УДК 550.343.6

ПРОГНОЗИРУЕМОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОТОКА И СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ в 1962–2014 гг.

© 2019 г. А. И. Малышев

Институт геологии и геохимии УрО РАН
620016 Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15

e-mail: malyshev@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 09.01.2017 г.

В работе изложены результаты оценки прогнозируемости сейсмического потока и сильных землетрясений Камчатки по данным Камчатского регионального каталога за 1962–2014 гг. В качестве математической модели используется нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, а алгоритмы оптимизации и оценки прогнозируемости представлены авторскими разработками. Выполненные оценки показывают высокую прогнозируемость сейсмического потока. При этом экстремумы прогнозной нелинейности, свойственные сильным землетрясениям, как правило, соответствуют аналогичным экстремумам сейсмического потока в целом. Из 220 сильных ($K \geq 13.3$) землетрясений Камчатки для 200 землетрясений выявлена форшоковая прогнозируемость (~ 30 тыс. определений), для 215 землетрясений – афтершоковая прогнозируемость (~ 300 тыс. определений). Прогнозируемость, связанная с сильными землетрясениями, начинает проявляться и быстро нарастает на средних (7.5–30 км) радиусах гипоцентральных выборок. Прогнозные дистанции по времени составляют в среднем десятки и сотни дней для форшоковой прогнозируемости и сотни и тысячи дней – для афтершоковой. Полученные результаты демонстрируют очень хорошие перспективы аппроксимационно-экстраполяционного подхода для прогноза как самих сильных землетрясений, так и последующего афтершокового затухания сейсмической активности.

Ключевые слова: Камчатка, землетрясение, динамика, прогноз.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019152-66>

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз таких природных катастроф, как извержения вулканов и разрушительные землетрясения, является фундаментальной научной проблемой, с древнейших времен привлекающей внимание исследователей. Однако несмотря на пристальное внимание, эта проблема по-прежнему далека от разрешения. Как отмечается в работе [Чебров и др., 2011, с. 269], “при всем обилии проведенных и проанализированных наблюдений в мире, место, время и магнитуда будущих разрушительных землетрясений даже в хорошо изученных регионах по-прежнему оказываются неожиданными”. С современным состоянием проблемы можно ознакомиться в работе [Encyclopedia ..., 2016].

Данная работа представляет собой развитие методов саморазвивающихся процессов и картирования сейсмической активности по плотности сейсмического потока [Тихонов, 2006, 2009]. Первоначально предлагается абстрагироваться от прогноза сильных землетрясений и сконцентрировать внимание на прогнозируемости по-

токовых параметров сейсмичности: событий N , накопленных условных деформаций D и энергии землетрясений E , затем рассмотреть взаимосвязь прогнозируемости этих параметров с сильными землетрясениями, и, при наличии взаимосвязи, обсудить перспективы ее использования в прогнозах сильных землетрясений и афтершокового затухания сейсмичности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе используется уравнение динамики саморазвивающихся природных процессов [Малышев, 1991, 2005]

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

где x – любая неубывающая количественная характеристика процесса, x' и x'' – ее производные по времени, k – коэффициент пропорциональности, а показатели степени λ и α определяют нелинейность процесса соответственно в окрестностях стационарного

состояния ($x' \approx x'_0$) и на значительном от него удалении ($x' \gg x'_0$). Случай $x' \gg x'_0$ интересен для прогноза потенциально катастрофических процессов. Поэтому в качестве аппроксимационной модели имеет значение уравнение:

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

Логический смысл уравнения (1) сводится к сделанному в терминах теории подобия предположению [Малышев, 2000], что в случае саморазвивающихся процессов “силы”, возникающие при отклонении системы от стационарного состояния, формируются за счет развития самой системы и пропорциональны разности “энергии движения” системы в текущем и стационарном состояниях: $F_x = a |E_x - E_0|^\gamma$ или $m_x x'' = a |m_x (x')^2/2 - m_x (x'_0)^2/2|^\gamma$. Здесь m_x , F_x и E_x — соответственно “мера инертности”, “сила” и “энергия движения” системы по параметру x . Несложные преобразования последнего выражения приводят к нелинейному дифференциальному уравнению второго порядка (1) при $\lambda = 2$, $\alpha = 2\gamma$ и $k = a m_x \gamma - 1$. В связи с вышесказанным на основе уравнения (1) представляется возможным предложить универсальную методику прогноза количественных характеристик саморазвивающихся природных процессов.

