

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на X 2019 – IX 2024 гг.; развитие методики мониторинга сейсмического процесса на основе энтропийных оценок

А.В. Соломатин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: alf55@mail.ru

Приведены результаты работ по методу долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) для Курило-Камчатской дуги и пятилетний прогноз на период X 2019 – IX 2024 гг. Показаны особенности развития сейсмического процесса с I 2019 г. В качестве развития методики выделения наиболее сейсмически опасных участков Курило-Камчатской сейсмогенной зоны разработан и представлен информационно-энтропийный подход к оценкам статистических параметров сейсмичности.

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на X 2019 – IX 2024 гг. (по оценкам на октябрь 2019 г.)

Апробированный метод долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) основан на закономерностях размещения очагов сильнейших землетрясений (сейсмические бреши) и сейсмического цикла [2-4]. Последнее изложение метода ДССП, дополнений к нему, а также прогноз на VI 2019 – V 2024 гг. приведены в работе [6].

В соответствии с данными на основе регионального каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН за предыдущий пятилетний период, наиболее вероятными местами следующих сильнейших землетрясений с $M \geq 7.7$ и глубиной очагов $H \leq 80$ км на период X 2019 – IX 2024 гг. остаются (рисунок):

– 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 20.2 %;

– для Авачинского залива, участок 12б, вероятность такого землетрясения силой до 9 баллов в г. Петропавловск-Камчатский равна 14.7 %.

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 47.7 %.

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 26.5 %. Эта обширная сейсмическая брешь является второй по степени сейсмической опасности.

Отмечена повышенная сейсмическая опасность также в районе Камчатского залива (участок 15), где $P(M \geq 7.7) = 7.6$ %, и в районе мыс Сириха – п-ов Немуро (участок 1), где $P(M \geq 7.7) = 7.1$ %.

Участок 10 на Северных Курильских островах находится между двумя крупнейшими опасными сейсмическими брешами (рисунок), и по-прежнему характеризуется высокой сейсмической активностью. Возможно, что значительная его часть также окажется в области очага следующего сильнейшего землетрясения.

В остальных участках сейсмогенной зоны Курило-Камчатской дуги вероятность $P(M \geq 7.7)$ сопоставима со средней пятилетней – 3.6-4.2 %, или существенно ниже.

Таким образом, по данным на октябрь 2019 г. 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.

Сейсмологические данные за последний год показывают существенно повышенную сейсмическую активность в пределах практически всей сейсмоактивной зоны в районе восточного побережья Камчатки и о-ва Парамушир.

