

Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил

© 2021 А. И. Малышев*, Л. К. Малышева

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

**E-mail: malyshev@igg.uran.ru*

Резюме. В работе описан алгоритм и результаты оценки сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил на основе данных Японского регионального каталога (ЖМА). В качестве математической модели используется нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка; алгоритмы оптимизации и оценки прогнозируемости представлены авторскими разработками. В основу алгоритма прогнозирования заложен поиск зон сейсмической активности, в которых текущие тренды активности соответствуют форшоковым последовательностям, зафиксированным перед уже произошедшими сильными землетрясениями (прецедентами). Время землетрясения рассчитывается экстраполяцией обнаруженных трендов до уровня активности, имевшего место в момент прецедентного землетрясения. На примере прецедентных форшоковых последовательностей Японии показано, что заблаговременность подобного прогноза достигает 10–15 лет, а его реализация обусловлена сохранением и устойчивостью выявленных трендов. Приведена карта потенциально опасных зон для Сахалина и Курильских о-вов и некоторые примеры расчета времени сильных землетрясений по данным каталога ЖМА на 31 августа 2018 г. Рассмотрены этапность действий при выявлении потенциально опасных трендов сейсмической активности и специфика возможного использования методики в Сахалинской области.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмическая энергия, форшоки, прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности

Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region

Aleksandr I. Malyshev, Lidiia K. Malysheva*

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia

**E-mail: malyshev@igg.uran.ru*

Abstract. The paper describes the algorithm and the results of the seismic hazard estimate in the Sakhalin and Southern Kurils region based on the data of the Japan Regional Catalogue (JMA). A nonlinear differential equation of the second order is used as a mathematical model, and algorithms for optimization and predictability estimation are presented by the author's solutions. The forecasting algorithm is based on the search for seismic activity zones in which the current activity trends correspond to foreshock sequences recorded before strong earthquakes (precedents) that have already occurred. The earthquake time is calculated with extrapolating the detected trends to the level of activity that occurred at the time of the precedent earthquake. By the example of precedent foreshock sequences in Japan, it is shown that the lead time of such a forecast reaches 10–15 years and its implementation is due to the preservation and stability of the identified trends. A map of potentially dangerous zones for Sakhalin and the Kuril Islands and some examples of calculating the time of strong earthquakes according to the JMA catalogue as of August 31, 2018 are presented. Action sequence in identifying the potentially dangerous trends in seismic activity and the specifics of possible use of the technique in the Sakhalin region are considered.

Keywords: earthquake, seismic energy, foreshock, precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard

Для цитирования: Малышев А.И., Малышева Л.К. Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 2, с. 84–112. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.084-098.099-112>

For citation: Malyshev A.I., Malysheva L.K. Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 84–112. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.084-098.099-112>

Благодарности и финансирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН АААА-А19-119072990020-6.

Acknowledgment and Funding

The study was carried out within the framework of the state assignment of the IGG UB RAS No. АААА-А19-119072990020-6.

Введение

Поток сейсмической энергии землетрясений E показывает хорошую прогнозируемость [Малышев, Малышева, 2018; Малышев, 2019 а, б; Малышев, 2020] при использовании в качестве модели уравнения динамики саморазвивающихся природных процессов (уравнения ДСПП, см. ниже). Полученные результаты продемонстрировали хорошие перспективы аппроксимационно-экстраполяционного подхода для прогноза как самих сильных землетрясений, так и последующего афтершокового затухания сейсмической активности. При обобщении полученных результатов было установлено [Малышев, Малышева, 2019], что область значений параметров α и k в уравнении ДСПП, определяющих форшоковую прогнозируемость сильных землетрясений, смещена относительно всей области прогнозируемости в левую нижнюю часть диаграммы α – $\lg|k|$ (рис. 1), т.е. туда, где локализуются фигуративные точ-

ки наиболее медленно развивающихся и длительных процессов активизации. Это делает возможным дифференциацию трендов активизации потока сейсмической энергии по параметрам α и k , с одной стороны, на условно безопасные (не имеющие прецедентов завершения сильными землетрясениями), а с другой – на потенциально опасные, заслуживающие пристального внимания в связи с наличием прецедентов (нередко неоднократных) завершения этих трендов сильными землетрясениями.

Обработка данных каталога Японского метеорологического агентства (ЖМА) показала¹, что прогнозируемая активизация потока сейсмической энергии предшествует 123 (из 676) сильным ($M \geq 7$) землетрясениям. Обнаружено 87 536 прецедентов попадания этих землетрясений в полосу допустимых ошибок при ретроспективной экстраполяции форшоковых трендов в «будущее». В частности, самое сильное землетрясение из этого числа – землетрясение

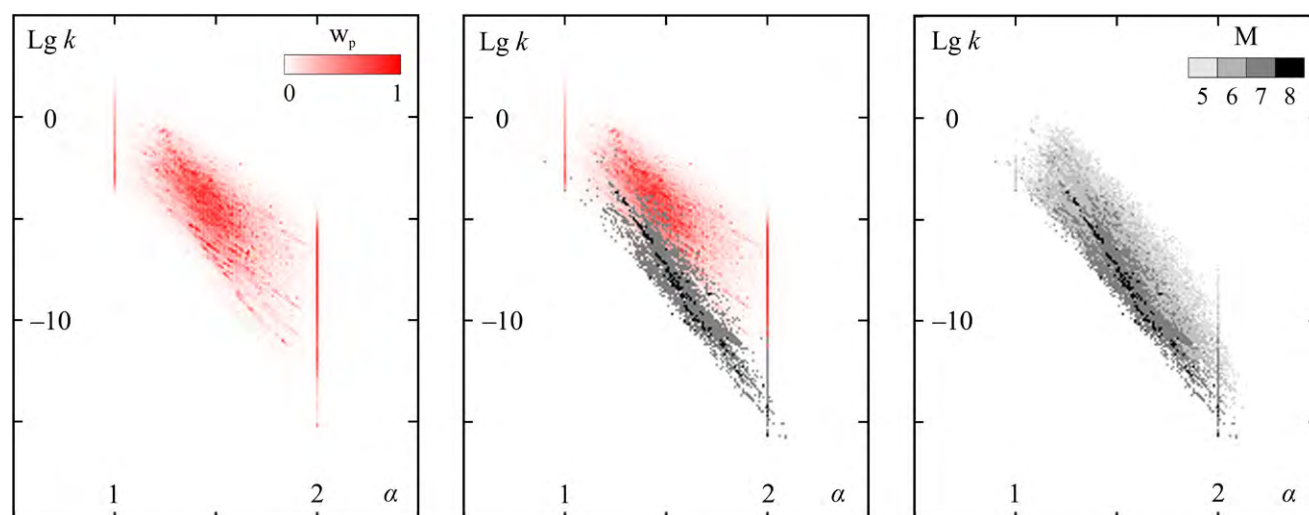


Рис. 1. Распределение удельного веса прогнозируемости w_p для активизации потока сейсмической энергии (слева), форшоковой прогнозируемости сильных землетрясений (справа) и их совмещение (в центре) в координатах α – $\lg|k|$ параметров уравнения ДСПП, по [Малышев, Малышева, 2019].

¹ Малышев А.И., Малышева Л.К. Форшоковая прогнозируемость сильных землетрясений Японии по потоку сейсмической энергии (направлена для публикации в журнал «Физика Земли»).

Тохоку ($M = 9.0$) – имеет 150 прецедентов попадания в полосу ретропрогнозных экстраполяций.

В распределении ретропрогнозных прецедентов по их заблаговременности более 20 % ретропрогнозов имеют заблаговременность от 3 до 10–15 и более лет. Еще почти 45 % ретропрогнозов имеют заблаговременность от 3 мес. до 3 лет. Несмотря на большую полосу ошибок при моделировании потока энергии (по сравнению с «условными деформациями» и числом событий [Малышев, 2019б]), столь высокая заблаговременность обуславливает достаточно высокую точность прогнозирования в этих диапазонах. Причем именно в диапазоне более 3 лет заблаговременность превышает отклонение по времени в момент толчка в среднем в 5.82 раза, а для наиболее точного ретропрогноза этого диапазона – в 37.18 раз. Этот факт свидетельствует о возможности средне-долгосрочной количественной оценки опасности сильных землетрясений.

В данной работе выполнена детализация результатов оценки сейсмической опасности на основе каталога ЖМА применительно к району Сахалина и Южных Курил, а также обсуждаются перспективы использования сахалинских региональных каталогов в этих целях.

Методы исследования

В работе используется уравнение ДСПП [Малышев, 1991]:

$$x'' = k |(x')^\lambda - (x'_0)^\lambda|^{a/\lambda}, \quad (1)$$

где x – расчетная характеристика процесса, моделирующая имеющиеся фактические данные, x' и x'' – ее первая и вторая производные по времени t , k – коэффициент пропорциональности, а показатели степени λ и a определяют нелинейность процесса, соответственно, в окрестностях стационарного состояния ($x' \approx x'_0$) и на значительном от него удалении ($x' \gg x'_0$).

Для прогноза потенциально катастрофических процессов наиболее интересен случай $x' \gg x'_0$. Поэтому в качестве аппроксимационной модели имеет значение уравнение

$$x'' = k (x')^a. \quad (2)$$

Линейность решений уравнения (2) в обычных или логарифмических координатах упрощает поиск наилучшего соответствия (оптимизацию) между частным решением уравнения (2) и аппроксимируемыми им фактическими данными [Малышев, 2019а].

Пространственный анализ сейсмических данных осуществляется по сферическим гипоцентральному выборкам с радиусами 1.5, 3, 7.5, 15, 30, 60, 150 и 300 км. Центры выборок фиксированы и распределены по широте, долготе и глубине с шагом смещения, в 1.5 раза меньшим радиуса выборки (т.е. соответственно 1, 2, 5, 10, 20, 40, 100 и 200 км), что обеспечивает пространственное перекрытие выборок и исключает пропуск данных для прогностических оценок. В ретроспективных исследованиях каждое событие анализируемого каталога последовательно рассматривается как «текущее» событие. Момент времени этого события принимается за «настоящее». Время, предшествовавшее данному событию, считается «прошлым», а последующее время – «будущим». Под прогнозируемостью здесь и далее понимается нахождение фактических данных «будущего» в полосе допустимых ошибок относительно расчетной кривой в ее экстраполяционной части. Для оценки прогнозируемости используется среднее отклонение σ фактических точек от расчетной кривой по нормали в координатах, нормированных на диапазон от 0 до 1. Затем аппроксимация экстраполируется в «будущее» до тех пор, пока нормальное расстояние каждой последующей (прогнозируемой) фактической точки до расчетной кривой находится в полосе допустимых ошибок ($\pm 3\sigma$) [Малышев, 2016].

Относительная точность прецедентных прогнозов оценивается по формуле $\Delta = (t_{sh} - t_c)/\sigma_t$, где t_{sh} – время главного толчка, t_c – текущее время (момент прогноза), σ_t – среднее отклонение по времени фактических данных от расчетной кривой в ее ближайшей к главному толчку точке. Помимо этого, для прецедентных ретропрогнозных определений и прогнозных экстраполяций имеют значение еще две количественные характеристики – прогнозная нелинейность L_{pn} и аппроксимационно-экстраполяционное соотношение A . Первая характеристика, как будет показано ниже на примере прецедентных ретропрогнозов, отражает стохастичность/детерминированность положения главного толчка относительно его расчетной кривой. Она рассчитывается по формуле

$$L_{pn} = 2 [\Delta_x - (\Delta_x + \Delta_t)/2] / (\Delta_x + \Delta_t), \quad (3)$$

где $\Delta_x = (x_{sh} - x_1)/(x_c - x_1) - 1$, $\Delta_t = (t_{sh} - t_1)/(t_c - t_1) - 1$; x_1 и t_1 , x_c и t_c , x_{sh} и t_{sh} – соответственно, значения параметра и времени в начальной точке

форшоковой последовательности, в точке прогноза и в момент главного толчка. При этом в случае ретропрогнозов используются фактические значения x_{sh} и t_{sh} , тогда как при прогнозных экстраполяциях – их расчетные величины. Для форшоковых последовательностей величина L_{pn} варьирует от 0 до 1.

В свою очередь аппроксимационно-экстраполяционное соотношение A показывает, во сколько раз полный форшоковый тренд превышает свою аппроксимационную составляющую в координатах полного тренда, нормированных на диапазон от 0 до 1. Статистический анализ этого соотношения выполнен по прецедентным ретропрогноzym определениям и используется для оценки предела прогнозных экстраполяций. В общем случае значение A может быть определено по соотношению длин соответствующих участков расчетной кривой, однако в случае ступенчатых накопительных характеристик сейсмического потока (энергии, условных деформаций или числа событий) более простым и вполне эффективным оказывается расчет по формуле

$$A = 2 / [(x_c - x_1) / (x_{sh} - x_1) + (t_c - t_1) / (t_{sh} - t_1)]. \quad (4)$$

Для форшоковой ретропрогнозируемости сильных землетрясений Японии аппроксимационно-экстраполяционное соотношение не превышает значения $A = 2.47$.

Закономерности прецедентной форшоковой подготовки сильных ($M \geq 7$) землетрясений делают возможными выявление аналогичных трендов нарастания сейсмической активности и их последующую экстраполяцию на базе каталога JMA, несмотря на существующую 2-летнюю задержку его пополнения оперативной сейсмической информацией. Прогнозная оценка опасности этих трендов предполагает использование данных прецедентных ретропрогнозов и базируется на возможности привязки времени главного толчка к скорости изменения параметра x'_{sh} в ближайшей к главному толчку точке экстраполяционной кривой. Для этого создается база данных прецедентных ретропрогнозов с включением в нее информации о гипоцентральной радиусе выборки, показателе степени α и коэффициенте k уравнения (2), скорости изменения параметра x'_{sh} в ближайшей к толчку расчетной точке тренда, а также информации о прецедентном главном толчке (магнитуда, локализация в пространстве и во времени).

Суть прецедентно-экстраполяционной оценки сейсмической опасности сводится к выявлению потенциально опасных пространственных зон, в которых наблюдается такое нарастание сейсмической активности, которое имеет исторические прецеденты завершения сильным землетрясением. Количественная сторона прогноза соответствует расчету возможного времени аналогичного землетрясения на основе базы данных его прецедентных прогнозов. Поскольку для каждого типа активизации, определяемого радиусом выборки и значениями показателя степени α и коэффициента k в уравнении (2), подобных прецедентов может быть несколько, соответствующие расчеты возможного времени выполняются для каждого из них.

Алгоритм прогнозных экстраполяций предусматривает следующие операции.

1. Поиск в каталоге незавершенных (не вышедших из полосы допустимых ошибок на момент конца каталога) прогнозных определений, в которых обнаруживается тенденция к нарастанию сейсмической активности.

2. Сопоставление типа нарастания активности с базой данных прецедентных ретропрогнозов по радиусу выборки, показателю степени α (с точностью до 0.01) и коэффициенту k (при сравнении $\lg k$ с точностью до 0.1). Все случаи нарастания активности, не имеющие аналогов в базе данных прецедентных ретропрогнозов, игнорируются.

3. Оставшиеся случаи проверяются на прецеденты сильных толчков по ретроспективной базе данных. При этом из рассмотрения исключаются все прецедентные случаи прогноза, для которых скорость изменения параметра на момент прецедентного толчка x'_{sh} меньше текущей (на момент завершения каталога) скорости x' ($x'_{sh} < x'$). Смысл этого ограничения сводится, во-первых, к исключению из рассмотрения постшоковой активности (начальной стадии афтершоковых последовательностей, которая попадает в полосу допустимых ошибок форшоковой активизации), а во-вторых, к акцентированию внимания на ранних стадиях форшоковой подготовки ($x' \ll x'_{sh}$), где относительная точность прогноза наиболее высока.

4. Для каждого прецедентного ретропрогноза по скорости изменения параметра x'_{sh} рассчитывается время t_{sh} и значение параметра x_{sh} , при которых для данного типа нарастания активности ее уровень будет соответствовать уровню прецедентного толчка:

$$t_{sh} = T_a - x'_{sh}{}^{1-\alpha} / [k(1-\alpha)] \text{ при } \alpha \neq 1$$

$$\text{или } t_{sh} = t_1 + \ln(x'_{sh} / x'_1) / k \text{ при } \alpha = 1, \quad (5)$$

$$x_{sh} = X_a - x'_{sh}{}^{2-\alpha} / [k(2-\alpha)] \text{ при } \alpha \neq 2$$

$$\text{или } x_{sh} = x_1 + \ln(x'_{sh} / x'_1) / k \text{ при } \alpha = 2. \quad (6)$$

Затем рассчитываются уровень прогнозной нелинейности L_{pn} , аппроксимационно-экстраполяционное соотношение A и ожидаемое отклонение по времени σ_t фактических данных от расчетного тренда в момент главного толчка. Значение этого ожидаемого отклонения определяется из среднего отклонения по нормализованным данным и пересчитывается на отклонение по времени в расчетной точке (t_{sh}, x_{sh}) прецедентного толчка. Определения, для которых $A > 2.47$, исключаются из рассмотрения как не имеющие прецедентов.