Уравнение (2) соответствует уравнению, предложенному Б. Войтом [Voight, 1988] для описания динамики нарастания вулканической активности в преддверии кульминации извержения. Уравнение Б. Войта используется в методе прогноза разрушений FFM (Forecasting Failure Method), однако в ряде современных работ [Bell et al., 2011, 2013, 2016] утверждается, что данный метод необъективен и неточен даже для ретроспективного анализа. Это утверждение свидетельствует, что исследователи, пытаясь использовать уравнение Б. Войта, не смогли добиться устойчивого моделирования даже на стадии аппроксимации. Причина неудачи в данном случае — проблема с выбором критерия оптимизации [Малышев, 2016]: метод наименьших квадратов, применяемый исследователями, неэффективен.

В отличие от уравнения (1), решения которого в общем случае не представимы в явном виде и требуют численного интегрирования, уравнение (2) легко решается аналитически, причем его решения представляют собой либо собственно линейную зависимость ($k = 0$), либо сводятся к линейным зависимостям при логарифмировании.

Поиск наилучшей аппроксимации осуществляется посредством оптимизации по максимуму коэффициента упорядоченности $K_{reg} = [n \times (x_n - x_1) \times (t_n - t_1) / \Sigma(\Delta x_i \times \Delta t_i)]^{0.5}$. Здесь n — число точек на аппроксимируемом участке фактических данных; $(x_n - x_1)$ и $(t_n - t_1)$ — диа-

пазоны изменения фактических данных на этом участке соответственно по параметру x и времени t (выполняют функции нормирования обеих координат на диапазон изменений от 0 до 1), Δx_i и Δt_i — отклонения каждой точки фактических данных от расчетной кривой соответственно по оси абсцисс и по оси ординат. На практике удобен десятичный логарифм коэффициента упорядоченности — уровень упорядоченности $L_{reg} = \lg(K_{reg})$.

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 ($\pm 3\sigma$).

Количественная оценка дальности прогноза определяется через величину прогнозной дистанции

$$\Delta = \{[(t_p - t_n)/(t_n - t_1)]^2 + [(x_p - x'')/(x_n - x_1)]^2\}^{0.5},$$

где x_p и t_p — значения параметра и времени предельного прогнозируемого события, x_n и t_n — соответствующие значения для “текущего” события и x_1 и t_1 — для начального события в опорной (для аппроксимации и последующего прогноза) последовательности. Проекция прогнозной дистанции Δ на оси координат характеризуют дальность прогноза (прогнозные дистанции) по времени Δt и параметру Δx . Для оценки качества прогноза используется относительная прогнозная дистанция $\Delta_{rel} = \Delta/\sigma$ или ее десятичный логарифм — уровень прогнозируемости $L_p = \lg(\Delta_{rel})$.

Для дифференцированной оценки прогнозной статистики по активизации и затуханию, а также для определения важных для прогноза значений показателя степени нелинейности α в уравнениях (1) и (2) используется коэффициент прогнозной нелинейности $K_{pn} = \Delta_{rel} \times \lg |x'_p/x'_n|$, где $x'_p = x'((t_n + t_p)/2)$ — прогнозируемая на середину прогнозного интервала скорость изменения параметра, а $x'_n = x'(t_n)$ — ее текущее значение. Более подробно методика оценки прогнозируемости изложена в работе [Малышев, 2016].

При пространственном анализе сейсмических данных оценка прогнозируемости осуществляется по фиксированным сферическим гипотенциальным выборкам с радиусами 1.5, 3, 7.5, 15, 30, 60 и 150 км. Выборки распределены по широте, долготе и глубине с шагом смещения, в 1.5 раза меньшим радиуса выборки (т.е. со-

ответственно 1, 2, 5, 10, 20, 40 и 100 км), что обеспечивает пространственное перекрытие выборок и исключает пропуск данных для прогностических оценок. Ради определенности под сильными землетрясениями понимаются такие землетрясения, которые в кумулятивном распределении по энергии превышают порог 99.9% от общего числа землетрясений.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных в работе используется Региональный каталог землетрясений Камчатки [Чеброва, Матвеев, 2013] по состоянию на 14 апреля 2015 г. Каталог включает сведения о 232468 землетрясениях с энергетическим классом K от 0.8 до 17.0. Гипоцентры землетрясений расположены в пределах 45.194–62.566° с.ш., 148.768–175.956° в.д. и находятся на глубине от –4.5 до 701 км. Распределение землетрясений по энергетическому классу имеет бимодальный характер с резким максимумом при $K = 5.0$ (7231 событие) и более пологим при $K = 7.8$ (4750 событий). Судя по всему, первый максимум обусловлен сейсмичностью вулкана Кизимен, так как каталог содержит информацию о более чем 20 тыс. слабых землетрясений из района вулкана (преимущественно за 2010–2011 гг.) с соответствующим максимумом в рас-

