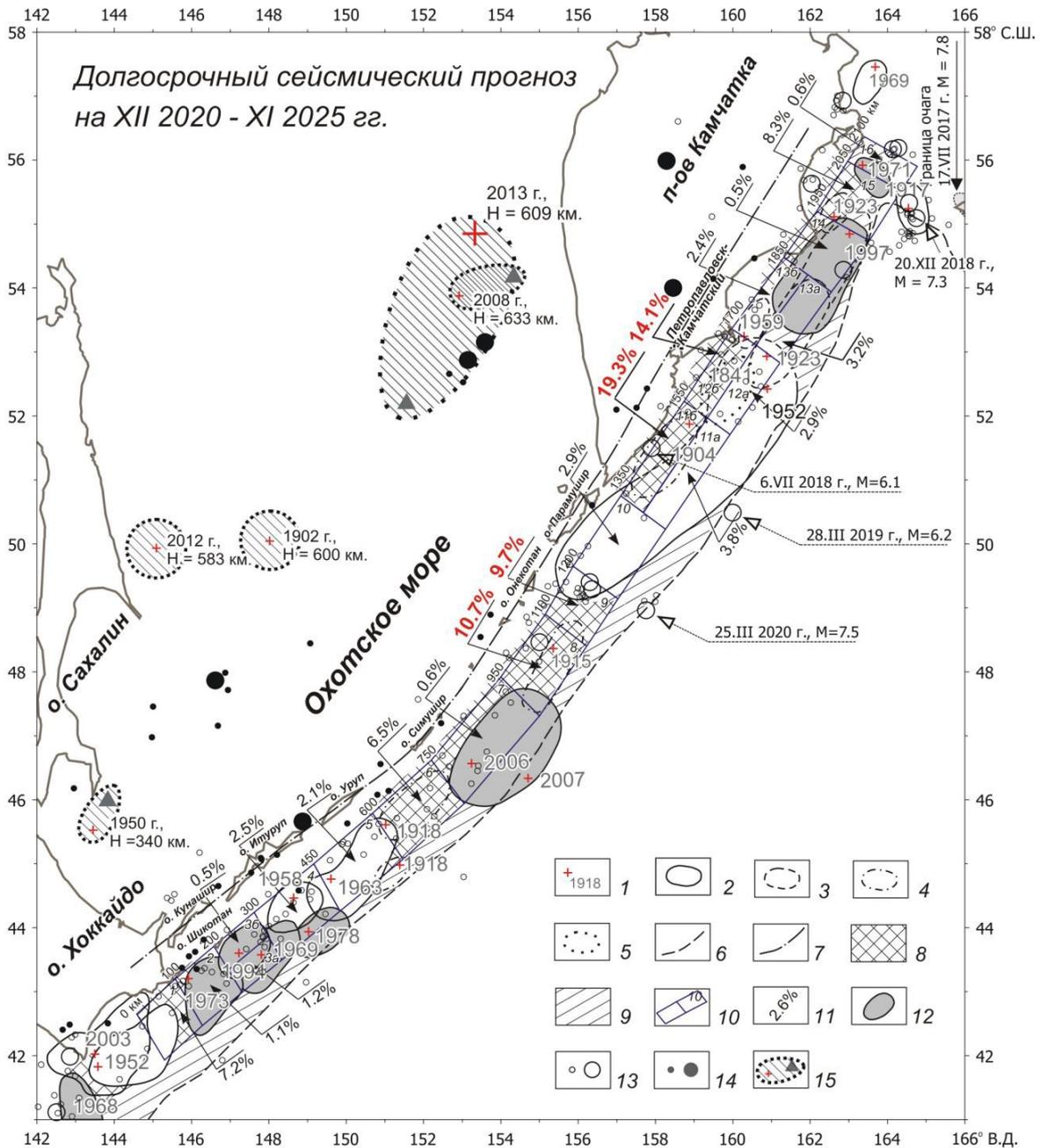


Рис. 1. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, очагов сильнейших ( $M \geq 7.7$ ) курило-камчатских землетрясений 1902-2020 гг. и вероятностей возникновения неглубоких ( $H < 80$  км) таких землетрясений в XII 2020 – XI 2025 гг. во всех участках полосы прогноза. 1 – инструментальные эпицентры землетрясений и годы их главных толчков; 2-5 – границы очагов произошедших сильнейших землетрясений, проведенные с разной точностью; 6-7 – оси глубоководных желобов и вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 8-9 – наиболее вероятные и возможные места следующих сильнейших землетрясений; 10 – границы и номера участков прогноза; 11 – вероятности неглубоких сильнейших землетрясений в XII 2020 – XI 2025 гг.; 12 – области очагов сильнейших землетрясений, которые произошли в предсказанных ранее сейсмических брешах; 13 – эпицентры неглубоких ( $H < 80$  км) землетрясений, произошедших в период XI 2015 г. – XI 2020 г., меньший кружок соответствует землетрясениям  $mb = 5.0-5.9$ , больший –  $mb = 6.0-7.3$ ; 14 – то же с  $H \geq 80$  км; 15 – эпицентры и предположительные области очагов произошедших глубоких ( $H > 300$  км) сильнейших землетрясений, треугольники – положение их главных афтершоков. Средняя вероятность возникновения сильнейших курило-камчатских землетрясений в одном месте в течение 5 лет равна 3.6-4.2 %.

## 2. Среднесрочный прогноз сейсмической опасности в области Южная Камчатка – район о-ва Парамушир и возможности ее краткосрочного уточнения

Концепция решения проблемы сочетания надежности и точности сейсмического прогноза в настоящее время представлена в предложенном более полувека назад академиком С.А. Федотовым методе долгосрочного прогноза для Курило-Камчатской дуги и, в первоначальном варианте, для Северо-Восточной Японии (метод ДССП).

Базовая идея этой концепции заключается в комплексном, системном подходе к проблеме прогноза сильнейших землетрясений. При этом долговременные, наиболее устойчивые, закономерности развития их очагов представляются одновременно как базовым элементом изучения механизма развития сейсмотектонической активности, так и основой долгосрочного прогноза, а затем среднесрочного и краткосрочного уточнения сейсмической опасности.