5. Обнаруженные прецедентные ретропрогнозы группируются по главному толчку. Для каждой группы определяется среднее расчетное время толчка, его среднеквадратическое отклонение σ_{sh} , а также средние значения L_{pn} , A и σ_t .

Исходные данные

В качестве исходных данных в работе используется каталог землетрясений Японского

метеорологического агентства (JMA), включающий данные с 1923 г. по конец августа 2018 г.³ К этому моменту каталог содержал сведения о 3 498 071 землетрясении с магнитудой $M = -1.6 + 9.0$ при ее модальном значении 0.6. В качестве параметра x рассматривается поток сейсмической энергии E , т.е. накопительная сумма энергии землетрясений. При этом энергия одиночного землетрясения оценивается согласно имеющейся зависимости между его магнитудой M и энергетическим классом K [Kanamori, 1977]: $K = 1.5 M + 4.8$.

Результаты и обсуждение

Примеры ретропрогнозных экстраполяций, имеющих достаточно высокую относительную точность Δ и существенные различия по прогнозной нелинейности L_{pn} , приведены на рис. 2. Табл. 1 содержит данные о главном толчке, выборке и некоторых характеристиках форшокового тренда, соответствующие этим примерам. Первые три графика наглядно иллюстрируют высокую заблаговременность этих форшоковых ретропрогнозов (от 5 до 20 лет), тогда как 4-месячная заблаговременность ретропрогноза 4 соответствует средне-краткосрочному диапазону прогнозирования. Также на рис. 2 можно

Таблица 1. Данные о главном толчке, выборке и некоторых характеристиках форшокового тренда для примеров ретропрогнозных экстраполяций, приведенных на рис. 1

		1	2	3	4
<i>Землетрясение</i>					
Дата		1936.11.03	2016.11.22	2010.02.27	2005.08.16
Время		05:45:57	05:59:46	05:31:25	11:46:25
M		7.4	7.4	7.2	7.2
Гипоцентр	широта	38.263°	37.355°	25.919°	38.150°
	долгота	142.062°	141.604°	128.680°	142.278°
	глубина, км	61	24.5	37	42
<i>Выборка</i>					
Радиус, км		300	30	60	30
Центр	широта,	40.588°	37.365°	26.175°	38.084°
	долгота,	141.854°	141.784°	128.743°	142.081°
	глубина, км	0	40	40	40
<i>Форшоковый тренд</i>					
$t_{sh} - t_c$, сут		1749.696	6989.198	5355.244	132.471
$\Delta = (t_{sh} - t_c) / \sigma_t$		16.8551	22.0833	65.0781	658.6533
L_{pn}		0.5645	0.9264	0.9896	0.9999
A		1.9900	2.3711	2.2984	2.0816
α		0.5918	2.0000	1.4827	2.0000
$\lg k$		1.9937	-14.8779	-8.4397	-11.9478

² В координатах от первой точки аппроксимационного участка до расчетного толчка, нормированных на диапазон от 0 до 1.

³ http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo_e.html; данные пополняются с задержкой около 2 лет.

видеть, что для низкой прогнозной нелинейности L_{pn} (график 1 на рис. 2) положение ступени сильного землетрясения в потоке энергии слабо детерминируется полосой допустимых отклонений. Сильное землетрясение в этой полосе могло бы произойти и существенно раньше, и много позже его фактического времени, т.е. стохастичность времени сильного толчка увеличивается с уменьшением прогнозной нелинейности. Последнее характерно для последовательностей активизации, близких к стационарному развитию. Напротив, с ростом прогнозной нелинейности (графики 2–4 на рис. 2) возрастает асимметрия полосы допустимых отклонений по параметру и времени. В результате ступень сильного землетрясения, требующая большого допустимого отклонения по параметру, все более жестко детерминируется сокращением интервала времени, в котором

сильный толчок может произойти. Эту изменчивость стохастичности/детерминированности процесса в зависимости от уровня прогнозной нелинейности L_{pn} необходимо учитывать в прогнозных экстраполяционных расчетах времени сильных землетрясений.

В результате анализа данных каталога ЖМА выявлено 186 зон, для каждой из которых имеется не менее 10 незавершенных (на 31 августа 2018 г.) прогнозных определений с потенциально опасным нарастанием сейсмической активности. Закономерности активизации в этих зонах имеют аналоги в форшоковой подготовке 759 землетрясений-прецедентов. Для оценки сейсмической и цунамиопасности на территории Сахалина и Южных Курил имеют значение зоны с локализацией севернее 40° с. ш. Здесь выявлено 15 потенциально опасных зон, тенденции развития сейсмичности

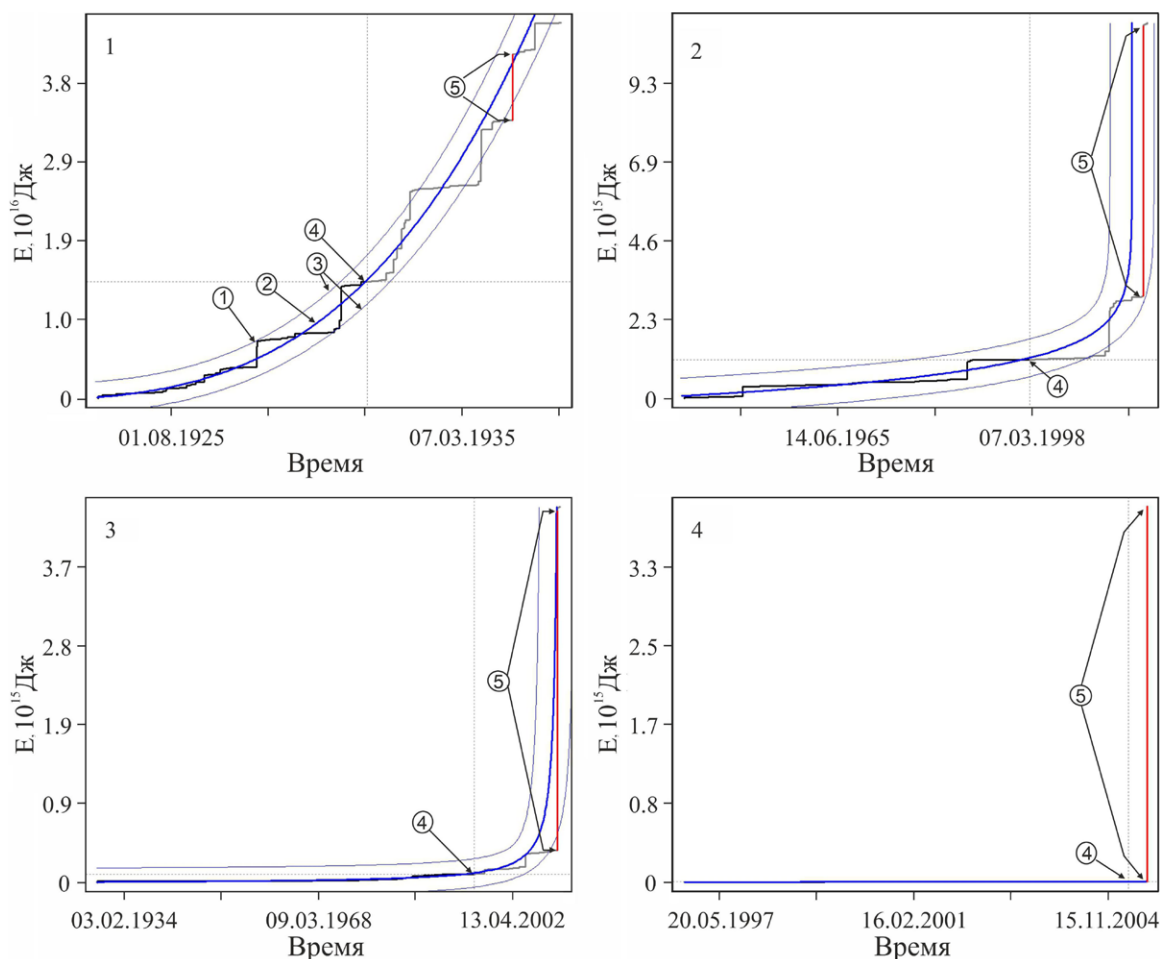


Рис. 2. Примеры некоторых форшоковых экстраполяций потока энергии. Цифры в кружках: 1 – кривая фактических данных, 2 – расчетная кривая, 3 – полоса ошибок ($\pm 3\sigma$), 4 – момент ретропрогноза, 5 – сильное землетрясение. Порядковые номера графиков соответствуют нумерации данных в табл. 1. Пересечение точечных вертикальных и горизонтальных линий на графиках соответствует «текущим» значениям времени и параметра, левее и ниже этого пересечения – «прошлое», правее и выше – «будущее».

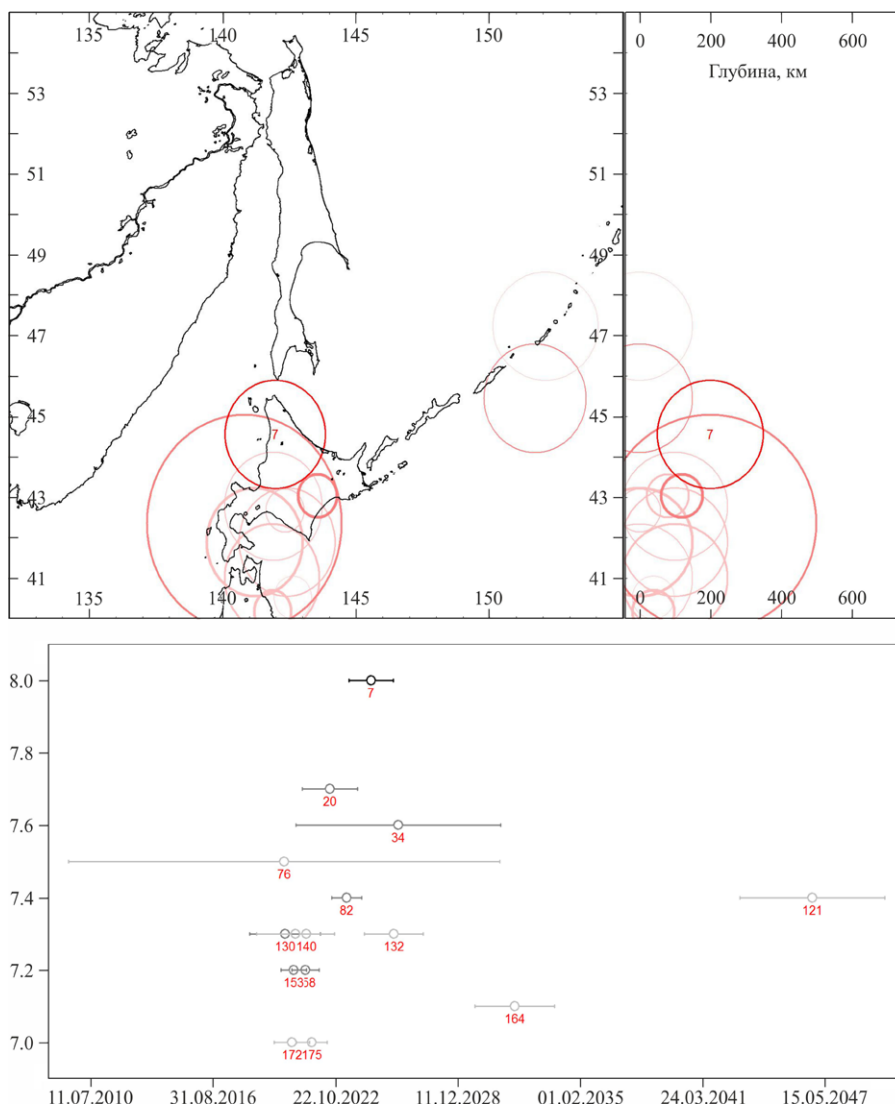


Рис. 3. Карта (вверху слева) потенциально опасных зон нарастания потока сейсмической энергии по состоянию каталога JMA на 31 августа 2018 г., ее меридиональный разрез-проекция (вверху справа) и временная развертка сейсмической опасности.

Окружностями показано положение выборок, в которых обнаружена потенциально опасная активность; яркость линии окружности отражает уровень опасности (по наиболее сильному из возможных при текущих закономерностях активизации землетрясению-прецеденту), а ее толщина – число обнаруженных потенциально опасных незавершенных прогнозных определений; номером 7 обозначена наиболее опасная зона, в которой незавершенные прогнозы имеют тенденции к активизации, аналогичные форшоковой подготовке сильных землетрясений вплоть до землетрясения-прецедента с $M = 8.0$.

Временная развертка сейсмической опасности составлена по самому сильному землетрясению-прецеденту каждой зоны; нумерация зон здесь и в табл. 2 в порядке убывания их опасности (по наиболее сильному прецедентному толчку) по всему каталогу JMA; ошибка расчетного времени прецедентного толчка показана по максимальному из значений $3\sigma_{sh}$ и $3\sigma_t$ (см. табл. 2); прецедентные толчки и их возможная ошибка во времени показана в пяти градациях оттенков от бледно-серого до черного в зависимости от уровня прогнозной нелинейности L_{pn} : (<0.5 , $0.5-0.8$, $0.8-0.95$, $0.95-0.99$, $0.99-1.00$), что отражает стохастичность/детерминированность взаимосвязи между временем толчка t_{sh} и скоростью изменения параметра x'_{sh} .

которых имеют аналоги в форшоковой подготовке 56 сильных землетрясений-прецедентов (рис. 3, табл. 2). Наибольшую опасность для рассматриваемой территории представляет тренд активности в зоне 7 (рис. 4), имеющей радиус 150 км и располагающейся на севере о. Хоккайдо в непосредственной близости к южной части о. Сахалин и областному центру Южно-Сахалинску. Развитие сейсмической активности в этой зоне имеет аналоги в форшоковой подготовке землетрясения с $M = 8.0$, произошедшего 21 декабря 1946 г. с эпицентром южнее мыса Сиономисаки. Расчетное время аналогичного толчка в зоне 7 соответствует 6 августа 2024 г. с допуском по ошибке времени ($3\sigma_{sh}$) немногим более года. Помимо этого, в зоне 7 возможны и менее сильные землетрясения, так как для некоторых незавершенных прогнозов этой зоны имеются прецеденты в форшоковой подготовке еще 6 сильных землетрясений уровня $M = 7.0-7.5$.

Текущие тренды развития сейсмической активности и их прогнозная экстраполяция для зон 20, 82, 153, 158 иллюстрируют (рис. 5) разнообразие прецедентно-экстраполяционных оценок сейсмической опасности в разных зонах. Естественно, что все 15 потенциально опасных зон заслуживают внимания. Однако полученные по этим зонам результаты следует рассматривать, скорее, как рабочие материалы для экспертных групп по оценке сейсми-

ческой опасности. Здесь прежде всего необходимо учитывать, что все приведенные здесь результаты прецедентно-экстраполяционных оценок являются условными, т.е. имеют смысл при условии, что обнаруженные потенциально опасные тенденции не вышли из полосы допустимых ошибок за период с августа 2018 г. по настоящее время (период текущей задержки данных в каталоге ЖМА) и сохраняют свою актуальность в ближайшем будущем.

Таким образом, метод аппроксимационного анализа и прогнозной экстраполяции на основе уравнения ДСПП на данном этапе можно и нужно использовать как первичный метод пространственной диагностики наличия опасных сейсмических трендов и оценки имеющихся резервов времени. Этот метод анализа и оценки логично встроить в сам процесс создания сейсмических каталогов, документирующих поток сейсмических событий. В этом случае, во-первых, любое пополнение данных каталога и/или их редактирование будут автоматически отражать текущую картину опасных трендов сейсмической активности, их появление или исчезновение (в случае выхода активности за пределы полосы допустимых отклонений тренда), а во-вторых, автоматизация прецедентно-экстраполяционных оценок делает в перспективе возможным использование этих оценок как самостоятельного прогностического метода на краткосрочном уровне заблаговременности.