пределении по энергетическому классу; в свою очередь второй максимум, скорее всего, характеризует регистрируемую в каталоге региональную сейсмичность. Среднее значение энергетического класса – 6.92, медианное – 7.0. Под приведенное в предыдущем разделе определение сильных землетрясений попадают 220 событий с энергетическим классом $K \geq 13.3$. В качестве параметра x рассматриваются суммарное количество толчков (N), накопленные условные деформации (D), сумма энергии землетрясений (E).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сводная статистика ретропрогнозных оценок приведена в табл. 1. В большинстве прогнозных определений (77.8%) прогнозная дистанция Δ более чем в 3 раза превышает величину средней ошибки σ , т.е. подобные прогнозные определения рассматриваются как значимые. Максимальные уровни прогнозируемости L_p соответствуют превышению прогнозной дистанции Δ над средним отклонением σ на 3.6–7.4 порядка, причем если для количества событий и условных деформаций максимальная прогнозируемость отмечается на малых гипоцентральных радиусах выборок (1.5–3 км), то для суммарной энергии землетрясений – на средних

Рис. 1. Прогнозируемость сейсмического потока и сильных землетрясений Камчатки в 1962–2014 гг. Круги соответствуют экстремумам прогнозной нелинейности сильных землетрясений ($13.3 \leq K \leq 17.0$). Верхняя половина диаграммы характеризует прогнозы на активизацию сейсмического потока и форшоковую прогнозируемость сильных землетрясений, нижняя – прогнозы на снижение сейсмической активности и афтершоковую прогнозируемость. Нумерация сильных землетрясений в верхней части диаграммы соответствует табл. 4, табл. 6 и рис. 3; в нижней части диаграммы – табл. 5 и табл. 7.

Рис. 2. Прогнозная значимость показателя степени нелинейности α .
См. примечание к рис. 1.

(15–30 км). Средние уровни прогнозируемости соответствуют превышению прогнозной дистанции Δ над средним отклонением σ на 1.1–1.4 порядка. Средневзвешенные значения прогнозных дистанций по времени Δt составляют десятки и сотни дней для активизации сейсмичности и сотни и тысячи дней для ее затухания.

На рис. 1 отображены значения прогнозной нелинейности¹ для всех определений, у которых $|K_{pn}| > 1$, а также отображены экстремумы прогнозной нелинейности, связанные с сильными землетрясениями. Как можно видеть, экстремумы прогнозной нелинейности, свойственные сильным землетрясениям, как правило, соответствуют аналогичным экстремумам сейсмического потока в целом.

Статистические оценки прогнозно значимого показателя степени α демонстрируют (см. табл. 1 и рис. 2), что нелинейность как активизации сейсмического процесса, так и его затухания определяется классом гиперболических функций ($1 < \alpha < 2$). Однако достаточно большой разброс значений показателя α не позволяет ограничиться равнобокой гиперболой ($\alpha = 1.5$) в качестве математической модели для ретропрогнозных оценок.

В табл. 2 приведена общая статистика ретропрогнозов сильных землетрясений Камчатки.

¹Здесь и далее прогнозная нелинейность определяется величиной $|K_{pn}|$, прогнозируемость — величиной L_p .

Форшоковая прогнозируемость фиксируется для 200 из 220 сильных землетрясений региона. Она характеризуется почти 30 тысячами ретропрогнозных определений, для которых сильное землетрясение оказывается в полосе ошибок ($\pm 3\sigma$) экстраполяционной части прогнозной зависимости (рис. 3). По всем проанализированным параметрам форшоковая прогнозируемость сильных землетрясений отсутствует на малых (1.5 и 3 км) радиусах гипоцентральных выборок, начинает проявляться в количестве прогнозируемых землетрясений с последующим быстрым возрастанием на средних (от 7.5 до 30 км) радиусах, а затем более плавно продолжает увеличиваться на больших (60 и 150 км) радиусах. На средних гипоцентральных радиусах отмечаются в среднем более высокие уровни прогнозируемости и прогнозной нелинейности. Средняя прогнозная дистанция по времени в форшоковой прогнозируемости составляет десятки, иногда сотни, дней.