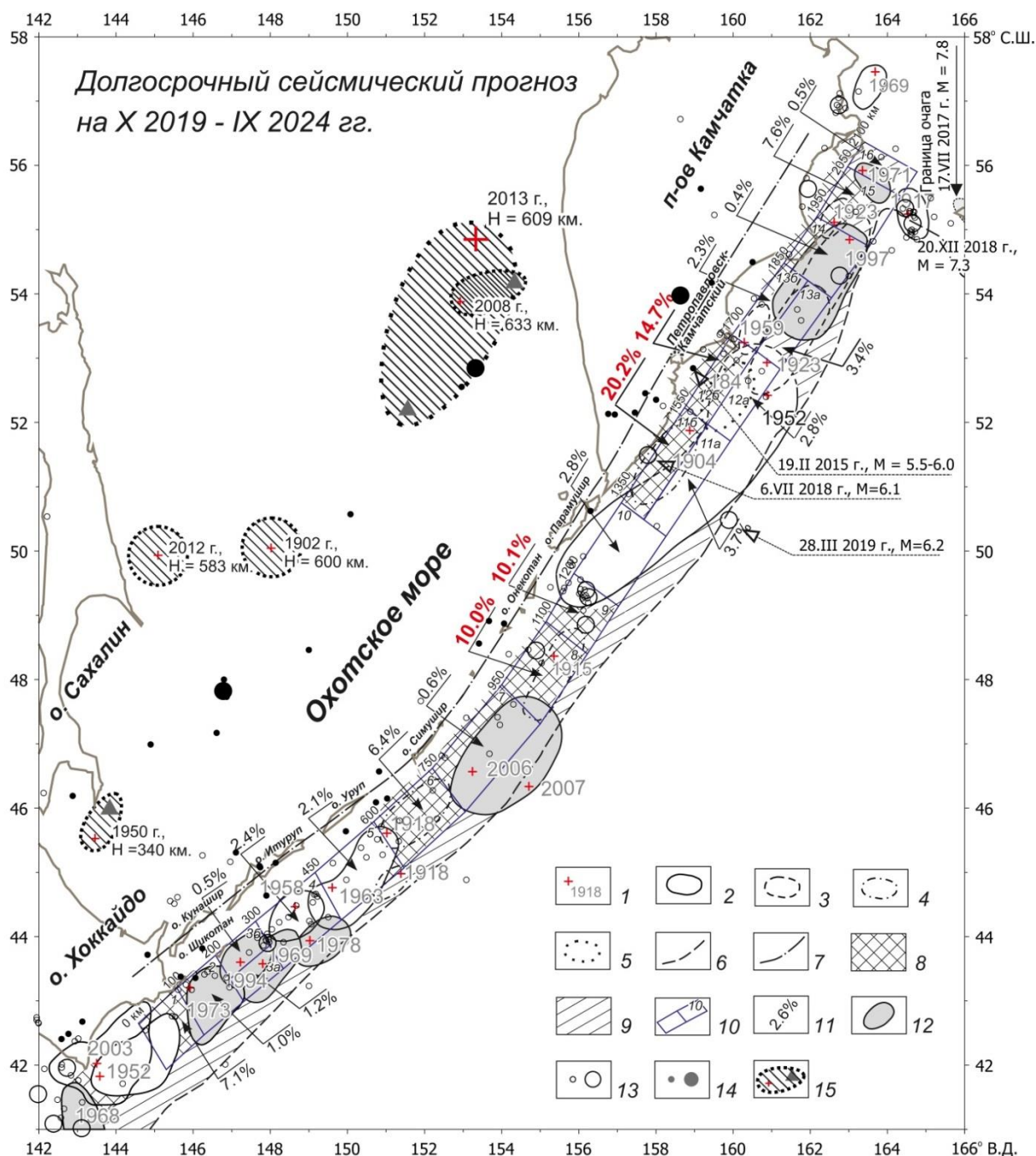


Рисунок. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, очагов курило-камчатских землетрясений 1902-2019 гг. с $M \geq 7.7$ и вероятностей возникновения неглубоких ($H < 80$ км) таких землетрясений в X 2019 – IX 2024 гг. во всех участках полосы прогноза. Условные обозначения: 1 – инструментальные эпицентры и годы главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$; 2 – границы очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с точностью 10 км; 3 – участки тех же границ, проведенные с меньшей точностью; 4 – вероятные области очагов землетрясений 1904-1918 гг. с $M \geq 7.7$; 5 – предполагаемая область очага 1841 г.; 6 – оси глубоководных желобов; 7 – ось вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 8 – наиболее вероятные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$; 9 – возможные места следующих таких землетрясений; 10 – границы и номера участков прогноза; 11 – вероятности неглубоких землетрясений $M \geq 7.7$ в X 2019 – IX 2024 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 IX 2014 г. – IX 2019 гг., меньший кружок, соответствует $mb = 5.0-5.9$, больший – $mb = 6.0-7.3$, $H < 80$ 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%. Использованы данные КФ и СФ ФИЦ ЕГС РАН и NEIC USGS.

Исследование развития сейсмического процесса на основе временных вариаций энтропийных оценок

Для оценок сейсмической опасности различных участков сейсмоактивной зоны, как и в предыдущей работе [5], предлагается рассмотрение временного хода кумулятивных параметров сейсмического процесса. Такой выбор определяется тем, что важной характеристикой сейсмичности является длительность вариаций представляющих ее параметров, что отражают именно интегральные характеристики.

Удобной для изучения случайных процессов является оценка энтропии Шеннона, имеющая необходимый для целей настоящей работы аддитивный вид, и отражающая степень однородности распределения в интервале $[0...1]$, определяемого в качестве вероятности некоторого параметра p :

$$S = - \sum p_i \cdot \ln(p_i). \quad (1)$$

Как показано ниже, в настоящей работе важна упорядоченность величин исследуемых параметров по времени: p_i – вероятность величины исследуемого параметра x , наблюдаемого в момент времени t_i на основе соответствующей выборки наблюдений объемом N : $\{x_1 \dots x_N\}$.

Указанные вероятности p_i могут быть получены дискретизацией параметра $x(t_i)$ с некоторым интервалом Δ :

$$x(t_i) - \Delta/2 \leq x_i < x(t_i) + \Delta/2. \quad (2)$$

При этом вероятность p_i определяется на основе выражения:

$$p_i = \sum \delta(x_i, x_j) / N, \quad (3)$$

где суммирование ведется по индексу j в интервале $[1 \dots N]$, а $\delta(x_i, x_j)$ – функция Кронекера, равная 1, если $x_i = x_j$, и нулю – в противном случае.