Определенные основания для этого демонстрирует 4-й пример ретроспективных прогнозных экстраполяций на рис. 2 и в табл. 1. При 4-месячной заблаговременности этот ретропрогноз характеризуется в момент толчка средним отклонением по времени (σ_t) около 0.2 сут. То есть общая полоса допустимых ошибок $\pm 3\sigma_t$ в этом случае составляет всего 1.2 сут. Это, в свою очередь, делает практически возможным применение в опасный период кратковременных превентивных мер, например эвакуации населения на этот период из потенциально опасных зданий и сооружений и объявление повышенной готовности в цунамиопасных районах. Кроме того, подобные средне-краткосрочные прогнозы, как правило, имеют малый радиус пространственной лока-

лизации, что также облегчает их практическое использование.

В настоящее время число подобных ретропрогнозов в прецедентной базе невелико, однако существует возможность ее пополнения за счет результатов обработки других каталогов. Сильные землетрясения происходят редко, а качество и детальность регистрации сейсмической активности существенно увеличились в последние годы и десятилетия. В частности, каталог ЖМА за 80 лет наблюдений в XX в. содержит сведения лишь о 0.5 млн событий, тогда как за первые два десятилетия текущего столетия число зарегистрированных в нем землетрясений превысило 3.5 млн. Естественно ожидать, что детальная регистрация сейсмической подготовки сильных землетрясений в будущем неизбежно приведет к пополнению прецедентной базы более качественными данными. А это, в свою очередь, позволит распространить методику на краткосрочные прогнозные экстраполяции.

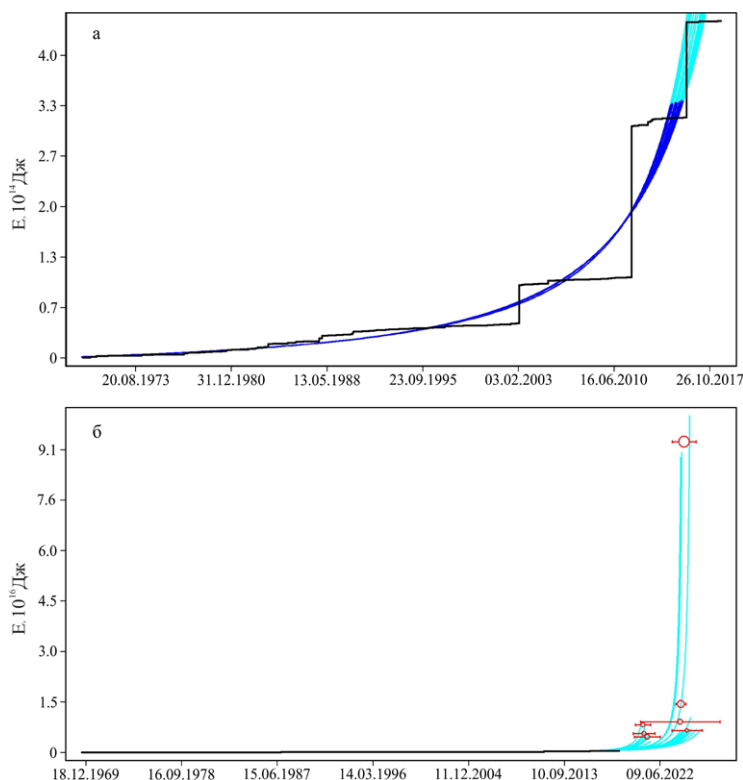


Рис. 4. Текущее (а) и прогнозируемое (б) развитие активности по потоку сейсмической энергии E в зоне 7. Здесь и на рисунках далее расчетные кривые трендов активности показаны более темным оттенком в аппроксимационной части тренда и более светлым – в экстраполяционной. Кружками обозначено расчетное положение прецедентных землетрясений, размер кружков зависит от магнитуды (в данном случае максимальная прецедентная магнитуда $M = 8.0$). Ошибка расчетного времени прецедентного толчка показана по максимальному из значений $3\sigma_{sh}$ и $3\sigma_t$ (см. табл. 2).

Таблица 2. Локализация зон с потенциально опасной активностью, результаты прогнозных вычислений и прецедентные сильные землетрясения

№ зоны	Современная потенциально опасная активность				Прогнозные вычисления						Прецедентное землетрясение							
	локализация				начало активизации	n	L_{pr} ср.	M_{pr}	n_{pr}	расчетная дата	ошибка, сут.		L_{pr}	A	время		гипоцентр	
	центр	Dep	Lon	Lat							R , км	$3\sigma_{sh}$			$3\sigma_t$	время	Lat	Lon
					Lat	Lon	Dep											
7	44.554	141.972	200.0	150	1969.07.28	30	0.9799	7.0	1110	2024.11.15	505	362	0.9796	2.2687	2011.04.11 17:16	36.946	140.673	6.4
								7.1	2	2020.12.14	107	359	0.9845	2.1313	1982.03.21 11:32	42.067	142.600	40.0
								7.1	2	2020.10.30	219	253	0.9894	2.1692	2004.11.29 03:32	42.946	145.275	48.2
								7.2	8	2021.03.25	95	438	0.9801	2.1087	2005.08.16 11:46	38.150	142.278	42.0
								7.2	29	2024.04.02	1325	284	0.9849	2.2769	2008.06.14 08:43	39.030	140.881	7.8
								7.5	1	2024.04.26	0	162	0.9913	2.3291	1993.01.15 20:06	42.920	144.353	100.6
								8.0	3	2024.08.06	403	25	0.9986	2.3960	1946.12.21 04:19	32.935	135.849	24.0
20	42.353	140.816	200.0	300	1997.02.10	43	0.6756	7.0	1951	2020.06.24	455	401	0.5905	1.3073	2011.11.08 11:59	27.298	125.739	217.0
								7.2	3225	2021.09.21	476	344	0.7004	1.5396	2010.02.27 05:31	25.919	128.680	37.0
								7.5	129	2022.07.03	504	196	0.8783	1.9613	1964.06.16 13:01	38.370	139.212	34.1
								7.6	43	2022.06.20	502	232	0.8456	1.8721	1984.03.06 11:17	29.343	139.202	452.0
								7.7	215	2022.07.08	504	139	0.9214	2.1037	1998.05.04 08:30	22.379	125.437	35.0
34	43.028	143.557	120.0	60	1931.08.21	81	0.9740	7.0	5	2019.05.02	37	629	0.9701	2.3226	1938.05.23 16:18	36.574	141.324	0.0
								7.0	1	2019.08.06	0	1203	0.9571	2.0814	1971.08.02 16:24	41.301	143.529	54.0
								7.0	3	2020.09.14	93	1115	0.9344	2.2294	2000.01.28 23:21	43.008	146.744	58.5
								7.0	2	2023.03.19	18	1054	0.9344	2.3167	2002.03.31 15:52	24.233	121.970	55.0
								7.0	8	2018.02.03	232	1252	0.9360	2.1092	2008.05.08 01:45	36.228	141.608	50.6
								7.0	123	2022.04.03	3921	980	0.9643	2.1835	2014.07.12 04:22	37.050	142.321	33.0
								7.1	1	2019.09.10	0	705	0.9766	2.1940	2004.11.29 03:32	42.946	145.275	48.2
								7.1	4	2018.10.06	116	1071	0.9640	2.0926	2008.09.11 09:20	41.776	144.152	30.9
								7.3	2	2024.04.21	35	634	0.9779	2.2906	1995.12.04 03:01	44.560	150.130	57.0
								7.3	8	2021.03.01	3891	594	0.9720	2.3581	2001.12.18 13:02	23.893	122.815	8.0
								7.6	122	2025.12.13	1873	317	0.9886	2.3941	2011.03.11 15:15	36.121	141.253	42.7
76	45.446	151.714	0.0	150	1925.02.20	19	0.4602	7.4	16	2024.03.20	260	3717	0.4736	1.3683	1978.06.12 17:14	38.150	142.167	40.0
								7.5	3	2020.03.25	569	3947	0.3886	1.2231	1993.01.15 20:06	42.920	144.353	100.6
82	40.159	141.882	40.0	60	1995.01.07	102	0.9400	7.0	68	2020.04.18	313	771	0.8758	1.7441	2002.03.31 15:52	24.233	121.970	55.0
								7.0	99	2023.05.09	733	339	0.9470	2.3874	2014.07.12 04:22	37.050	142.321	33.0
								7.1	13	2020.12.13	22	591	0.9118	1.9835	1973.06.24 11:43	43.164	146.633	52.0
								7.4	234	2023.05.15	20	272	0.9572	2.4521	2016.11.22 05:59	37.355	141.604	24.5

№ зоны	Современная потенциально опасная активность										Прогнозные вычисления										Пределенное землетрясение			
	локализация					начало активизации	n	L _{пр ср.}	M _{пр}	n _{пр}	расчетная дата	ошибка, сут.		L _{пр}	A	время			гипоцентр					
	центр	R, км	Dep	Lat	Lon							3σ _н	3σ _г			время	Lat	Lon	Dep					
						Lat	Lon	Dep																
121	47.228	152.103	0.0	150	1931.02.23	12	0.7511	7.4	12	2046.09.20	92	1331	0.7511	2.2419	1978.06.12	17:14	38.150	142.167	40.0					
130	43.028	143.557	80.0	60	1933.10.16	48	0.9472	7.0	6	2029.11.13	223	2309	0.8941	1.9930	1978.03.23	12:15	44.800	149.417	60.0					
								7.0	6	2029.11.11	223	2341	0.8920	1.9864	1995.12.04	03:04	44.706	150.526	0.0					
								7.0	37	2026.11.22	2420	1260	0.9329	2.3562	2002.03.31	15:52	24.233	121.970	55.0					
								7.0	3	2023.11.08	35	1389	0.9367	2.1987	2008.05.08	01:45	36.228	141.608	50.6					
								7.0	94	2029.01.18	2686	875	0.9601	2.3891	2014.07.12	04:22	37.050	142.321	33.0					
								7.3	6	2029.11.19	223	1916	0.9174	2.0705	1978.03.25	04:47	44.333	149.817	40.0					
								7.3	3	2020.04.09	46	643	0.9734	2.3371	2001.12.18	13:02	23.893	122.815	8.0					
								7.3	6	2029.11.20	223	973	0.9624	2.2575	2011.03.09	11:45	38.328	143.280	8.3					
132	40.990	141.854	100.0	150	1995.01.07	33	0.7657	7.3	6039	2025.09.18	409	539	0.7657	2.2305	2011.03.09	11:45	38.328	143.280	8.3					
140	42.669	142.337	0.0	60	1952.08.31	14	0.9993	7.0	1739	2021.10.25	458	32	0.9993	2.1371	2011.04.11	17:16	36.946	140.673	6.4					
								7.3	4	2021.05.04	50	8	0.9998	2.1477	1994.10.09	16:55	43.558	147.802	0.0					
								7.3	5	2023.09.07	145	10	0.9997	2.2083	2011.07.10	09:57	38.032	143.507	34.0					
142	40.990	141.854	0.0	150	1995.01.07	13	0.8395	7.0	12	2020.01.24	29	860	0.8109	1.6931	2011.04.11	17:16	36.946	140.673	6.4					
								7.3	79	2020.10.13	435	716	0.8438	1.8788	2011.03.09	11:45	38.328	143.280	8.3					
153	41.881	141.212	0.0	150	2002.12.05	83	0.9061	7.0	24	2020.07.03	64	234	0.8968	1.9330	2011.04.11	17:16	36.946	140.673	6.4					
								7.2	195	2023.02.16	408	170	0.9262	2.4000	1995.01.07	07:37	40.223	142.305	47.8					
								7.2	641	2020.09.11	123	231	0.9003	1.9680	2008.06.14	08:43	39.030	140.881	7.8					
158	42.772	141.911	100.0	150	1997.02.20	17	0.9328	7.0	16	2021.02.23	113	256	0.9313	2.2952	2011.04.11	17:16	36.946	140.673	6.4					
								7.2	542	2021.04.19	175	249	0.9328	2.3125	2008.06.14	08:43	39.030	140.881	7.8					
164	40.518	142.628	40.0	60	1995.01.07	12	0.6886	7.0	1	2023.08.01	0	645	0.7577	2.0178	1938.05.23	16:18	36.574	141.324	0.0					
								7.0	173	2026.11.16	1792	765	0.6843	2.1397	2002.03.31	15:52	24.233	121.970	55.0					
								7.0	4	2024.06.07	933	597	0.7748	2.1323	2014.07.12	04:22	37.050	142.321	33.0					
								7.1	8	2031.10.21	120	723	0.7302	2.4500	1982.03.21	11:32	42.067	142.600	40.0					
172	41.881	142.424	0.0	150	2009.06.12	30	0.5161	7.0	2233	2020.08.09	129	323	0.5159	1.6681	2005.03.20	10:53	33.739	130.176	9.2					
								7.0	6	2021.04.02	276	352	0.5544	1.7229	2013.04.19	12:05	45.301	150.957	125.0					
175	41.881	142.424	100.0	150	2003.10.09	23	0.5150	7.0	23	2021.08.08	32	289	0.5150	1.5550	2013.04.19	12:05	45.301	150.957	125.0					

Примечание. Lat, Lon – соответственно широта и долгота (°); Dep – глубина, км; R – радиус зоны; n – число незавершенных прогнозных определений; L_{пр ср.} – средний уровень прогнозных определений по зоне в целом; M_{пр} – магнитуда пределенного сильного землетрясения; n_{пр} – число пределенных прогнозных определений, использованных в прогнозных расчетах по данному пределенному случаю; 3σ_н и 3σ_г – ошибка времени, соответственно, по пределенным ретропрогнозированным определениям и на основании среднего отклонения аппроксимируемых данных от расчетной кривой; L_{пр} и A – средние значения уровня прогнозных определений и аппроксимационно-экстраполяционного соотношения в прогнозных расчетах для данного пределенного толчка. Нумерация зон в порядке убывания их опасности (по наиболее сильному пределенному толчку) по всему каталогу ЯМА.

Также есть определенные основания ожидать, что форшоковая активизация в преддверии сильных землетрясений имеет циклический характер. В частности, среди потенциально опасных зон Японии, выявленных по текущему состоянию каталога JMA⁴, выделяется кластер из пространственно сближенных и частично пересекающихся зон 2, 4, 6 с радиусом 150 км

и локализацией в районе северо-восточной части о. Сикоку и городов Кобе и Осака с опасностью землетрясения класса $M = 8.0-8.2$ в 2021 г. В контексте полициклическости для нас имеет значение, что в принадлежащей к этому кластеру зоне 4 установлено сопряжение двух циклов потенциально опасного нарастания активности: начавшегося в сентябре 1943 г. цикла

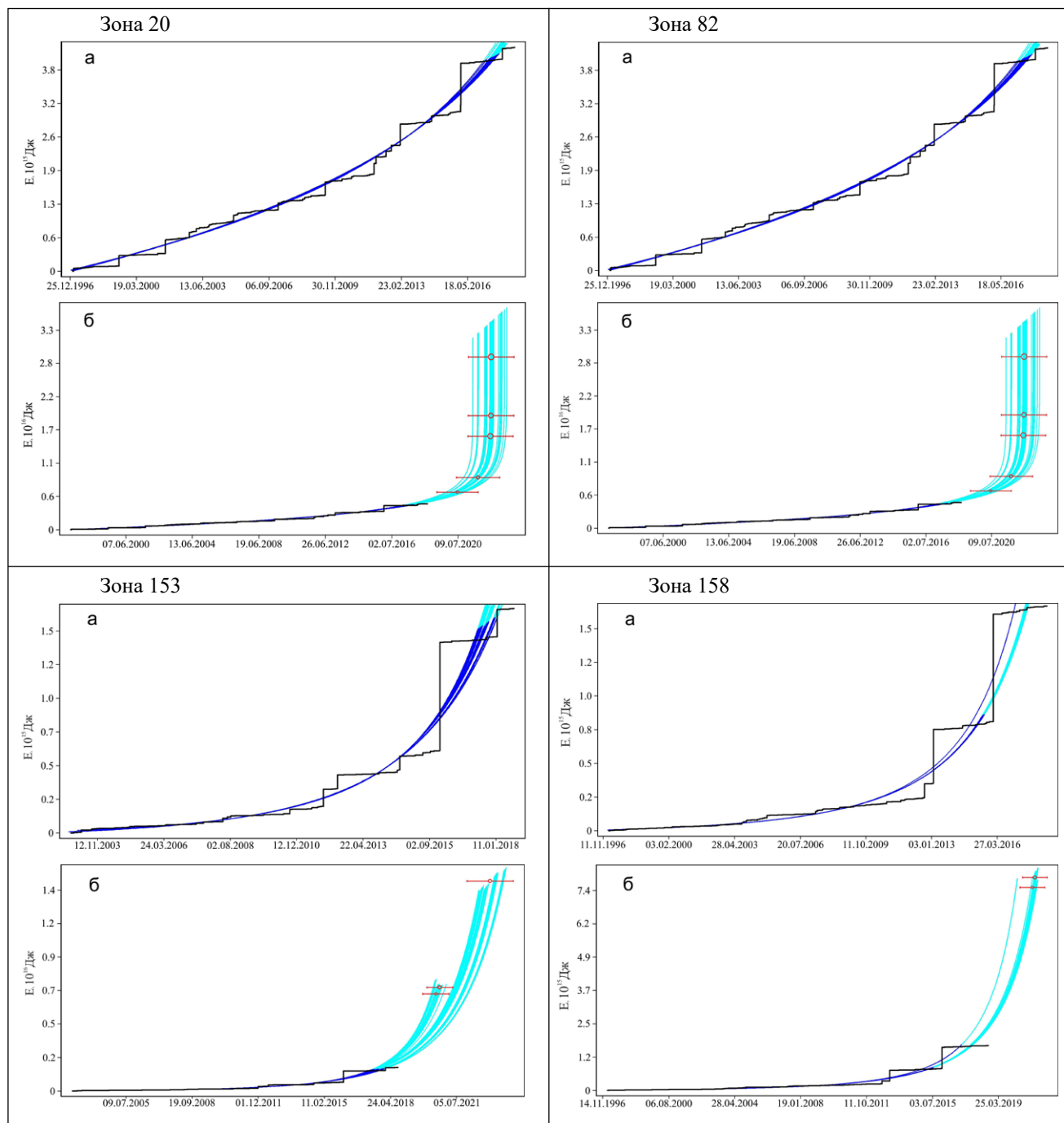


Рис. 5. Текущее (а) и прогнозируемое (б) развитие сейсмической активности в расчетных зонах.