Статистика ретропрогнозов затухания сейсмичности после сильных землетрясений приведена в табл. 3. Афтершоковая прогнозируемость прослеживается для 215 из 220 сильных землетрясений и характеризуется почти 300 тысячами ретропрогнозных определений, что на порядок больше по сравнению с форшоковой прогнозируемостью. Экстремальные уровни прогнозной нелинейности для афтершоковой прогнозируемости на порядок выше, поэтому примеры

Таблица 1. Статистика ретропрогнозных определений по сейсмическому потоку Камчатки в 1962–2014 гг.

Параметр	Радиус, км	Число определений				L_p		Δt , сут*		$\lg(\Delta_f/\sigma_f)^{**}$		$\lg(\Delta_f/\sigma_f)^{**}$		α^*	
		всего	значимых	активизация	затухание	макс.	средний	активизация	затухание	активизация	затухание	активизация	затухание	активизация	затухание
N	1.5	215679	178135	101932	76129	5.3179	1.2397	28.43	34.53	0.4372	1.8032	3.4023	0.6253	1.4039	1.4852
	3	247584	203435	119501	83619	5.3179	1.3333	42.06	123.0	0.3725	1.9984	4.1682	0.5806	1.3768	1.6140
	7.5	384808	294632	187330	106946	3.8386	1.2384	261.5	476.9	0.4142	1.9980	3.6406	0.5787	1.3954	1.8314
	15	533903	416296	258603	157555	3.5886	1.1864	310.7	423.1	0.4491	1.9155	3.5058	0.6331	1.4566	1.8398
	30	611723	492894	291700	201143	3.8119	1.1737	290.2	284.1	0.4726	1.8885	3.4253	0.6819	1.5241	1.8376
	60	629391	520184	293969	226193	3.9749	1.1705	221.0	218.9	0.4995	1.8628	3.1709	0.7299	1.5792	1.7903
D	150	595842	507909	272293	235612	3.7499	1.1441	174.3	167.7	0.4966	1.7761	2.5233	0.7885	1.6190	1.8484
	1.5	210164	173549	95576	77773	5.7423	1.2115	34.67	52.23	0.4471	2.0733	3.2271	0.5599	1.3854	1.5584
	3	237763	196012	107720	87867	5.7382	1.3150	85.05	279.5	0.4045	2.3009	4.0887	0.4848	1.5774	1.5361
	7.5	341402	254644	132949	120847	4.4040	1.2066	229.6	936.6	0.4189	2.5245	3.6125	0.3898	1.5066	1.8194
	15	488398	367824	188205	178728	5.2191	1.1427	173.4	890.0	0.4410	2.5588	3.1650	0.4245	1.5347	1.8312
	30	570691	441682	223321	217545	4.7059	1.1061	99.52	642.6	0.4744	2.6081	2.8512	0.4596	1.5360	1.8498
E	60	586256	461926	233077	228069	4.2721	1.0902	101.2	536.5	0.4999	2.5884	2.6327	0.4778	1.5672	1.8503
	150	612056	488576	238508	249290	3.9849	1.0410	89.43	247.0	0.5390	2.5072	2.0215	0.4973	1.5721	1.8297
	1.5	204323	168077	87777	79961	5.6308	1.1943	37.05	58.86	0.4685	2.3159	3.1489	0.4490	1.3470	1.5774
	3	200011	164409	83473	80414	5.6308	1.2310	122.8	307.0	0.4044	3.0494	3.5086	0.2357	1.3436	1.4635
	7.5	258987	189036	78866	109285	6.2908	1.2974	101.6	1206	0.3468	3.9524	3.6486	-0.0697	1.4796	1.6231
	15	356776	250527	88391	161244	7.0932	1.2977	45.36	1168	0.3460	4.1821	3.3035	-0.1144	1.5089	1.6796
Все	30	423109	293530	89507	203266	7.3730	1.3552	14.37	968.5	0.3876	4.4104	3.0796	-0.0584	1.2820	1.6459
	60	459198	326731	97946	228016	6.7846	1.3612	4.485	743.9	0.4323	4.4941	2.6302	-0.0386	1.2429	1.6772
	150	467780	328207	95343	232235	6.4346	1.4563	10.28	389.9	0.4667	4.7286	2.2794	0.0229	1.3878	1.7213
	Все	8635844	6718215	3365987	3341737	7.3730	1.2071	78.43	539.6	0.4498	3.4837	3.1865	0.2139	1.3697	1.7494

Примечание. * — рассчитывается как средневзвешенное с использованием в качестве веса модуля коэффициента прогнозной нелинейности $|K_{pl}|$; ** — рассчитывается как средневзвешенное с использованием в качестве веса десятичного логарифма отношения прогнозной скорости x'_p к текущей x_c .