Для получения величин p_i возможно также использование более общих выборок, которые могут считаться в этом случае генеральными совокупностями, или обоснованных аналитических зависимостей. В этом случае результат будет в большей степени определять особенности исследуемой выборки на фоне всех данных, которые предполагается использовать, а дискретизация может быть более точной.

Для дискретизации наблюдаемых параметров, которые, как правило, имеют выраженное нелинейное распределение, можно применить их преобразование в промежуточные вероятностные оценки, интегральное распределение которых достаточно близко к интегральному равномерному. В настоящей работе, как и ранее в [5], предлагаются известные законы: экспоненциальное распределение или распределение Вейбулла-Гнеденко – для промежутков времени между последовательными событиями, и закон повторяемости землетрясений – для их величин.

Наряду с общими оценками энтропии S по исследуемой выборке в целом, важное, как предполагается, значение имеет временной ряд $S_i = S(t_i)$, в котором суммирование производится на множестве $\{p_1 \dots p_i\}$, соответствующем упорядоченному множеству моментов наблюдения $\{t_1 \dots t_i\}$:

$$S_i = - \sum p_j \cdot \ln(p_j), \quad (4)$$

Такой подход на основе кумулятивных рядов, неоднократно использованный автором ранее, для энтропийных оценок, как правило, не применяется, вероятно, из-за недооценки возможностей интегральных кривых. Тем не менее, построенный таким образом ряд отражает временную структуру вариаций энтропии S в ходе развития сейсмического процесса. Можно показать, что в случае использования в качестве исследуемого параметра x энергетических классов, вариации K_S , ход кривых энтропии S^K с большой точностью отражает изменения функции от оценок наклона графика повторяемости, полученных на основе метода максимального правдоподобия [7]:

$$\gamma = \text{Lg}(e) / (K_{cp} - K_{мин.}), \quad (5)$$

где $K_{мин.}$ – минимальный уровень используемого в наблюдениях энергетического класса.

Можно предположить, что в этом случае энтропия S^K , в качестве функции состояния системы, отражает временные вариации режимов сейсмического течения [1].

В случае наиболее сильных ($M = 8-9$) землетрясений заметные вариации S^K , отражающие подготовку сейсмоактивной среды в области будущего очага, носят долгосрочный характер. Это очень важно для задачи долгосрочного уточнения наступления III, завершающей стадии сейсмического цикла в методе ДССП, но недостаточно для среднесрочных и краткосрочных оценок сейсмической опасности.

Таким образом, мониторинг состояния сейсмоактивной области на основе параметра S^K должен быть дополнен другими данными. В частности, предлагаются результаты работы [6], а также новый параметр – на основе энтропии S^T , строящийся по предложенной выше схеме, где в качестве наблюдаемого параметра выбран временной интервал между последовательными землетрясениями $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ в некоторой пространственной области. Как предполагается, такой параметр отражает степень взаимодействия землетрясений на основе модели распределения Вейбулла-Гнеденко или другого, близкого по свойствам распределения. Здесь, как и в случае энтропии S^K , важно отметить, что предлагаемая схема достаточно гибка и устойчива относительно выбора статистической модели. В случае реально наблюдаемой неопределенности и сильной неоднородности свойств сейсмического процесса такую устойчивость можно отнести, скорее, к достоинствам предлагаемого метода.

При построении указанных оценок энтропии S^K или S^T , в зависимости от масштаба рассматриваемых явлений, рассматриваемая область может быть ограничена как небольшими активизациями, так и значительно большими зонами предполагаемых очагов готовящихся землетрясений, и вплоть до всего Камчатского участка сейсмогенной зоны. Кроме того, важны ограничения по глубине используемых сейсмических событий, т.к. на разных глубинах сейсмичность отражает принципиально разные стороны сейсмотектоники.

В целом, полученные в работе результаты являются существенным развитием предложенных ранее подходов, направленных на повышение надежности и точности прогнозов сейсмической опасности на основе метода ДССП.

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

Список литературы

1. *Востриков Г.А.* Связь параметров графика повторяемости, сейсмического течения и очага землетрясения. М.: ГИН РАН, 1994. 292 с. (Тр. ГИН; Вып. 482).
2. *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.
3. *Федотов С.А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121-150.
4. *Федотов С.А.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
5. *Федотов С.А., Соломатин А.В., Кирюхин А.В.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на XI 2018 – X 2023 гг.; развитие методики мониторинга сейсмического процесса // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXII Всероссийской научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, 28-29 марта 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019 г. С. 132-135.
6. *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.
7. *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.