⁴ Мальшев А.И., Мальшева Л.К. Форшоковая прогнозируемость сильных землетрясений Японии по потоку сейсмической энергии (направлена для публикации в журнал «Физика Земли»).

постепенного нарастания потока энергии с относительно низкой прогнозной нелинейностью и более кратковременного цикла с высокой прогнозной нелинейностью. Последний цикл начался сразу после разрушительного землетрясения в г. Кобе 17 января 1995 г. ($M = 7.3$), и именно он имеет наиболее опасные тенденции нарастания активности (вплоть до имеющегося прецедента с $M = 8.0$).

Возможная полицикличность форшоковой подготовки сильных землетрясений и чрезвычайно широкий диапазон их прогнозной заблаговременности позволяют наметить условную этапность действий при выявлении потенциально опасных трендов сейсмической активности: 1) при прогнозной заблаговременности более 1 года – верификация выявленной опасности с помощью комплекса всех доступных прогностических методов; 2) при прогнозной заблаговременности от 1 года до 10 дней (особенно в зонах с сохраняющимися и верифицированными на 1 этапе тенденциями) – приведение в повышенную готовность служб ГО и ЧС; 3) при заблаговременности менее 10 дней в зонах с выявленными на 1-м и/или 2-м этапах и сохраняющимися опасными тенденциями – подключение к процессу прецедентно-экстраполяционных оценок систем автоматического оповещения с целью информирования об уточнениях временного периода опасности или о ее отмене. Как уже было сказано выше, в настоящее время прецедентно-экстраполяционные оценки можно использовать на уровне 1-го этапа, тогда как 2-й и 3-й этапы – цель будущих исследований, достижимая при условии встраивания оценочного алгоритма в процесс формирования сейсмических каталогов при одновременном наращивании вычислительных мощностей и качественном и количественном увеличении прецедентных данных.

На региональном уровне использование методики может иметь свою специфику, обусловленную характером сейсмичности, накопленной в каталогах информацией по региональному сейсмическому потоку, текущим состоянием регистрирующих сейсмических сетей и представлениями о минимальной энергии опасных землетрясений.

Рассмотрим региональную специфику использования методики на примере Сахалинской области. Наиболее высокий уровень региональной сейсмоактивности характерен для Курильской островодужно-субдукционной системы в связи с ее высокой тектонической активностью. Здесь инструментальными методами неоднократно зарегистрированы землетрясения уровня $M \geq 8$, сопровождающиеся цунами.

Остров Сахалин, где сконцентрирована большая часть населения и промышленности области, характеризуется умеренным уровнем сейсмической активности [Тихонов и др., 2017]. В течение 10 лет здесь регистрируется в среднем одно землетрясение с $M > 6$ и около 10 событий с $M > 5$. Гипоцентры сахалинских землетрясений располагаются на малых глубинах (до 30 км) и вдоль Курильской сейсмофокальной зоны (глубина 250–650 км). Глубокофокусные землетрясения, как правило, серьезной сейсмической опасности не представляют, тогда как малоглубинные могут приводить к значительным разрушениям и многочисленным жертвам. В частности, в 1995 г. землетрясением с $M = 7.2$ был полностью разрушен пос. Нефтегорск на северо-востоке острова. За одну ночь погибло 2240 человек, в том числе 308 детей, 720 получило серьезные ранения и только 30 не пострадали⁵. Это землетрясение, а также Углегорское 2000 г. с $M = 7.0$ в центральной части острова и Невельское 2007 г. с $M = 6.2$ на юге указывают на высокую сейсмическую опасность Сахалина [Закупин и др., 2019], несмотря на сравнительно умеренный уровень его сейсмической активности.

Наряду с обычной тектонической сейсмичностью Сахалин характеризуется техногенной и техногенно-триггерной сейсмичностью в связи с добычей полезных ископаемых на острове и в прилегающей акватории ([Тихонов, 2010; Семенова и др., 2020]; А.А. Степнов⁶). Есть основания ожидать [Foulger et al., 2018], что с планируемой интенсификацией разработки месторождений углеводородного сырья и других минеральных ресурсов техногенная и техногенно-триггерная составляющие

⁵ <https://pressa.tv/interesnoe/72899-neftegorsk-gorod-mertvyh-strashnoe-zemletryasenie-28-maya-1995-goda-8-foto-video.html>.

⁶ Степнов А.А. 2015. Комплексная автоматизированная система мониторинга для анализа современной сейсмичности Северного Сахалина: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 135 с.

региональной сейсмичности усилятся. В качестве примера можно привести ситуацию с месторождением Гронинген (Нидерланды), где добыча природного газа вызвала рост сейсмической активности [Thienen-Visser et al., 2015; Богоявленский, Богоявленский, 2018], что послужило причиной решения о досрочном прекращении эксплуатации месторождения в 2030 г.⁷, а затем о переносе завершения эксплуатации на 2022 г.⁸ при первоначальных планах использования месторождения до 2080 г.

При изучении регионального потока сейсмических событий на Сахалине используются [Тихонов и др., 2017; Закупин и др., 2019; Закупин, Богинская, 2020], как правило, три каталога. Данные за наиболее длительный период (1905–2005 гг.) наблюдений содержит региональный каталог землетрясений [Региональный... , 2006], где имеются сведения о более чем 3500 сейсмических событиях в районе о. Сахалин с $M \geq 3.0$. Каталог Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН, представленный в печати ежегодными выпусками (например, [Фокина и др., 2020]), включает в себя землетрясения $M \geq 3.0$ с 1997 г. Тем не менее реальное состояние сейсмичности Сахалина удалось оценить только после развертывания локальных сетей цифровых сейсмических станций на юге и севере острова. Поэтому наиболее надежным источником сведений о слабой сейсмичности Сахалина, по мнению [Тихонов и др., 2017], с 2003 г. стал третий каталог, формируемый на основе данных локальных сетей регистрирующих станций и без пропусков включающий в себя землетрясения с $M \geq 2.0$ [Каталог... , 2011].

Высокая опасность техногенных и техногенно-триггерных землетрясений в зонах жизнедеятельности человека обуславливает необходимость расширения диапазона потенциально опасных землетрясений вплоть до включения в него землетрясений с $M \geq 5$ [Закупин и др., 2018; Закупин, Семенова, 2018]. Возможность применения описанной методики к выявлению опасности техногенных и техногенно-триггерных землетрясений сомнений не вызывает. По крайней мере закономерности форшоковой активизации в преддверии сильных землетрясений, связанных с водохранилищами [Гупта,

Растоги, 1979] ($M = 6.2$ в 1966 г. у оз. Кремаста в Греции, $M = 6.1$ в 1963 г. у оз. Кариба в Замбии – Родезии, $M = 5.0$ 13 сентября и $M = 6.4$ 10 декабря 1967 г. на плотине Койна в Индии), использовались для обоснования уравнения ДСПП в его первичном виде [Малышев, 1991]. Кроме того, первые попытки практического применения уравнения ДСПП относятся к изучению горных ударов в Южно-Уральском бокситоносном районе, где 28 мая 1990 г. произошел сильнейший горно-тектонический удар с разрушением подземных горных выработок шахты Кургазакская на площади 45 га.

Таким образом, региональная специфика возможного применения прецедентно-экстраполяционной методики в Сахалинской области обусловлена двумя типами сейсмической опасности, различающимися по локализации потенциально опасных землетрясений и их минимальной магнитуде.

Первый тип представлен тектоногенной сейсмической активностью Курильской островодужно-субдукционной системы. Здесь возможно использование описанной методики без существенных изменений с привлечением данных каталога [Региональный... , 2006] и каталога Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН, а также с использованием данных сопредельных регионов (Камчатского регионального сейсмического каталога для северной части Курильской системы и каталога ЖМА – для южной).

Второй тип сейсмической опасности связан с тектонической и техногенно-тектонической сейсмичностью о. Сахалин. Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности здесь возможна только на основе данных локальных сетей регистрирующих станций с использованием прецедентной базы по форшоковой подготовке землетрясений с $M \geq 5$. В связи с распространенностью техногенной сейсмичности [Foulger et al., 2018] представляется возможным создать подобную прецедентную базу при анализе данных Всемирного каталога Геологической службы США (USGS) с одновременным ужесточением требований по детерминированности форшоковых ретропрогнозов как минимум до уровня $L_{pn} \geq 0.98$. Использование данных локальных сетей с 2003 г. при определенном на основе

⁷ <https://ria.ru/20190225/1551301913.html>.

⁸ <https://ria.ru/20191014/1559692698.html>.

данных каталога ЖМА максимальном аппроксимационно-экстраполяционном соотношении $A = 2.47$ теоретически дает возможность получить прогнозируемую заблаговременность до 3.5 лет, что соответствует средне-долгосрочной прогнозируемости и 1-му этапу действий при выявлении потенциально опасных трендов сейсмической активности.

Заключение

Анализ форшоковых последовательностей по заблаговременности и точности ретропрогнозных определений свидетельствует о возможности их использования в средне-долгосрочном количественном прогнозе сильных землетрясений. В текущем состоянии прецедентно-экстраполяционная методика представляет собой первичный (исследовательский) вариант, нуждающийся в дальнейшей адаптации, отладке, выявлении и устранении мелких недочетов и (возможно) ошибок. Что касается развития самой методики, то здесь возможно некоторое повышение ее точности и эффективности при соответствующем увеличении вычислительных мощностей. Также представляется перспективным применение описанной методики к потоку «условных деформаций», тренды которого характеризуются меньшей полосой ошибок и поэтому по сравнению с потоком энергии могут показать более высокую точность в прогнозных экстраполяциях.

Тем не менее, по нашему мнению, она уже сейчас пригодна к практическому использованию. При этом необходимо учитывать, что методика, по крайней мере на данном этапе, не предназначена для использования в качестве самостоятельного и автономного метода прогноза сильных землетрясений. Она основывается на ретроспективном анализе прогнозируемости форшоковых последовательностей и позволяет, используя накопленный прецедентный опыт, выявлять зоны с потенциально опасными тенденциями нарастания сейсмической активности и рассчитывать время, в которое эти тенденции (при условии их сохранения) могут достичь опасного уровня. Акцентирование внимания на потенциально опасных зонах и расстановка приоритетов с учетом уровня опасности и имеющегося резерва времени делают возможной концентрацию всего комплек-

са прогностических методов в нужное время в определенной пространственной локализации: наземные и спутниковые деформационные наблюдения, исследования геофизических полей, режима грунтовых вод и дегазационных процессов, а также наращивание (при необходимости) плотности регистрирующей сети сейсмических станций. По нашему мнению, раннее обнаружение опасности с последующей концентрацией прогностических методов – ключ к успеху как в прогнозе сильных землетрясений, так и в получении новых высококачественных данных об их подготовке.

На примере текущего состояния каталога ЖМА выявлено 15 зон с потенциально опасным (для территории Сахалина и Курильских о-вов) нарастанием сейсмической активности. Для этих зон в 56 случаях по имеющимся прецедентам сильных ($M \geq 7$) землетрясений рассчитано возможное время их аналогов. Наибольшую опасность для рассматриваемой территории представляет зона 7, располагающаяся на севере о. Хоккайдо в непосредственной близости к южной части о. Сахалин. Развитие сейсмической активности в этой зоне имеет аналоги в форшоковой подготовке землетрясения с $M = 8.0$. Расчетное время аналогичного толчка соответствует 6 августа 2024 г. с допуском по времени немногим более года.

Региональная специфика возможного применения прецедентно-экстраполяционных оценок в Сахалинской области обусловлена двумя типами сейсмической опасности, различающимися по локализации потенциально опасных землетрясений и их минимальной магнитуде: тектоногенной сейсмической активностью Курильской островодужно-субдукционной системы и тектогенно-техногенной и техногенно-триггерной сейсмичностью о. Сахалин. При оценке опасности Курильской островодужно-субдукционной системы возможно использование описанной методики без существенных изменений с привлечением данных региональных каталогов. Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности на о. Сахалин возможна только на основе данных локальных сетей регистрирующих станций и требует расширения прецедентной базы по форшоковой подготовке землетрясений до уровня $M \geq 5$.