Рис. 3. Графики ретропрогнозных определений, соответствующих максимумам нелинейной прогнозируемости некоторых сильных землетрясений.

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 в табл. 4 и табл. 6. Графики слева характеризуют аппроксимационные части прогнозных определений, справа — прогнозные зависимости в целом. Пересечение точечных вертикальных и горизонтальных линий на графиках соответствует “текущим” значениям времени и параметра, левее и ниже этого пересечения — “прошлое”, правее и выше — “будущее”. Пунктирными линиями показано положение асимптот T_a и X_a .

Таблица 2. Статистика ретропрогнозов сильных землетрясений Камчатки в 1962–2014 гг.

Параметр	Радиус, км	Кол-во сильных землетрясений, попадающих в экстраполяции ретропрогнозов (из 220 с $K \geq 13.3$)	Кол-во ретропрогнозных определений, имеющих в экстраполяциях сильные землетрясения	Средняя прогнозная дистанция по времени, сут*	$\lg K_{pn} $		L_p		α^*
					макс.	средн.	макс.	средн.	
N	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	7.5	27	121	305.8	2.327	0.933	2.724	1.616	1.671
	15	91	831	205.6	2.863	1.031	3.138	1.768	1.604
	30	146	2679	80.90	3.572	1.127	3.508	1.863	1.461
	60	175	5083	152.6	4.497	0.898	3.975	1.769	1.437
	150	187	6447	817.4	2.505	0.670	2.777	1.740	1.529
	все	195	15161	202.7	4.497	0.849	3.975	1.772	1.466
D	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	7.5	19	57	13.04	3.975	1.774	4.313	2.300	1.591
	15	74	447	31.92	3.912	1.760	4.273	2.259	1.627
	30	127	1737	24.70	4.171	1.762	4.467	2.239	1.473
	60	163	3220	38.39	4.044	1.330	4.237	1.959	1.532
	150	177	3382	191.8	3.109	0.762	3.162	1.612	1.523
	все	195	8843	38.80	4.171	1.222	4.467	1.898	1.517
E	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	7.5	10	29	10.95	5.002	2.453	5.364	2.935	1.631
	15	50	243	10.64	5.650	2.645	5.958	2.942	1.562
	30	112	1052	14.76	7.219	2.291	6.583	2.575	1.234
	60	150	1942	3.780	7.369	1.637	6.714	2.116	1.222
	150	167	2291	9.325	5.053	1.230	4.521	1.762	1.375
	все	180	5557	10.80	7.369	1.641	6.714	2.097	1.245
Все		200	29561	13.028	7.369	1.109	6.714	1.871	1.253

Примечание. * — рассчитывается как средневзвешенное с использованием в качестве веса модуля коэффициента прогнозной нелинейности $|K_{pn}|$.

графиков ретропрогнозных определений здесь не приводятся². В распределении афтершоковой прогнозируемости по радиусам гипоцентральных выборок присутствуют закономерности, аналогичные описанным для форшоковой прогнозируемости: практическое отсутствие прогнозируемости на малых (1.5 и 3 км) радиусах, быстрое ее возрастание на средних (от 7.5 до 30 км) и более плавное увеличение на больших (60 и 150 км) радиусах, а также в среднем более высокие уровни прогнозируемости и прогнозной нелинейности на средних гипоцентральных радиусах. Средняя прогнозная дистанция по времени в афтершоковой прогнозируемости на порядок выше анало-

гичного параметра форшоковой прогнозируемости и составляет сотни и тысячи дней. Следует также отметить, что средние значения показателя степени α для афтершоковой прогнозируемости по количеству событий N близки к значению, характерному для логарифмического класса зависимостей ($\alpha = 2$), что соответствует хорошо известной формуле Φ . Омори для изменения частоты афтершоковых толчков.

Табл. 4 и табл. 5 содержат сведения по статистике соответственно форшоковой и афтершоковой прогнозируемости некоторых сильных землетрясений Камчатки. Табл. 6 и табл. 7 содержат характеристики ретропрогнозных зависимостей с экстремальной прогнозной нелинейностью соответствующих землетрясений из табл. 4 и табл. 5.

Рис. 4 иллюстрирует пространственное распределение сильных землетрясений Камчатки

² Информативность графиков ретропрогнозных определений снижается с ростом $|K_{pn}|$: линия фактических данных, расчетная кривая сливаются друг с другом и полосой ошибок, а сам график вырождается в сопряжение под прямым углом вертикальной и горизонтальной линий.