Для подобного уточнения сейсмической опасности в настоящей работе рассмотрена важнейшая характеристика развития очаговой зоны сильнейшего события – энергетический спектр сейсмического процесса как отражение численного вклада в сейсмический процесс землетрясений различного энергетического уровня, а ее первым приближением является линейный по определению закон Гутенберга-Рихтера. В отличие от такого упрощенного представления, в работе предполагается закономерная нелинейность указанного спектра.

В работе изложена методика определения указанной новой характеристики на основе модели обобщенного энергетического класса. Это также новый вводимый параметр, главными достоинствами которого являются свобода от методических особенностей построения магнитудных шкал и энергетических классов землетрясений, а также полное соответствие в среднем закону Гутенберга-Рихтера с наклоном  $\gamma = 0.5$ . Такой подход был обоснован в предыдущих работах, и он позволяет существенно упростить процесс объединения данных по различным регионам.

Ранее, для получения наиболее детальных и надежных результатов использованы три следующих метода расчета наклона графика повторяемости  $\gamma$  (два последних соотношения являются регрессионными):

$$\gamma = \lg(e) / \sum_i^N \left( \sum_{i=1}^N K_i / N - K_{\min} \right) [4]; \quad (1)$$

$$\lg(i/N) \sim \gamma \cdot (K_i - K_{\min}) \text{ (закон Гутенберга-Рихтера);} \quad (2)$$

$$K_i - \lg(E_{med}^i) \sim \gamma \cdot (K_i - K_{\min}) [1]; \quad (3)$$

где  $K_i$  – обобщенный энергетический класс землетрясений в выборке из  $N$  элементов и  $K_{\min}$  – минимальное его значение;  $E_{med}^i = \left( \sum_{n=1}^i E_n \right) / I$  – средняя энергия по энергетическому диапазону от  $K_{\min}$  до  $K_i$ , включительно, при этом  $E_n = 10^{K_n}$  – энергия, соответствующая энергетическому классу  $K_n$ .