Список литературы

1. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В. **2018**. Проблемы газовой отрасли Нидерландов: рекордный рост сейсмической активности на месторождении Гронинген. *Газовая промышленность*, 4 (767): 126–135.
2. Гупта Х., Растоги Б. **1979**. *Плотины и землетрясения*. М.: Мир, 251 с.
3. Закупин А.С., Богинская Н.В. **2020**. Среднесрочные оценки сейсмической опасности на о. Сахалин методом LURR: новые результаты. *Геосистемы переходных зон*, 4(2): 160–168. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.160-168.169-177>
4. Закупин А.С., Семенова Е.П. **2018**. Исследование процесса подготовки сильных землетрясений ($M_w > 5$) на Сахалине методом LURR. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 5: 83–98. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98>
5. Закупин А.С., Богинская Н.В., Андреева М.Ю. **2019**. Методические аспекты исследования сейсмических последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине. *Геосистемы переходных зон*, 3(4): 377–389. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389>
6. Закупин А.С., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. **2018**. Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Онорского землетрясения на Сахалине ($M_w = 5.8$, 14 августа 2016 года). *Геология и геофизика*, 11: 1904–1911. <https://doi.org/10.15372/gig20181112>
7. *Каталог землетрясений юга Сахалина за период с 2000 по 2010 г. (по данным автономных цифровых сейсмических станций)*. **2011**. Авт: Ким Ч.У., Семенова Е.П., Жердева О.А. и др. Владивосток: Дальнаука, 357 с.
8. Малышев А.И. **1991**. Динамика саморазвивающихся процессов. *Вулканология и сейсмология*, 4: 61–72.
9. Малышев А.И. **2016**. Оценка прогнозируемости сейсмического потока на примере извержения вулкана Шивелуч 1964 г. *Вулканология и сейсмология*, 6: 22–36. <https://doi.org/10.7868/S0203030616060055>
10. Малышев А.И. **2019а**. Прогнозируемость сейсмического потока и сильных землетрясений Камчатки в 1962–2014 г. *Вулканология и сейсмология*, 1: 52–66. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019152-66>
11. Малышев А.И. **2019б**. Прогнозируемость потока сейсмической энергии Северной Америки. *Физика Земли*, 6: 59–75. <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019659-75>
12. Малышев А.И. **2020**. Прогнозируемость потока сейсмической энергии Южной Европы и Средиземноморья. *Вулканология и сейсмология*, 1: 33–48. <https://doi.org/10.31857/S0203030620010034>
13. Малышев А.И., Малышева Л.К. **2018**. Прогнозируемость потока сейсмической энергии северо-западного обрамления Тихого океана по данным каталога USGS. *Геосистемы переходных зон*, 2(3): 141–153. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.141-153>
14. Малышев А.И., Малышева Л.К. **2019**. Статистический алгоритм прогнозирования потока сейсмической энергии. В кн.: *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды Седьмой научно-технической конф., 29 сент. – 5 окт. 2019, Петропавловск-Камчатский*. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 307–311.
15. *Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 гг.* **2006**. Авт: Поплавская Л.Н., Иващенко А.И., Оскорбин Л.С., Нагорных Т.В., Пермикин Ю.Ю., Поплавский А.А., Фокина Т.А., Ким Ч.У., Краева Н.В., Рудик М.И. и др. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 103 с.
16. Семенова Е.П., Богинская Н.В., Костылев Д.В. **2020**. Углегорское землетрясение 13 сентября 2020 года (о. Сахалин): предпосылки возникновения и результаты наблюдений в эпицентральной зоне. *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 474–485. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.474-485>
17. Тихонов И.Н., Михайлов В.И., Малышев А.И. **2017**. Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предвещающих сильные толчки, с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения. *Тихоокеанская геология*, 36(1): 5–14.
18. Тихонов И.Н. **2010**. О наведенной сейсмичности на шельфе острова Сахалин вблизи Пильгун-Астохского нефтегазоконденсатного месторождения. *Вестник ДВО РАН*, 3: 59–63.
19. Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Михайлов В.И. **2020**. Сахалин. *Землетрясения Северной Евразии*, 23 (2014): 152–161. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.14>
20. Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. **2018**. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*, 178: 438–514. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
21. Kanamori H. **1977**. The energy release in great earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 82(20): 2981–2987. <https://doi.org/10.1029/jb082i020p02981>
22. Thienen-Visser K., Sijacic D., Nepveu M., Wees J., Hettelaar J. **2015**. Response of induced seismicity to production changes in the Groningen field. *TNO Report 2015 R11367*. 56 p. URL: https://www.nlog.nl/sites/default/files/tno%202015%20r11367_final_tno_report_nov%202015.pdf

Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region

Aleksandr I. Malyshev*, Lidiia K. Malysheva

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia

*E-mail: malyshev@jgg.uran.ru

Abstract. The paper describes the algorithm and the results of the seismic hazard estimate in the Sakhalin and Southern Kurils region based on the data of the Japan Regional Catalogue (JMA). A nonlinear differential equation of the second order is used as a mathematical model, and algorithms for optimization and predictability estimation are presented by the author's solutions. The prediction algorithm is based on the search for seismic activity zones in which the current activity trends correspond to foreshock sequences recorded before strong earthquakes (precedents) that have already occurred. The earthquake time is calculated with extrapolating the detected trends to the level of activity that occurred at the time of the precedent earthquake. By the example of precedent foreshock sequences in Japan, it is shown that the lead time of such a prediction reaches 10–15 years and its implementation is due to the preservation and stability of the identified trends. A map of potentially dangerous zones for Sakhalin and the Kuril Islands and some examples of calculating the time of strong earthquakes according to the JMA catalogue as of August 31, 2018 are presented. Action sequence in identifying the potentially dangerous trends in seismic activity and the specifics of possible use of the technique in the Sakhalin region are considered.

Keywords: earthquake, seismic energy, foreshock, precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard

For citation: Malyshev A.I., Malysheva L.K. Precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard in the Sakhalin and the Southern Kurils region. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 84–112. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.2.084-098.099-112>

Acknowledgment and Funding

The study was carried out within the framework of the state assignment of the IGG UB RAS No. AAAA-A19-119072990020-6.

Introduction

The seismic energy flux of earthquakes E shows a good predictability [Malyshev, Malysheva, 2018; Malyshev, 2019 a, b; Malyshev, 2020] when using the equations of dynamics of self-developing natural processes (DSNP-equations, see below) as a model. The obtained results demonstrated good prospects for the approximating-extrapolation approach for predicting both the strong earthquakes themselves and the subsequent aftershock decay of seismic activity.

When summarizing the obtained results, it was found [Malyshev, Malysheva, 2019] that the range of values of the α and k parameters in the DSNP-equation, which determine the foreshock predictability of strong earthquakes, is shifted relative to the whole predictability area to the lower left part of the $\alpha - \lg |k|$ diagram (Fig. 1), i.e. where the figurative points of the most slowly developing and

long-lasting processes of activation are located. This makes it possible to differentiate the trends in the activation of the seismic energy flux by the α and k parameters, on the one hand, into conditionally safe (without precedents of termination by strong earthquakes), and on the other hand, into potentially dangerous ones that deserve close attention due to the precedents (often repeated) of these trends completions with strong earthquakes.

Processing of the data from the Japan Meteorological Agency (JMA) catalogue showed¹ that the predicted intensification of the seismic energy flux precedes 123 (out of 676) strong ($M \geq 7$) earthquakes. 87 536 precedents of these earthquakes falling into the range of admissible errors were found during the retrospective extrapolation of the foreshock trends into the “future”. In particular, the strongest earthquake of that number – the Tohoku earthquake ($M = 9.0$) – has 150 pre-

¹ Malyshev A.I., Malyshev L.K. Foreshock predictability of strong earthquakes in Japan by the seismic energy flux (submitted for publication in the “Physics of the Solid Earth” journal).

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Малышев А.И., Малышева Л.К. Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил. *Translation by G.S. Kachesova.*

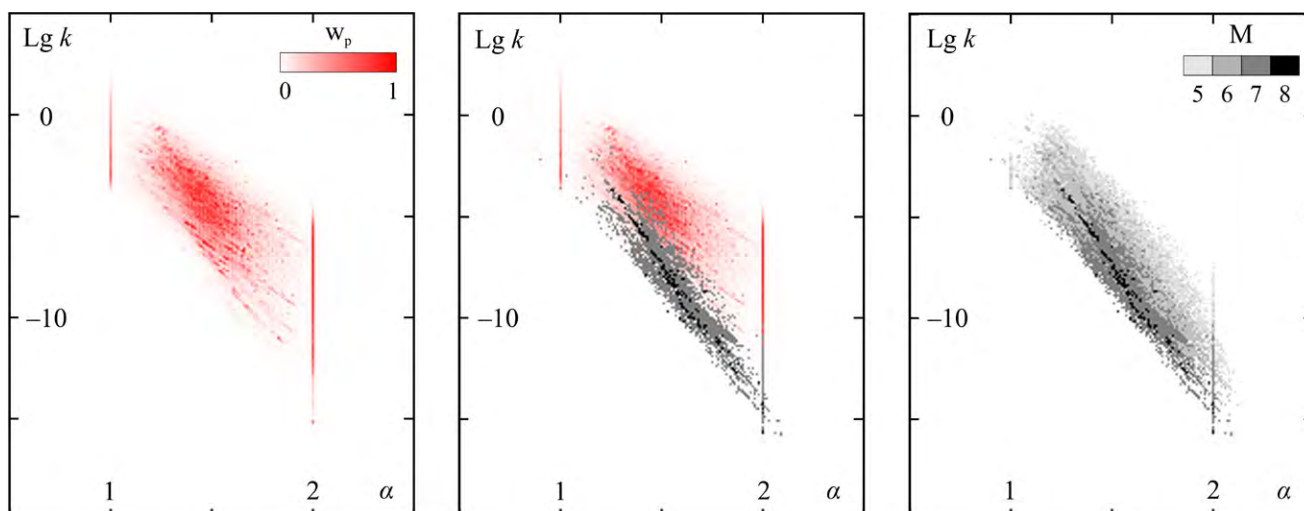


Figure 1. Distribution of the specific weight of predictability w_p for activating the seismic energy flux (left), foreshock predictability of strong earthquakes (right) and their combination (center) in the coordinates of the $\alpha - \lg |k|$ parameters of the DSNP-equation, according to [Malyshev, Malysheva, 2019].

edents of falling into the range of retrospective prediction extrapolations.

In the distribution of retrospective prediction precedents by their lead time, more than 20 % of retrospective predictions have lead times from 3 to 10–15 years or more. Another 45 % of them has a lead time of 3 months to 3 years. Despite the large error band when simulating the energy flux (compared to “nominal strain” and the number of events [Malyshev, 2019b]), such a high lead time brings to rather high forecasting accuracy in these ranges. Moreover, it is in the range of more than 3 years that the lead time exceeds the time deviation at the moment of shock by an average of 5.82 times, and for the most accurate retrospective prediction for this range – by 37.18 times. This fact indicates the possibility of a medium and long-term quantitative estimate of the strong earthquakes hazard.

The results of the seismic hazard estimate according to the JMA catalogue are detailed for the Sakhalin and the Southern Kurils region, and the prospects for using the Sakhalin regional catalogue for these purposes are discussed in this work.

Research techniques

The DSNP-equation is used in the work [Malyshev, 1991]:

$$x'' = k |(x')^\lambda - (x'_0)^\lambda|^{\alpha/\lambda}, \quad (1)$$

where x – calculated characteristic of the process, which models the available empirical data,

x' и x'' – its first and second derivative with time t , k – proportionality factor, and the λ и α exponents determine the process nonlinearity close to the stationary state ($x' \approx x'_0$) and at significant a considerable distance from it ($x' \gg x'_0$), respectively.

For predicting potentially catastrophic processes, the most interesting case is $x' \gg x'_0$. Due to this, the following equation is of relevance as an approximation model:

$$x'' = k (x')^\alpha. \quad (2)$$

The linearity of equation (2) solutions in ordinary or logarithmic coordinates simplifies the search for the best fit (optimization) between a particular solution of equation (2) and the actual data approximated with it [Malyshev, 2019a].

Spatial analysis of seismic data is carried out by spherical hypocentral samples with radii of 1.5, 3, 7.5, 15, 30, 60, 150 and 300 km. The centers of the samples are fixed and distributed over latitude, longitude, and depth with an offset step that is 1.5 times smaller than the sample's radius (i.e., 1, 2, 5, 10, 20, 40, 100, and 200 km, respectively), which provides spatial overlap of the samples and eliminates data omission for predictive estimates. In retrospective studies, each event in the analyzed catalogue is sequentially considered as a “current” event. The time moment of this event is taken as “present”. The time preceding this event is considered “past”, and the subsequent time – “future”. Hereinafter, the predictability means finding the actual data of the “future” in the band of admissible errors

relative to the calculated curve in its extrapolation part. To estimate the predictability, the average deviation σ of the actual points from the calculated curve along the normal is used in the coordinates normalized to the range from 0 to 1. Then the approximation is extrapolated to the “future” until the normal distance of each subsequent (predicted) actual point to the calculated curve is in the band of admissible errors ($\pm 3\sigma$) [Malyshev, 2016].

The relative accuracy of precedent predictions is estimated by the formula $\Delta = (t_{sh} - t_c)/\sigma_t$, where t_{sh} is the time of the main shock, t_c is the current time (prediction moment), σ_t is the average time deviation of the actual data from the calculated curve in its closest to the main shock point. In addition, two more quantitative characteristics – predicted nonlinearity L_{pn} and approximation and extrapolation ratio A – are important for precedent retrospective prediction definitions and predictive extrapolations. As will be shown below using the example of precedent retrospective predictions, the first characteristic reflects the stochasticity/determinacy of the main shock position relative to its calculated curve. It is calculated using the formula:

$$L_{pn} = 2 [\Delta_x - (\Delta_x + \Delta_t)/2] / (\Delta_x + \Delta_t), \quad (3)$$

where $\Delta_x = (x_{sh} - x_1)/(x_c - x_1) - 1$, $\Delta_t = (t_{sh} - t_1)/(t_c - t_1) - 1$; x_1 and t_1 , x_c and t_c , x_{sh} and t_{sh} – the values of parameter and time in the origin point of the foreshock sequence, in the prediction point and in the moment of main shock, respectively. In so doing, in the case of retrospective predictions, the actual values of x_{sh} and t_{sh} are used, while in the case of predictive extrapolations – their calculated values. For the foreshock sequences, the L_{pn} value varies from 0 to 1.

The approximation and extrapolation ratio A shows, in turn, how many times the total foreshock trend exceeds its approximation component in the coordinates of the full trend, normalized to the range from 0 to 1. The statistical analysis of this ratio has been carried out according to the precedent retrospective prediction definitions and is used to estimate the limit of predictive extrapolations. In general, the A value can be determined by the ratio of the lengths of the corresponding sections of the calculated curve. However, in the case of step cumulative characteristics of the seismic flux (energy, conditional deformations, or the number of events), calculation by the following formula turns out to be the simplest and most effective:

$$A = 2 / [(x_c - x_1)/(x_{sh} - x_1) + (t_c - t_1)/(t_{sh} - t_1)]. \quad (4)$$

For foreshock retrospective predictability of the strong earthquakes in Japan, the approximation and extrapolation ratio does not exceed the value $A = 2.47$.

The regularities of the precedent foreshock preparation of strong ($M \geq 7$) earthquakes allow identifying similar trends in the seismic activity increase and their subsequent extrapolation based on the JMA catalogue, despite the existing 2-year delay in its update with operational seismic information. The prediction estimate of these trends dangers assumes the use of the data of precedent retrospective predictions and is based on the possibility of binding the time of the main shock to the rate of change in the x'_{sh} parameter at the point of the extrapolation curve closest to the main shock. For this purpose, a database of precedent retrospective predictions with the inclusion of information about the hypocentral radius of the sample, the exponent α and the coefficient k of equation (2), the rate of change in the x'_{sh} parameter at the calculated trend point closest to the shock, as well as information about the precedent main shock (magnitude, localization in space and time) is created.

The essence of the precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard consists in identifying potentially dangerous spatial zones, where such an increase in seismic activity is observed, which has historical precedents of completion by a strong earthquake. The quantitative aspect of the prediction corresponds to the calculation of the possible time of a similar earthquake based on the database of its precedent predictions. Since for each type of activation, determined by the radius of the sample and the values of the exponent α and the coefficient k in equation (2), there are can be several such precedents, the corresponding calculations of the possible time are carried out for each of them.

The prediction extrapolations algorithm provides for the following operations:

1. Search in the catalogue for incomplete (not came out of the band of admissible errors at the time of the catalogue end) prediction definitions, in which a tendency towards an increase in seismic activity is found.

2. Comparison of the type of an activity increase with the database of precedent retrospective predictions along the sample radius, exponent α

(with an accuracy of 0.01) and coefficient k (when comparing $\lg k$ with an accuracy of 0.1). All cases of an activity increase that have no analogues in the database of precedent retrospective predictions are ignored.

3. The remaining cases are checked for strong shock precedents according to the retrospective database. In this case, all precedent prediction cases, for which the rate of change in the x'_{sh} parameter at the moment of the precedent shock is less than the current (at the moment of the catalogue completion) speed x' ($x'_{sh} < x'$), are excluded from consideration. The essence of this limitation is reduced, firstly, to excluding from consideration post-shock activity (the initial stage of aftershock sequences, which falls into the band of admissible errors of the foreshock activation), and secondly, to focusing attention at the early stages of foreshock preparation ($x' \ll x'_{sh}$), where the relative prediction accuracy is highest.

4. For each precedent retrospective prediction based on the rate of change in the x'_{sh} parameter, the time t_{sh} and the value of the x_{sh} parameter are calculated, at which, for a given type of an activity increase, its level will correspond to the level of the precedent shock:

$$t_{sh} = T_a - x'_{sh}{}^{1-\alpha} / [k(1-\alpha)] \text{ when } \alpha \neq 1$$

$$\text{or } t_{sh} = t_1 + \ln(x'_{sh}/x'_1) / k \text{ when } \alpha = 1, \quad (5)$$

$$x_{sh} = X_a - x'_{sh}{}^{2-\alpha} / [k(2-\alpha)] \text{ when } \alpha \neq 2$$

$$\text{or } x_{sh} = x_1 + \ln(x'_{sh}/x'_1) / k \text{ when } \alpha = 2. \quad (6)$$

Then the level of predicted nonlinearity L_{pn} , the approximation and extrapolation ratio A and the expected deviation in time σ_t of the actual data from the calculated trend at the moment of the main shock, are estimated. The value of this expected deviation is determined from the average deviation along the normal² of the approximated data and recalculated for the deviation in time at the calculated point (t_{sh}, x_{sh}) of the precedent shock. The definitions, for which $A > 2.47$, are not considered as having no precedents.