Таблица 3. Статистика ретропрогнозов затухания сейсмичности после сильных землетрясений Камчатки в 1962–2014 гг.

Параметр	Радиус, км	Кол-во сильных землетрясений с прогнозируемым затуханием сейсмичности (из 220 с $K \geq 13.3$)	Кол-во ретропрогнозных определений	Средняя прогнозная дистанция по времени, сут*	$\lg K_{pn} $		L_p		α^*
					макс.	средн.	макс.	средн.	
N	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	2	7	1216	1.574	0.850	2.005	1.595	2.052
	7.5	53	249	802.8	2.289	0.669	2.520	1.501	1.827
	15	112	1190	1196	3.130	0.693	3.138	1.600	1.781
	30	155	4010	1811	2.762	0.689	2.829	1.665	1.863
	60	176	8635	525.1	3.009	0.653	2.879	1.726	1.895
	150	195	13818	327.0	2.499	0.537	2.800	1.718	2.038
	все	201	27909	790.7	3.130	0.603	3.138	1.706	1.928
D	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	5	11	653.9	2.160	0.777	2.532	1.517	1.375
	7.5	63	997	1468	4.662	1.264	4.244	1.877	1.694
	15	131	5819	1520	5.731	1.218	5.219	1.862	1.687
	30	163	18149	1490	5.040	1.124	4.706	1.821	1.762
	60	190	29426	1081	4.591	0.989	4.272	1.742	1.793
	150	207	39598	109.9	3.979	0.834	3.985	1.659	1.815
	все	209	94000	1182	5.731	0.967	5.219	1.731	1.753
E	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	4	13	2264	1.989	0.978	2.971	1.725	1.470
	7.5	69	1369	1858	6.775	1.730	6.291	2.305	1.603
	15	135	8559	3666	7.651	1.825	7.093	2.339	1.609
	30	167	28684	2040	8.072	1.808	7.373	2.314	1.647
	60	193	53612	1788	7.361	1.627	6.785	2.157	1.669
	150	213	77658	214.5	6.162	1.567	6.435	2.141	1.591
	все	214	169895	2194	8.072	1.641	7.373	2.187	1.639
Все		215	291804	2188	8.072	1.325	7.373	1.994	1.639

Примечание. * – рассчитывается как средневзвешенное с использованием в качестве веса модуля коэффициента прогнозной нелинейности $|K_{pn}|$.

и их форшоковую и афтершоковую прогнозируемость. Как можно видеть, сильные землетрясения с отсутствующей или низкой прогнозируемостью располагаются, как правило, на периферии (по географии эпицентров и по глубине) зоны регистрации региональной сейсмичности.

Высокая прогнозируемость сейсмического потока (сохранение аппроксимационных тенденций при их экстраполяции в будущее, см. табл. 1) свидетельствует, что уравнение (2) при использовании описанной методики адекватно моделирует динамику сейсмичности по всем рассмотренным потоковым характеристикам. Это делает возможным применение уравнения (2) для дифференцирования потоковых характеристик сейсмичности, т.е. для определения скоростей и ускорений сейсмического потока. В свою очередь анализ пространствен-

ного распределения этих производных позволяет определить локализацию имеющихся тенденций к изменению сейсмичности. Поскольку сильные землетрясения приурочены к экстремумам прогнозируемой нелинейности сейсмического потока (см. рис. 1), то пространственные локализации с экстремальными тенденциями к его изменчивости представляют интерес для прогноза как самих сильных землетрясений, так и афтершокового затухания сейсмичности, т.е. именно в этих локализациях имеют смысл экстраполяции существующих тенденций в будущее. По сути мы получаем комбинацию методов саморазвивающихся процессов и картирования сейсмической активности по плотности сейсмического потока [Тихонов, 2006, 2009].

Потенциальную эффективность изложенной методики отчасти подтверждают ранее полученные данные [Малышев, 2014]: на картах

Рис. 4. Пространственное распределение сейсмичности и прогнозируемость сильных землетрясений Камчатки в 1962–2014 гг.

Точками серого цвета показано положение гипоцентров землетрясений Камчатского регионального каталога. Круги соответствуют гипоцентрам сильных землетрясений; интенсивность заливки верхнего и нижнего полукружий пропорциональна, соответственно, форшоковой и афтершоковой прогнозируемости данного землетрясения (по экстремуму прогнозной нелинейности).