Важнейшим результатом этой работы является выявление пикообразного роста наклона графика повторяемости в области относительно слабых землетрясений в интервале 5-10 лет перед сильнейшим событием, а также его уменьшения непосредственно перед ним (рис. 2) на основе соотношения (1), наилучшим образом представляющего график повторяемости в области слабых и средних землетрясений. Отмеченные пиковые аномалии, предположительно, носят квазипериодичный характер, который может по-разному проявляться в разных регионах.

В настоящей работе подобное исследование проведено в применении к району: юг Камчатки – о-в Парамушир (см. рис. 1), где ранее неоднократно (последний раз осенью 2018 г.) наблюдались сейсмические активизации, рассматриваемые в качестве краткосрочного признака увеличения вероятности сильнейшего землетрясения.

Дополнительно в работе рассмотрены закономерные в развитии сейсмического процесса понижения наклона графика и отмечено их значение при среднесрочно-краткосрочном уточнении опасности сильнейших землетрясений. В целом, указанные

вариации наклона графика повторяемости связываются с геофлюидодинамическим представлением сейсмоактивной среды, включающим процессы ее насыщения флюидами глубинного происхождения в условиях сверхвысокого геостатического давления, вследствие чего они способны существенно активизировать процесс разрывообразования. В качестве альтернативного механизма процесса, приводящего к осушению пород, рассматривается явление дилатансии.

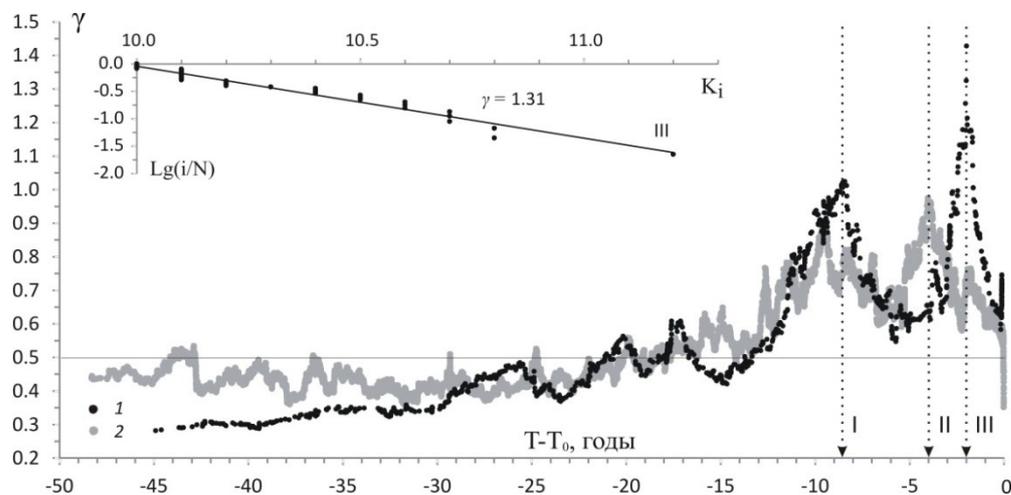


Рис. 2. Временной ход наклона графика повторяемости  $\gamma$  в очаговых областях сильнейших землетрясений. I – вариации параметра  $\gamma$  на основе выражения (1) для выборок по очагам сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги и прилегающих регионов; 2 – то же по очагам других регионов Тихого океана и Юго-Восточной Азии. На врезке – график повторяемости для данных по очагам сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги и прилегающих районов в диапазоне времени до сильнейшего события  $\Delta T = 1.5 \div 2.8$  года (пик III).

Основной итог этой части исследования заключается в дополнении приведенных данных ДССП среднесрочным сценарием изменений опасности сильнейшего землетрясения в районе юг Камчатки – остров Парамушир, где подобное событие может вызвать 7-8 балльные сотрясения в г. Петропавловск-Камчатский и сотрясения до 9 баллов с мощным цунами в районе Парамушира, а также в указании методик краткосрочного мониторинга этой опасности.

Работа велась по Проекту РФФИ № 21-55-50003 ЯФ\_а «Магматический фрактинг и флюидные потоки в вулканических структурах» и Проекту ИВС ДВО РАН АААА-А20-120121090010-7.

### Список литературы

1. Соломатин А.В. Закон повторяемости землетрясений и энергетический баланс сейсмического процесса // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 39. № 4. С. 39-48.
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 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.
4. 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.