5. The revealed precedent retrospective predictions are grouped by the main shock. For each group, the calculated average time of the shock, its standard deviation σ_{sh} , as well as the average values of L_{pn} , A and σ_t are determined.

Initial data

As the initial data, the work uses the Japan Meteorological Agency (JMA) earthquake catalogue, which includes data from 1923 to the end of August, 2018³. By this time, the catalogue contained data on 3 498 071 earthquakes with a magnitude $M = -1.6 \dots + 9.0$ at its modal value 0.6. The seismic energy flux E is considered as the x parameter, i.e. a cumulative amount of earthquakes energy. In this case, the energy of a single earthquake is estimated according to the existing relationship between its magnitude M and the energy class K [Kanamori, 1977]: $K = 1.5 M + 4.8$.

Results and discussion

Examples of retrospective prediction extrapolations with a sufficiently high relative accuracy Δ and significant differences in predicted nonlinearity L_{pn} are shown in Fig. 2. Table 1 contains data on the main shock, sample and some characteristics of the foreshock trend corresponding to these examples. The first three graphs clearly illustrate the high lead time of these foreshock retrospective predictions (from 5 to 20 years), while the 4-month lead time of retrospective prediction 4 corresponds to the medium-short prediction range. Also, it can be seen in Fig. 2, that for a low predicted nonlinearity L_{pn} (graph 1 in Fig. 2), the position of the strong earthquake step in the energy flux is weakly determined by the band of admissible deviations. A strong earthquake in this band could have occurred both much earlier, and much later than its actual time, i.e. the stochasticity of a strong shock time increases with decreasing predicted nonlinearity. The latter is typical for the sequences of activation close to stationary development. On the contrary, with an increase in the predicted nonlinearity (graphs 2–4 in Fig. 2), the asymmetry of the band of admissible deviations by the parameter and time increases. As a result, the step of a strong earthquake, requiring a large admissible deviation by the parameter, is more and more rigidly determined by a reduction of the time interval, in which a strong shock can occur. This variability of stochasticity/determinacy of the process, depending on the level of predicted nonlinearity L_{pn} , have to be taken into account in

² In the coordinates from the first point of approximation area to the calculated shock, normalized to the range from 0 to 1.

³ http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo_e.html; data are updated with a delay of about 2 years.

Table 1. Data on main shock, sample and some characteristics of the foreshock trend for the examples of retrospective prediction extrapolations given in Fig. 1.

		1	2	3	4
<i>Earthquake</i>					
Date		1936.11.03	2016.11.22	2010.02.27	2005.08.16
Time		05:45:57	05:59:46	05:31:25	11:46:25
<i>M</i>		7.4	7.4	7.2	7.2
Hypocenter	latitude	38.263°	37.355°	25.919°	38.150°
	longitude	142.062°	141.604°	128.680°	142.278°
	depth, km	61	24.5	37	42
<i>Sample</i>					
Radius, km		300	30	60	30
Center	latitude	40.588°	37.365°	26.175°	38.084°
	longitude	141.854°	141.784°	128.743°	142.081°
	depth, km	0	40	40	40
<i>Foreshock trend</i>					
$t_{sh} - t_c$, days		1749.696	6989.198	5355.244	132.471
$\Delta = (t_{sh} - t_c)/\sigma_t$		16.8551	22.0833	65.0781	658.6533
L_{pn}		0.5645	0.9264	0.9896	0.9999
<i>A</i>		1.9900	2.3711	2.2984	2.0816
α		0.5918	2.0000	1.4827	2.0000
$\lg k$		1.9937	-14.8779	-8.4397	-11.9478

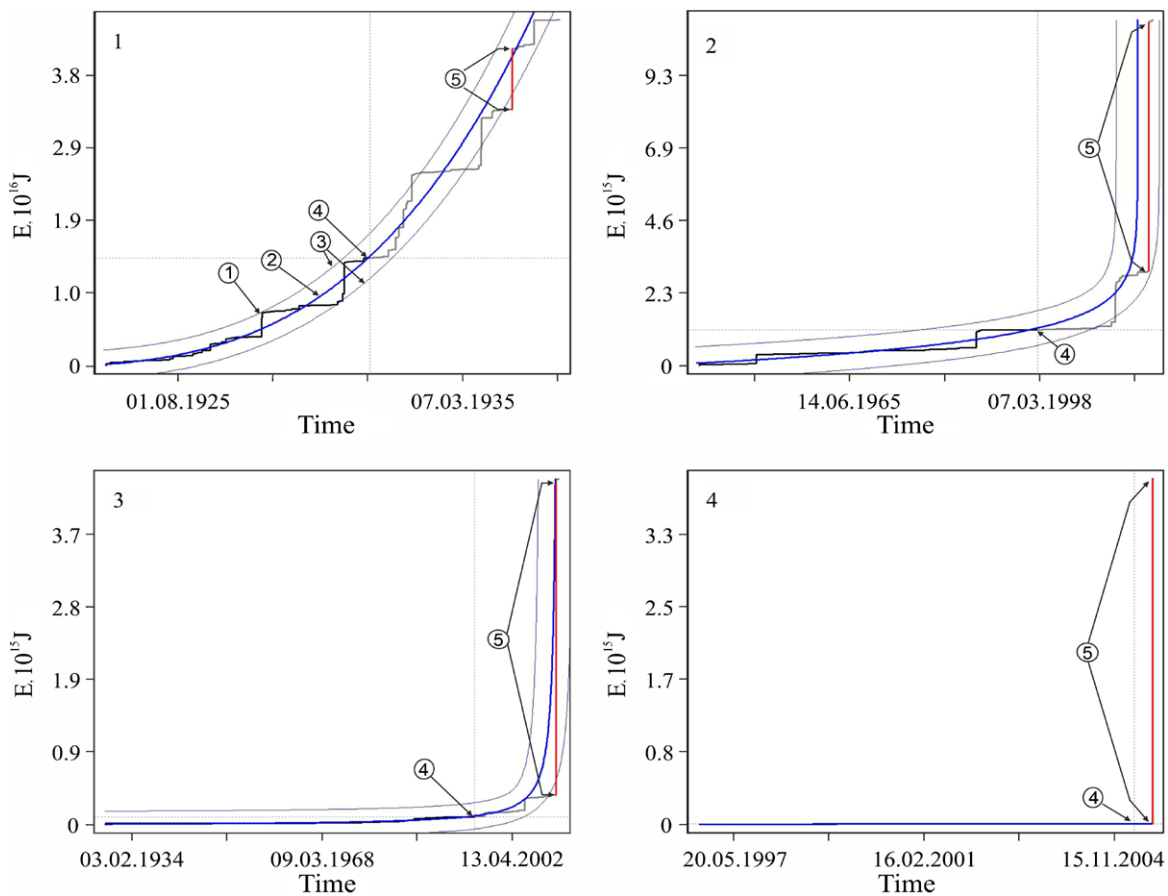


Figure 2. Examples of some foreshock extrapolations of the energy flux. Figures in circles: 1 – actual data curve, 2 – calculated curve, 3 – errors band ($\pm 3\sigma$), 4 – retrospective prediction moment, 5 – strong earthquake. The serial numbers of the graphs correspond to the data numbering in Table 1. The intersection of the vertical and horizontal dotted lines on the graphs corresponds to “current” values of time and parameter, there is “past” to the left and below this intersection, and “future” – to the right and above.

predictive extrapolation calculations of the time of strong earthquakes.

Resulting from the analysis of the JMA catalogue data, 186 zones were identified, for each

of which there are at least 10 uncomplete (as of August 31, 2018) prediction definitions with a potentially dangerous increase in seismic activity. The regularities of activation in these zones have

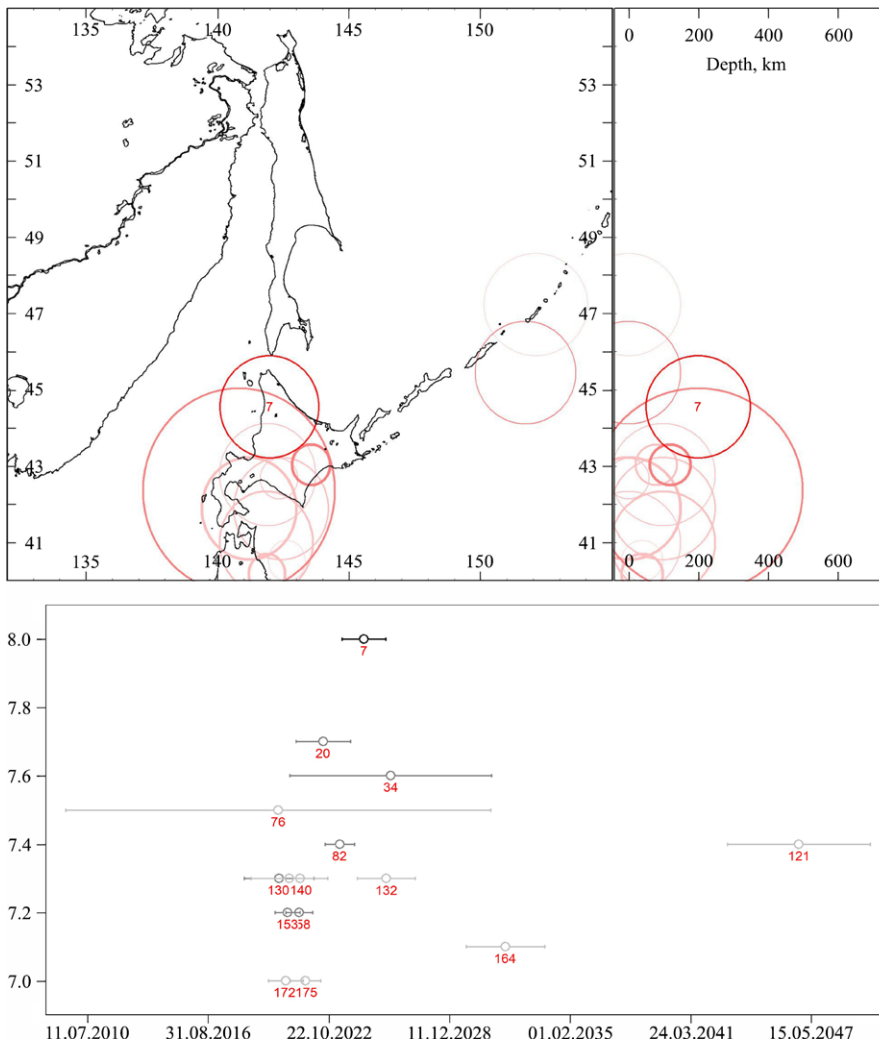


Figure 3. Map (top left) of the potentially dangerous zones of an increase in seismic energy flux according to the JMA catalogue as of August 31, 2018, its meridional sectional view (top right) and time base of the seismic hazard.

The circles show the position of the samples, in which potentially dangerous activity was identified; the brightness of the circle line reflects the danger level (according to the strongest possible precedent earthquake by the current regularities of activation), and its thickness is the number of identified potentially dangerous uncomplete prediction definitions; number 7 denotes the most dangerous zone, where uncompleted predictions have tendencies to activation, similar to the foreshock preparation of strong earthquakes up to the precedent earthquake with $M = 8.0$.

The time base of the seismic hazard is made up of the strongest precedent earthquake for each zone; zones numbering here and in Table 2 is in descending order of their danger (according to the strongest precedent shock) all over the JMA catalogue; the error in the estimated time of the precedent shock is shown by the maximum of the $3\sigma_{sh}$ and $3\sigma_t$ values (see Table 2); precedent shocks and their possible time error are shown in five gradations of shades from pale gray to black depending on the level of predicted nonlinearity L_{pn} : (<0.5 , $0.5-0.8$, $0.8-0.95$, $0.95-0.99$, $0.99-1.00$), which reflects stochasticity/determinacy of the relationship between the shock time t_{sh} and the rate of change in the x'_{sh} parameter.

analogues in the foreshock preparation of 759 precedent earthquakes. The zones with localization to the north of 40° N are of importance for estimating the seismic and tsunami hazard on the territory of Sakhalin and the Southern Kurils. 15 potentially dangerous zones, the development trends of seismicity of which have analogues in the foreshock preparation of 56 strong precedent earthquakes (Fig. 3, Table 2), were identified here. The greatest danger for the territory concerned is the activity trend in zone 7 (Fig. 4), which has a radius of 150 km and is located in the north of Hokkaido Island in close proximity to the southern part of Sakhalin Island and the regional center Yuzhno-Sakhalinsk. The development of seismic activity in this zone has analogues in the foreshock preparation of the earthquake with $M = 8.0$, which occurred on December 21, 1946, with the epicenter to the south of Cape Shionomisaki. The estimated time of a similar shock in zone 7 corresponds to August 6, 2024 with a time error ($3\sigma_{sh}$) tolerance of a little over a year. Besides, less strong earthquakes are also possible in zone 7, since there are some precedents in the foreshock preparation of another 6 strong earthquakes of level $M = 7.0-7.5$ for some uncomplete predictions for this zone.

The current trends in the seismic activity development

and their prediction extrapolation for zones 20, 82, 153, 158 illustrate (Fig. 5) a variety of precedent extrapolation estimates of the seismic hazard in different zones. Obviously, all 15 potentially dangerous zones deserve attention. However, the results obtained for these zones should be considered rather as working materials for expert groups on the seismic hazard estimate. In this case, first of all, it is necessary to take into account that all the results of the precedent extrapolative estimates presented here are conditional, i.e. they make sense, provided that the identified potentially dangerous trends did not come out the band of admissible errors for the period from August 2018 to the present (the period of the current data delay in the JMA catalogue) and remain relevant in the near future.

Therefore, at this stage, the method of approximation analysis and prediction extrapolation based on the DSNP-equation can and should be used as the primary method for spatial diagnostics of the presence of dangerous seismic trends and for estimating the available time reserves. It is logical to build this method of analysis and estimation into the very process of creating seismic catalogues, that document the flux of seismic events. In this case, firstly, any updating the catalogue data and/or their editing will automatically reflect the current situation of the dangerous trends in seismic activity, their appearance or disappearance (in case of activity going beyond the band of admissible deviations of the trend), and secondly, automation of precedent-extrapolation estimates makes it possible in the future to use these estimates as an independent prediction method at a short-term lead time

The 4th example of retrospective prediction extrapolations demonstrates the certain grounds for this in Fig. 2 and in Table 1. With a 4-month lead time, this retrospective prediction is characterized with an average time deviation (σ) of about 0.2 day at the moment of the shock. That is, the total band of admissible errors $\pm 3\sigma_t$ is only 1.2 days in this case. This, in turn, makes it practically possible to

use short-term preventive measures during a dangerous period, for example, evacuating the population for this period from potentially dangerous buildings and structures and declaring high alert in the areas of tsunami risk. In addition, such medium-term and short-term predictions have a small radius of spatial localization, as a rule, which also eases their practical use.