ускорений сейсмической активности, построенных при сканировании с шагом 10 км (гипоцентральный радиус выборки 15 км) зона предстоящего Восточно-Японского землетрясения (11.03.2011 г., $M = 9.0$) начинает отчетливо выделяться за несколько дней до толчка. Зона подготовки имеет размеры примерно $100 \times 80 \times 40$ км, что существенно превышает шаг сканирования. Это также согласуется с результатами данной работы (см. табл. 2), свидетельствующими о том, что прогнозируемость сильных землетрясений

проявляется на средних (от 7.5 до 30 км) и больших (60 и 150 км) радиусах гипоцентральных выборок. Таким образом, предлагаемая методика устанавливает, как минимум, наличие перед Восточно-Японским землетрясением хорошо выраженных предвестников, использование которых позволило бы расширить интервал времени на предотвращение разрушительных последствий землетрясения с 10–30 минут (время достижения волной цунами побережья) до нескольких суток.

Таблица 4. Прогнозируемость некоторых сильных землетрясений Камчатки в 1962–2014 гг.

№ п.п.		Землетрясение				Статистика прогнозируемости								
		Время	K	Гипоцентр			Кол-во определений	Дистанция по времени**, сут		lg K _{pn}		L _p		α*
				широта	долгота	глубина		средн.*	на максимуме K _{pn}	макс.	средн.	макс.	средн.	
1		1963.05.26 23:06:49	14.4	55.140	160.050	0.0	119	27.88	33.00	3.079	1.213	2.891	1.765	1.356
2		1971.12.17 19:06:04	13.4	55.450	163.850	17.0	174	0.719	0.091	3.912	1.867	3.666	2.256	1.479
3		1973.03.12 19:39:19	14.3	50.440	157.720	39.0	118	4.505	3.851	4.570	1.570	4.079	1.956	1.468
4		1974.05.15 18:59:55	14.5	49.800	156.530	40.0	53	21.21	0.728	4.173	1.248	3.747	1.681	1.296
5		1975.04.06 10:34:55	13.7	52.070	160.170	19.0	207	43.97	90.23	3.285	1.225	3.099	1.800	1.606
6		1980.01.23 02:34:10	13.7	52.220	160.360	14.0	105	1.010	0.014	3.798	1.747	4.084	2.325	1.597
7		1982.11.21 23:27:10	13.5	55.420	163.360	40.0	43	13.22	5.942	3.555	0.614	3.204	1.641	1.422
8		1983.07.24 23:07:30	14.4	53.780	158.630	175.0	119	106.7	97.23	3.979	0.465	3.485	1.794	1.485
9		1987.10.04 18:34:23	14.1	55.530	162.080	72.0	191	402.7	3.337	3.358	0.546	3.093	1.494	1.295
10		1989.08.30 11:38:14	13.7	55.480	161.648	72.4	32	1.070	0.118	4.074	1.034	3.602	1.600	1.506
11		1992.03.05 14:39:10	13.9	52.770	159.950	31.0	49	1.806	1.181	3.912	2.131	3.858	2.365	1.433
12		1993.11.13 01:18:06	14.6	51.790	158.830	40.0	288	152.5	162.8	3.299	0.986	3.108	1.644	1.498
13		1996.01.01 09:57:45	14.3	53.880	159.440	0.0	440	0.056	0.017	5.650	3.038	5.958	3.364	1.539
14		1997.12.05 11:26:51	15.5	54.640	162.550	10.0	492	0.363	0.296	5.182	1.797	4.661	2.299	1.383
15		1999.03.08 12:25:42	14.3	51.930	159.720	7.0	407	59.00	147.0	3.818	1.181	3.653	1.723	1.459
16		1999.11.26 15:57:33	13.4	55.060	165.510	36.0	440	1.075	0.470	4.591	1.837	4.853	2.298	1.559
17		2001.10.08 18:20:37	14.1	52.630	160.490	24.0	196	43.55	0.501	3.781	0.784	3.569	1.787	1.491
18		2006.04.29 16:58:03	14.6	60.538	167.764	0.0	15	2.413	2.413	7.369	2.485	6.714	2.979	1.194
19		2007.03.10 21:12:58	14.3	55.105	162.327	40.0	2840	697.5	226.6	3.299	0.492	3.078	1.560	1.443
20		2009.09.11 08:49:08	13.7	47.794	155.006	39.9	223	519.3	9.851	3.223	0.904	2.971	1.665	1.387
21		2010.11.30 17:54:45	13.7	48.585	156.168	30.0	211	685.1	673.0	3.623	0.878	3.211	1.626	1.408
22		2011.08.04 13:51:30	14.3	48.441	155.473	50.9	557	727.2	318.7	3.171	0.815	2.956	1.602	1.384
23		2012.07.20 06:10:21	14.3	49.017	156.559	53.3	644	675.1	0.104	3.093	0.645	3.455	1.543	1.415
24		2013.05.19 18:44:07	13.7	52.013	160.693	50.4	515	0.598	1.076	5.234	2.770	4.970	2.933	1.401
25		2015.02.19 16:32:45	13.8	52.693	159.306	89.9	127	113.9	16.28	3.868	0.716	3.488	1.684	1.449