Currently, the number of such retrospective predictions in the precedent base is not great, but there is a possibility of its updating due to the results of other catalogues processing. Strong earthquakes are rare, and the quality and detail of seismic activity recording have increased significantly in recent years and decades. In particular, the JMA catalogue contains information about only 0.5 million events for 80 years of observations in the XX century, while in the first two decades of the current century, the number of recorded earthquakes exceeded 3.5 million. It is natural to expect that detailed recording the seismic

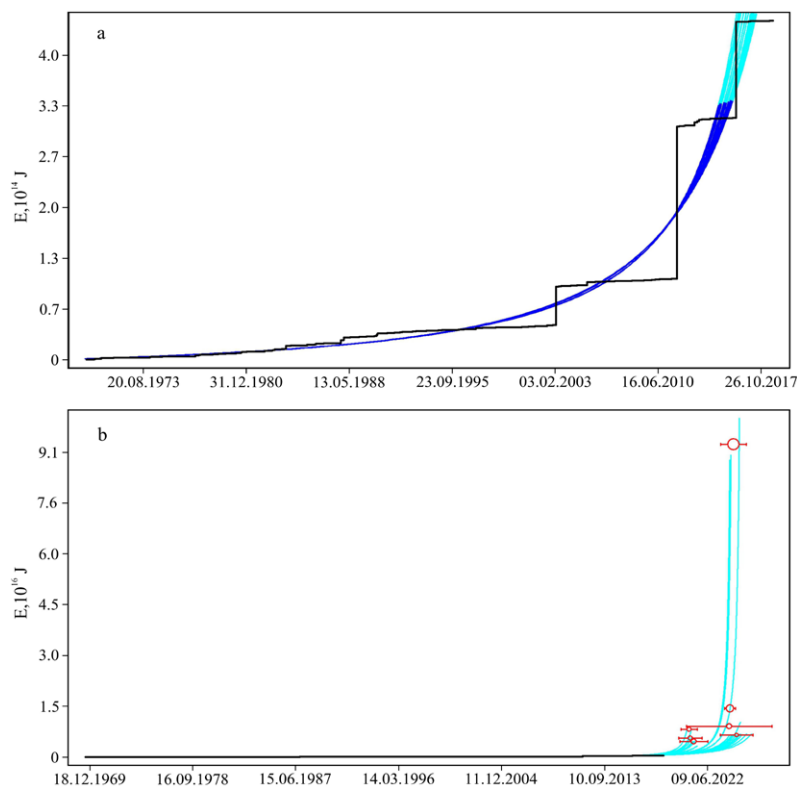


Figure 4. Current (top) and predicted (bottom) activity development according to the seismic energy flux E in zone 7. Here and in the figures below the calculated curves of the activity trends are shown in darker shade in the approximation part of the trend and in lighter shade – in the extrapolation one. The circles show the calculated location of the precedent earthquakes, size of the circles depends on magnitude (in this case, maximum precedent magnitude $M = 8.0$). The error in calculated time of the precedent shock is shown according to the maximum of $3\sigma_{sh}$ and $3\sigma_t$ values (see Table 2).

Table 2. Localization of zones with a potentially dangerous activity, results of predictive calculations and precedent strong earthquakes

Zone no.	Contemporary potentially dangerous activity										Prediction calculations										Precedent earthquake		
	Localization					Activation beginning	n	$L_{pn,av}$	M_{pr}	n_{pr}	Calculated date	Error, day		L_{pn}	A	Time			Hypocenter				
	Lat	Lon	Dep	R, km	$3\sigma_{sh}$							$3\sigma_r$	Hypocenter										
						Lat	Lon	Dep															
7	44.554	141.972	200.0	150	1969.07.28	30	0.9799	7.0	1110	2024.11.15	505	362	0.9796	2.2687	2011.04.11 17:16	36.946	140.673	6.4					
								7.1	2	2020.12.14	107	359	0.9845	2.1313	1982.03.21 11:32	42.067	142.600	40.0					
								7.1	2	2020.10.30	219	253	0.9894	2.1692	2004.11.29 03:32	42.946	145.275	48.2					
								7.2	8	2021.03.25	95	438	0.9801	2.1087	2005.08.16 11:46	38.150	142.278	42.0					
								7.2	29	2024.04.02	1325	284	0.9849	2.2769	2008.06.14 08:43	39.030	140.881	7.8					
								7.5	1	2024.04.26	0	162	0.9913	2.3291	1993.01.15 20:06	42.920	144.353	100.6					
								8.0	3	2024.08.06	403	25	0.9986	2.3960	1946.12.21 04:19	32.935	135.849	24.0					
20	42.353	140.816	200.0	300	1997.02.10	43	0.6756	7.0	1951	2020.06.24	455	401	0.5905	1.3073	2011.11.08 11:59	27.298	125.739	217.0					
								7.2	3225	2021.09.21	476	344	0.7004	1.5396	2010.02.27 05:31	25.919	128.680	37.0					
								7.5	129	2022.07.03	504	196	0.8783	1.9613	1964.06.16 13:01	38.370	139.212	34.1					
								7.6	43	2022.06.20	502	232	0.8456	1.8721	1984.03.06 11:17	29.343	139.202	452.0					
								7.7	215	2022.07.08	504	139	0.9214	2.1037	1998.05.04 08:30	22.379	125.437	35.0					
34	43.028	143.557	120.0	60	1931.08.21	81	0.9740	7.0	5	2019.05.02	37	629	0.9701	2.3226	1938.05.23 16:18	36.574	141.324	0.0					
								7.0	1	2019.08.06	0	1203	0.9571	2.0814	1971.08.02 16:24	41.301	143.529	54.0					
								7.0	3	2020.09.14	93	1115	0.9344	2.2294	2000.01.28 23:21	43.008	146.744	58.5					
								7.0	2	2023.03.19	18	1054	0.9344	2.3167	2002.03.31 15:52	24.233	121.970	55.0					
								7.0	8	2018.02.03	232	1252	0.9360	2.1092	2008.05.08 01:45	36.228	141.608	50.6					
								7.0	123	2022.04.03	3921	980	0.9643	2.1835	2014.07.12 04:22	37.050	142.321	33.0					
								7.1	1	2019.09.10	0	705	0.9766	2.1940	2004.11.29 03:32	42.946	145.275	48.2					
								7.1	4	2018.10.06	116	1071	0.9640	2.0926	2008.09.11 09:20	41.776	144.152	30.9					
								7.3	2	2024.04.21	35	634	0.9779	2.2906	1995.12.04 03:01	44.560	150.130	57.0					
								7.3	8	2021.03.01	3891	594	0.9720	2.3581	2001.12.18 13:02	23.893	122.815	8.0					
								7.6	122	2025.12.13	1873	317	0.9886	2.3941	2011.03.11 15:15	36.121	141.253	42.7					
76	45.446	151.714	0.0	150	1925.02.20	19	0.4602	7.4	16	2024.03.20	260	3717	0.4736	1.3683	1978.06.12 17:14	38.150	142.167	40.0					
								7.5	3	2020.03.25	569	3947	0.3886	1.2231	1993.01.15 20:06	42.920	144.353	100.6					
82	40.159	141.882	40.0	60	1995.01.07	102	0.9400	7.0	68	2020.04.18	313	771	0.8758	1.7441	2002.03.31 15:52	24.233	121.970	55.0					
								7.0	99	2023.05.09	733	339	0.9470	2.3874	2014.07.12 04:22	37.050	142.321	33.0					
								7.1	13	2020.12.13	22	591	0.9118	1.9835	1973.06.24 11:43	43.164	146.633	52.0					
								7.4	234	2023.05.15	20	272	0.9572	2.4521	2016.11.22 05:59	37.355	141.604	24.5					
121	47.228	152.103	0.0	150	1931.02.23	12	0.7511	7.4	12	2046.09.20	92	1331	0.7511	2.2419	1978.06.12 17:14	38.150	142.167	40.0					

Zone no.	Contemporary potentially dangerous activity										Prediction calculations						Precedent earthquake				
	Localization					Activation beginning	n	$L_{pm\ av.}$	M_{pr}	n_{pr}	Calculated date	Error, day		L_{pm}	A	Time			Hypocenter		
	Center		R , km	Dep	Lat							Lon	3 σ_{st}			3 σ_r	Lat	Lon	Dep		
	Lat	Lon																			
130	43.028	143.557	80.0	60	1933.10.16	48	0.9472	7.0	6	2029.11.13	223	2309	0.8941	1.9930	1978.03.23	12:15	44.800	149.417	60.0		
								7.0	6	2029.11.11	223	2341	0.8920	1.9864	1995.12.04	03:04	44.706	150.526	0.0		
								7.0	37	2026.11.22	2420	1260	0.9329	2.3562	2002.03.31	15:52	24.233	121.970	55.0		
								7.0	3	2023.11.08	35	1389	0.9367	2.1987	2008.05.08	01:45	36.228	141.608	50.6		
								7.0	94	2029.01.18	2686	875	0.9601	2.3891	2014.07.12	04:22	37.050	142.321	33.0		
								7.3	6	2029.11.19	223	1916	0.9174	2.0705	1978.03.25	04:47	44.333	149.817	40.0		
								7.3	3	2020.04.09	46	643	0.9734	2.3371	2001.12.18	13:02	23.893	122.815	8.0		
								7.3	6	2029.11.20	223	973	0.9624	2.2575	2011.03.09	11:45	38.328	143.280	8.3		
132	40.990	141.854	100.0	150	1995.01.07	33	0.7657	7.3	6039	2025.09.18	409	539	0.7657	2.2305	2011.03.09	11:45	38.328	143.280	8.3		
140	42.669	142.337	0.0	60	1952.08.31	14	0.9993	7.0	1739	2021.10.25	458	32	0.9993	2.1371	2011.04.11	17:16	36.946	140.673	6.4		
								7.3	4	2021.05.04	50	8	0.9998	2.1477	1994.10.09	16:55	43.558	147.802	0.0		
								7.3	5	2023.09.07	145	10	0.9997	2.2083	2011.07.10	09:57	38.032	143.507	34.0		
142	40.990	141.854	0.0	150	1995.01.07	13	0.8395	7.0	12	2020.01.24	29	860	0.8109	1.6931	2011.04.11	17:16	36.946	140.673	6.4		
								7.3	79	2020.10.13	435	716	0.8438	1.8788	2011.03.09	11:45	38.328	143.280	8.3		
153	41.881	141.212	0.0	150	2002.12.05	83	0.9061	7.0	24	2020.07.03	64	234	0.8968	1.9330	2011.04.11	17:16	36.946	140.673	6.4		
								7.2	195	2023.02.16	408	170	0.9262	2.4000	1995.01.07	07:37	40.223	142.305	47.8		
								7.2	641	2020.09.11	123	231	0.9003	1.9680	2008.06.14	08:43	39.030	140.881	7.8		
158	42.772	141.911	100.0	150	1997.02.20	17	0.9328	7.0	16	2021.02.23	113	256	0.9313	2.2952	2011.04.11	17:16	36.946	140.673	6.4		
								7.2	542	2021.04.19	175	249	0.9328	2.3125	2008.06.14	08:43	39.030	140.881	7.8		
164	40.518	142.628	40.0	60	1995.01.07	12	0.6886	7.0	1	2023.08.01	0	645	0.7577	2.0178	1938.05.23	16:18	36.574	141.324	0.0		
								7.0	173	2026.11.16	1792	765	0.6843	2.1397	2002.03.31	15:52	24.233	121.970	55.0		
								7.0	4	2024.06.07	933	597	0.7748	2.1323	2014.07.12	04:22	37.050	142.321	33.0		
								7.1	8	2031.10.21	120	723	0.7302	2.4500	1982.03.21	11:32	42.067	142.600	40.0		
172	41.881	142.424	0.0	150	2009.06.12	30	0.5161	7.0	2233	2020.08.09	129	323	0.5159	1.6681	2005.03.20	10:53	33.739	130.176	9.2		
								7.0	6	2021.04.02	276	352	0.5544	1.7229	2013.04.19	12:05	45.301	150.957	125.0		
175	41.881	142.424	100.0	150	2003.10.09	23	0.5150	7.0	23	2021.08.08	32	289	0.5150	1.5550	2013.04.19	12:05	45.301	150.957	125.0		

Note. Lat, Lon – latitude and longitude ($^{\circ}$), respectively; Dep – depth, km; R – radius of a zone; n – number of incomplete prediction definitions; $L_{pm\ av.}$ – average level of predicted nonlinearity throughout a zone; M_{pr} – magnitude of precedent strong earthquake; n_{pr} – number of precedent prediction definitions used in prediction calculations for a given precedent; $3\sigma_{st}$ and $3\sigma_r$ – time error, calculated by precedent retrospective prediction definitions, respectively, and on the basis of average deviation of approximated data from the calculated curve; L_{pm} and A – average values of predicted nonlinearity level and approximation and extrapolation ratio in prediction calculations for a given precedent shock. Numbering of zones in their danger descending order (by the strongest precedent shock) throughout the JMA catalogue.

preparation of strong earthquakes in the future will inevitably result in the updating the precedent base with more qualitative data. And this, in turn, will allow the methodology to be extended to short-term prediction extrapolations.

There are also certain grounds to expect that foreshock activation before strong earthquakes is of a cyclical nature. In particular, among the po-

tentially dangerous zones of Japan, identified by the current state of the JMA catalogue⁴, there is a cluster of spatially close and partially intersecting zones 2, 4, 6 with a radius of 150 km and localization in the region of the northeastern part of Shikoku Island and the cities of Kobe and Osaka with a danger of an earthquake of $M = 8.0-8.2$ class in 2021. In the context of polycyclicality, it is impor-

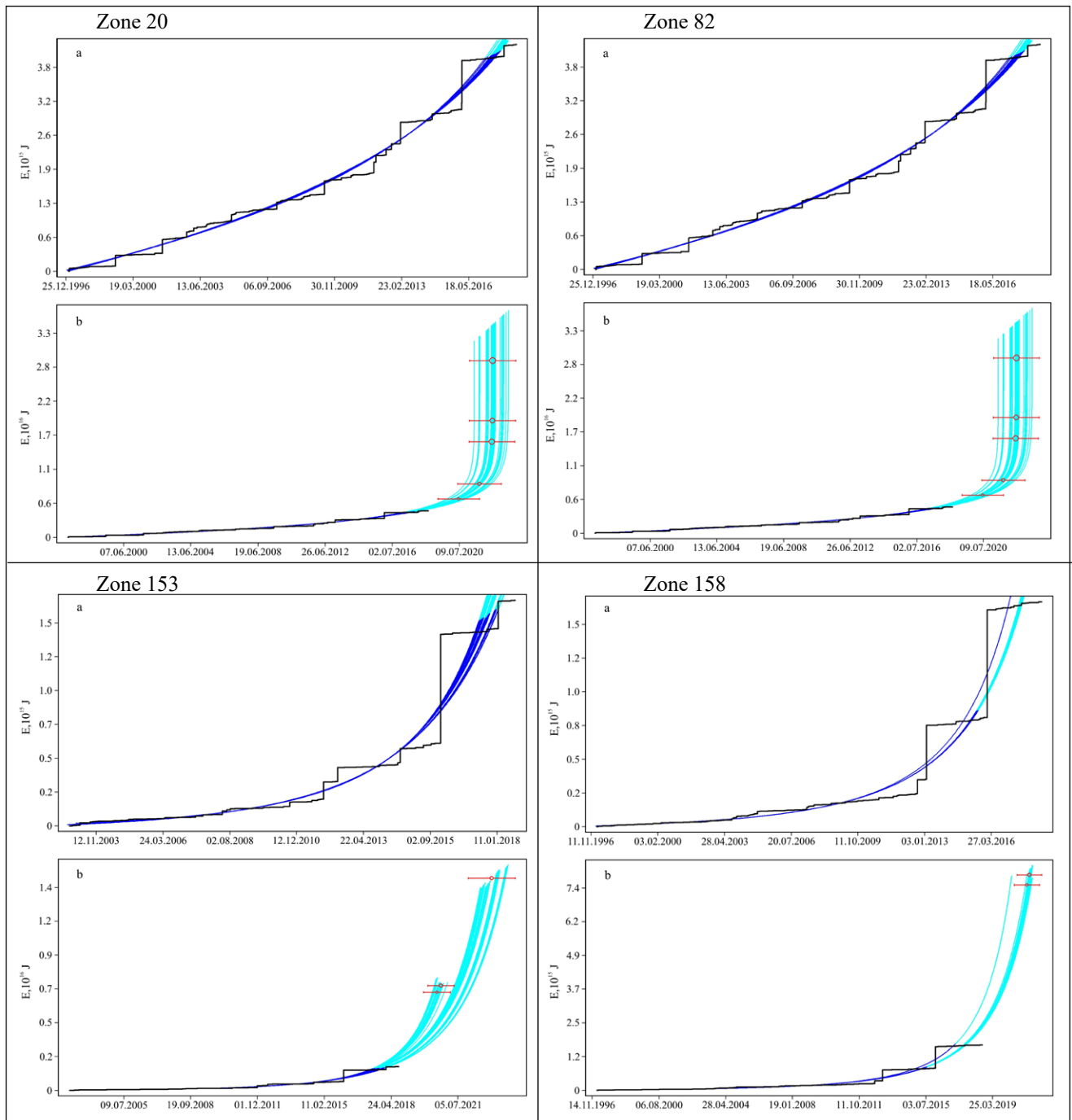


Figure 5. Current (a) and predicted (b) seismic activity development in calculated zones.

⁴ Malyshev A.I, Malyshev L.K. Foreshock predictability of strong earthquakes in Japan by the seismic energy flux (submitted for publication in the "Physics of the Solid Earth" journal).

tant for us that in zone 4 belonging to this cluster, two cycles of a potentially dangerous activity increase were established: the cycle of a gradual increase in the energy flux with a relatively low predicted nonlinearity began in September, 1943 and a shorter cycle with a high predicted nonlinearity. The last cycle began immediately after the devastating earthquake in Kobe on January 17, 1995 ($M = 7.3$), and it is this cycle that has the most dangerous trends of activity increase (up to the existing precedent with $M = 8.0$).

The possible polycyclic nature of the foreshock preparation of strong earthquakes and an extremely wide range of their predicted lead times allow us to outline a conditional staging of actions when identifying potentially dangerous trends in seismic activity: 1) with a predicted lead time of more than 1 year – verification of the identified danger using a set of all available prediction methods; 2) with a predicted lead time from 1 year to 10 days (especially in areas with persistent and verified at stage 1 trends) – bringing the civil defense and emergency services into high readiness; 3) with a lead time of less than 10 days in zones with identified at the 1st and/or 2nd stages and persisting dangerous trends – connection to the process of precedent-extrapolation estimates of automatic warning systems in order to inform about the clarification of the time period of the danger or about its cancellation. As already mentioned above, at present, precedent-extrapolation estimates can be used at the level of the 1st stage, while the 2nd and 3rd stages are the goal of future researches, achievable provided that the estimation algorithm is integrated into the process of seismic catalogues generating with simultaneous increase of computing power; and qualitatively and quantitatively increasing precedent data.

At the regional level, the use of the method can have its own specificity, due to the nature of seismicity, information on the regional seismic flux gathered in catalogues, the current state of the recording seismic networks and ideas about the minimum energy of dangerous earthquakes.

Let's consider the regional specifics of using the method on the example of the Sakhalin region. The highest level of regional seismic activity is characteristic of the Kuril island-arc-subduction

system due to its high tectonic activity. Instrumental methods have repeatedly recorded earthquakes of level $M \geq 8$ here, accompanied by a tsunami.

Sakhalin Island, where most of the population and industry of the region is concentrated, is characterized by a moderate level of seismic activity [Tikhonov et al., 2017]. For 10 years, an average of one earthquake with $M > 6$ and about 10 events with $M > 5$ is recorded here. The hypocenters of Sakhalin earthquakes are located at shallow depths (up to 30 km) and along the Kuril seismic focal zone (depth 250–650 km). Deep-focus earthquakes, as a rule, do not pose a serious seismic hazard, while shallow earthquakes can bring to significant destruction and numerous casualties. In particular, an earthquake with $M = 7.2$ completely destroyed the town of Neftegorsk in the northeast of the island in 1995. In one night, 2 240 people died, including 308 children, 720 were seriously injured and only 30 were not hurt⁵. This earthquake, as well as the Uglegorsk one in 2000 with $M = 7.0$ in the central part of the island and the Nevelsk one in 2007 with $M = 6.2$ in the south indicate the high seismic hazard of Sakhalin [Zakupin et al., 2019] despite the relatively moderate level of its seismic activity.

Along with the usual tectonic seismicity, Sakhalin is characterized with technogenic and technogenic-trigger seismicity in connection with the mining on the island and in the adjacent water area ([Tikhonov, 2010; Semenova et al., 2020]; AA Stepnov⁶). There is reason to expect [Foulger et al., 2018] that with the planned intensification of the development of hydrocarbon deposits and other mineral resources, the technogenic and technogenic-trigger components of regional seismicity will increase. The situation with the Groningen field (Netherlands) may be cited as an example, where natural gas production has caused an increase in seismic activity [Thienen-Visser et al., 2015; Bogoyavlensky, Bogoyavlensky, 2018], which was the reason for the decision to prematurely terminate the operation of the field in 2030⁷, and then to postpone the completion of operation to 2022⁸, with the initial plans for using the field until 2080.

As a rule, three catalogues are used when studying the regional flux of seismic events in Sakhalin [Tikhonov et al., 2017; Zakupin et al., 2019;

⁵ <https://pressa.tv/interesnoe/72899-neftegorsk-gorod-mertvyh-strashnoe-zemletryasenie-28-maya-1995-goda-8-foto-video.html>

⁶ Stepnov A.A. 2015. Complex automated monitoring system for analysis of contemporary seismicity of the North Sakhalin: diss. ... cand. in phys. and math. sciences. Yuzhno-Sakhalinsk, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS, 135 p.

⁷ <https://ria.ru/20190225/1551301913.html>

⁸ <https://ria.ru/20191014/1559692698.html>

Zakupin, Boginskaya, 2020]. The data for the longest period of observations (1905–2005) is contained in the regional earthquake catalogue [Regional..., 2006], where there is information about more than 3500 seismic events with $M \geq 3.0$ in the area of Sakhalin Island. The catalogue of the Sakhalin branch of the Federal Research Center of the UGS RAS, presented in print in annual issues (for example, [Fokina et al., 2020]), includes earthquakes with $M \geq 3.0$ since 1997. Nevertheless, the real state of seismicity in Sakhalin was able to be estimated only after the deployment of local networks of digital seismic stations in the south and north of the island. Therefore, the most reliable source of information about the weak seismicity of Sakhalin, according to [Tikhonov et al., 2017], since 2003, has become the third catalogue formed on the basis of data from local networks of recording stations [Earthquake... , 2011] and without omissions including earthquakes with $M \geq 2.0$.

The high danger of technogenic and technogenic-trigger earthquakes in the zones of human activity necessitates expanding the range of potentially dangerous earthquakes up to including earthquakes with $M \geq 5$ [Zakupin et al., 2018; Zakupin, Semenova, 2018]. The possibility of using the described method to identify the danger of technogenic and technogenic-trigger earthquakes is not in doubt. At least the regularities of foreshock activation before strong earthquakes associated with the reservoirs [Gupta, Rastogi, 1979] ($M = 6.2$ in 1966 near Lake Kremasta in Greece, $M = 6.1$ in 1963 near Lake Kariba in Zambia – Rhodesia, $M = 5.0$ on September 13 and $M = 6.4$ on December 10, 1967 at the Coyne Dam in India), were used to substantiate the DSNP-equation in its primary form [Malyshev, 1991]. In addition, the first attempts to practically apply the DSNP-equation relate to the study of rockbursts in the South Ural bauxite region, where on May 28, 1990, a strong tectonic rockburst occurred with the destruction of underground mine workings of the Kurgazakskaya mine over an area of 45 ha.

Thus, the regional specificity of the possible use of the precedent-extrapolation method in the Sakhalin region is due to two types of seismic hazard, which differ in the localization of potentially dangerous earthquakes and their minimum magnitude.

The first type is represented by tectonogenic seismic activity of the Kuril island-arc-subduction system. Here it is possible to use the described

methodology without significant changes using the data of the catalogue [Regional... , 2006] and the catalogue of the Sakhalin branch of the Federal Research Center of the UGS RAS, as well as using the data of adjacent regions (Kamchatka regional seismic catalogue for the northern part of the Kuril system and the JMA catalogue for the southern part).

The second type of the seismic hazard is associated with the tectonic and technogenic-tectonic seismicity of Sakhalin Island. A precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard is possible here only on the basis of data from local networks of recording stations using the precedent base for foreshock preparation of earthquakes with $M \geq 5$. Due to the prevalence of technogenic seismicity [Foulger et al., 2018], it seems possible to create a similar precedent base for analysis of data from the US Geological Survey (USGS) World Catalogue with a simultaneous requirement strengthening for the determinism of foreshock retrospective predictions to at least $L_{pn} \geq 0.98$. The use of data from local networks since 2003, with the maximum approximation and extrapolation ratio $A = 2.47$ determined on the basis of the JMA catalogue data, theoretically makes it possible to obtain a predicted lead time of up to 3.5 years, which corresponds to medium-term and long-term predictability and the 1st stage of actions when identifying the potentially dangerous trends of seismic activity.

Conclusion

Analysis of the foreshock sequences in terms of the lead time and accuracy of retrospective prediction determinations indicates the possibility of their use in the medium-term and long-term quantitative prediction of strong earthquakes. In the current state, the precedent-extrapolation method is a primary (research) variation, that needs further adaptation, debugging, identification and correction of minor weaknesses and (possibly) errors. With regard to the development of the method itself, there may be some increase in its accuracy and efficiency with a corresponding increase in computing power. It also seems promising to apply the described method to the “conditional deformations” flux, the trends of which are characterized by a smaller error band and therefore, in comparison with the energy flux, can show a higher accuracy in prediction extrapolations.

Nevertheless, we suppose it to be already suitable for practical use. It should be borne in mind that the method, at least at this stage, is not intend-

ed to be used as a self-sufficient and autonomous for forecasting strong earthquakes. It is based on a retrospective analysis of the predictability of foreshock sequences and allows identifying the areas with potentially dangerous trends of increasing seismic activity and to calculate the time, at which these trends (providing they persist) can reach a dangerous level, using the accumulated precedent experience. Focus on potentially hazardous areas and prioritizing with consideration to the level of danger and the available reserve of time make it possible to concentrate the entire complex of prediction methods at the right time in a certain spatial localization: ground and satellite deformation observations, studies of geophysical fields, groundwater regime and degassing processes, and also growing (if necessary) the density of the recording network of seismic stations. In our opinion, early detection of a hazard with the subsequent concentration of prediction methods is the key to success both in predicting strong earthquakes and in obtaining new high-quality data on their preparation.

On the example of the current state of the JMA catalogue, 15 zones with the potentially dangerous (for the territory of Sakhalin and the Kuril Islands) seismic activity increase have been identified. For these zones, according to the available precedents of strong ($M \geq 7$) earthquakes, the possible

time of their analogs was calculated in 56 cases. The greatest danger for the concerned territory is zone 7, located in the north of Hokkaido Island in close proximity to the southern part of Sakhalin Island. The development of the seismic activity in this zone has analogs in the foreshock preparation of an earthquake with $M = 8.0$. The estimated time for a similar shock corresponds to August 6, 2024, with a time tolerance of just over a year.

The regional specificity of the possible application of precedent-extrapolation estimates in the Sakhalin region is due to two types of seismic hazard, which differ in the localization of potentially dangerous earthquakes and their minimum magnitude: tectonogenic seismic activity of the Kuril island-arc-subduction system and tectonogenic-technogenic and technogenic-triggering seismicity of Sakhalin Island. When estimating the hazard of the Kuril island-arc-subduction system, it is possible to use the described method without significant changes with the involvement of data from the regional catalogues. The precedent-extrapolation estimate of the seismic hazard on Sakhalin Island is possible only on the basis of data from local networks of recording stations and requires expanding the precedent base for foreshock preparation of earthquakes to a level of $M \geq 5$.

References

1. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V. **2018**. Problems of the Netherlands gas production: record-breaking seismic activity at the Groningen field. *Gas Industry*, 4 (767): 126–135. (In Russ.).
2. Fokina T.A., Safonov D.A., Kostylev D.V., Mikhaylov V.I. **2020**. Sakhalin. *Zemletriaseniia Severnoi` Evrazii* = [*Earthquakes of the Northern Eurasia*], 23 (2014): 152–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.14>
3. Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. **2018**. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*, 178: 438–514. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
4. Gupta H.K., Rastogi B.K. **1979**. *Dams and earthquakes*. Moscow: Mir Publ., 251 p. Transl. from Engl.: Gupta H.K., Rastogi B.K. **1976**. *Dams and earthquakes*. Amsterdam: Elsevier.
5. Kanamori H. **1977**. The energy release in great earthquakes. *J. of Geophysical Research*, 82(20): 2981–2987. <https://doi.org/10.1029/jb082i020p02981>
6. [*Earthquake catalogue of the south of Sakhalin Island from 2000 to 2010 (according to data of the autonomous digital seismic stations)*]. **2011**. Authors: Kim Ch.U., Semenova E.P., Zherdeva O.A. et al. Vladivostok: Dal'nauka, 357 p.
7. Malyshev A.I. **1991**. Dynamics of self-developing processes. *Volcanology & Seismology*, 4: 61–72. (In Russ.).
8. Malyshev A.I. **2017(2016)**. Estimating the predictability of the seismicity rate: The 1964 eruption of Shiveluch Volcano. *J. of Volcanology and Seismology*, 10(6): 347–359. <https://doi.org/10.1134/S0742046316060051>
9. Malyshev A.I. **2019a**. The predictability of seismicity and large earthquakes: Kamchatka 1962 to 2014. *J. of Volcanology and Seismology*, 13(1): 42–55. <https://doi.org/10.31857/s0205-96142019152-66>
10. Malyshev A.I. **2019b**. Predictability of the rate of seismic energy in North America. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 55(6): 864–878. <https://doi.org/10.1134/S106935131906003X>
11. Malyshev A.I. **2020**. Predictability of the seismic energy flux: Southern Europe and the Mediterranean. *J. of Volcanology and Seismology*, 14(1): 30–43. <https://doi.org/10.1134/S0742046320010030>

12. Malyshev A.I., Malysheva L.K. **2018**. Predictability of seismic energy rate in northwest frame of Pacific Ocean on the base of USGS catalogue. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 141–153. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.141-153>
13. Malyshev A.I., Malysheva L.K. **2019**. [Statistical analysis of the seismic energy flux forecasting]. In: *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii: Trudy Sed'moy nauchno-tekhnicheskoy konf., 29 sent. – 5 okt. 2019, Petropavlovsk-Kamchatskiy* [Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East: Proceedings of the seventh scientific and technical conference, September 29 – October 5, 2019, Petropavlovsk-Kamchatskiy]. Obninsk: FITs EGS RAN, 307–311. (In Russ.).
14. *Regional catalogue of Sakhalin Island earthquakes, 1905–2005*. Poplavskaya L.N. (ed.) **2006**. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 103 p. (In Russ.).
15. Semenova E.P., Boginskaya N.V., Kostylev D.V. **2020**. Ulegorsk earthquake on September 13, 2020 (Sakhalin Island): preconditions for the occurrence and the results of observations in the epicentral zone. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 474–485. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.474-485>
16. Thienen-Visser K., Sijacic D., Nepveu M., Wees J., Hettelaar J. **2015**. Response of induced seismicity to production changes in the Groningen field. *TNO Report 2015 R11367*. 56 p. URL: https://www.nlog.nl/sites/default/files/tno%202015%20r11367_final_tno_report_nov%202015.pdf
17. Tikhonov I.N. **2010**. Induced seismicity in the vicinity of Piltun-Astokh gas and oil field on Sakhalin island shelf. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 3: 59–63. (In Russ.).
18. Tikhonov I.N., Mikhaylov V.I., Malyshev A.I. **2017**. Modeling the Southern Sakhalin earthquake sequences preceding strong shocks for short-term prediction of their origin time. *Russian J. of Pacific Geology*, 11(1): 1–10. <https://doi.org/10.1134/s1819714017010092>
19. Zakupin A.S., Boginskaya N.V. **2020**. Mid-term assessments of seismic hazards on Sakhalin Island using the LURR method: new results. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(2): 160–177. (In Russ & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.2.160-168.169-177>
20. Zakupin A.S., Semenova E.P. **2018**. Study of the process of preparation of strong earthquakes ($M_w > 5$) on Sakhalin using the LURR method. *Vestnik KRAUNTs. Fiz.-mat. nauki = Bull. KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*, 5: 83–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-83-98>
21. Zakupin A.S., Levin Yu.N., Boginskaya N.V., Zherdeva O.A. **2018**. Development of medium-term prediction methods: A case study of the August 14, 2016 Onor ($M = 5.8$) earthquake on Sakhalin. *Russian Geology and Geophysics*, 59(11): 1526–1532. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.012>
22. Zakupin A.S., Boginskaya N.V., Andreeva M.Yu. **2019**. Methodological aspects of the study of seismic sequences by SDP (self-developing processes) on the example of the Nevel'sk earthquake on Sakhalin. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 377–389. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.377-389>

Об авторах

МАЛЬШЕВ Александр Иванович (<https://orcid.org/0000-0002-4306-8000>; ResearcherID P-8918-2016), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, Екатеринбург, malyshev@igg.uran.ru

МАЛЬШЕВА Лидия Константиновна (<https://orcid.org/0000-0002-2784-2182>; ResearcherID W-3978-2017), научный сотрудник, Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, Екатеринбург, malysheva@igg.uran.ru

About the Authors

MALYSHEV Aleksandr I. (<https://orcid.org/0000-0002-4306-8000>; ResearcherID P-8918-2016), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, malyshev@igg.uran.ru

MALYSHEVA Lidiia K. (<https://orcid.org/0000-0002-2784-2182>; ResearcherID W-3978-2017), Researcher, The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, malysheva@igg.uran.ru