Примечание. * — рассчитывается как средневзвешенное с использованием в качестве веса модуля коэффициента прогнозной нелинейности $|K_{pn}|$, ** — от момента ретропрогноза до момента сильного землетрясения.

Таблица 5. Прогнозируемость затухания сейсмичности после некоторых сильных землетрясений Камчатки в 1962–2014 гг.

Землетрясение				Статистика прогнозируемости									
№ п.п.	Время	К	Гипоцентр			Кол-во определений	Δ _p , сут		lg K _{пр}		L _p		α*
			широта	долгота	глубина		средн.*	на экстремуме K _{пр}	макс.	средн.	макс.	средн.	
1	1963.05.26 23:06:49	14.4	55.140	160.050	0.0	5075	9262	17009	5.596	1.304	5.373	1.966	1.598
2	1970.02.06 00:11:47	13.3	54.476	163.638	39.9	527	9863	16419	5.872	1.446	5.274	2.014	1.751
3	1971.12.15 08:29:55	15.4	55.970	163.350	20.0	8698	5602	11330	7.189	1.500	6.429	2.100	1.632
4	1980.01.23 02:34:10	13.7	52.220	160.360	14.0	1877	3320	5219	5.272	1.206	4.846	1.898	1.635
5	1982.11.21 23:27:10	13.5	55.420	163.360	40.0	379	1818	2206	5.131	1.169	4.746	1.850	1.776
6	1983.08.17 10:55:55	15.4	55.640	161.530	97.0	8602	1981	33.91	5.450	1.062	4.909	1.799	1.549
7	1984.12.28 10:37:53	14.0	56.180	163.450	19.0	2056	570.2	1265	6.347	1.381	5.822	1.942	1.671
8	1987.10.06 20:11:36	14.1	52.860	160.230	33.0	1791	461.0	469.8	6.775	1.165	6.091	1.801	1.555
9	1992.03.05 14:39:10	13.9	52.770	159.950	31.0	2657	872.3	838.7	6.728	1.306	6.291	1.977	1.646
10	1993.06.08 13:03:37	15.0	51.200	157.800	40.0	2717	1133	2269	5.543	1.304	5.453	1.926	1.677
11	1996.01.01 09:57:45	14.3	53.880	159.440	0.0	9357	3764	7011	6.283	1.684	5.756	2.222	1.659
12	1996.07.16 03:48:25	13.4	56.000	165.050	40.0	519	501.0	272.8	5.160	1.336	4.638	1.994	1.636
13	1997.12.05 11:26:51	15.5	54.640	162.550	10.0	25802	3524	6317	6.704	1.618	6.104	2.263	1.624
14	1999.03.08 12:25:42	14.3	51.930	159.720	7.0	3198	889.1	2122	6.114	1.446	5.644	2.064	1.618
15	1999.11.26 15:57:33	13.4	55.060	165.510	36.0	2084	1235	1956	5.217	1.284	4.562	1.957	1.563
16	2001.10.08 18:20:37	14.1	52.630	160.490	24.0	6864	816.6	524.0	6.252	1.072	5.656	1.813	1.657
17	2003.03.15 19:41:24	14.1	52.149	160.666	4.5	4362	3381	3719	6.512	1.294	6.076	1.951	1.518
18	2003.12.05 21:26:14	14.8	55.780	165.430	29.0	3333	3577	3172	7.651	1.500	7.093	2.073	1.580
19	2004.06.10 15:19:54	14.8	55.678	160.246	208.1	1852	1292	2120	5.714	1.828	5.916	2.395	1.685
20	2006.04.20 23:24:57	15.7	60.981	167.370	0.6	2468	2058	3184	8.072	2.619	7.373	3.070	1.649
21	2007.03.10 21:12:58	14.3	55.105	162.327	40.0	8537	518.9	39.46	5.076	1.315	5.441	1.932	1.554
22	2011.02.20 21:43:22	14.1	55.733	162.469	48.8	8273	929.6	1486	6.279	1.779	5.712	2.333	1.639
23	2012.07.16 03:08:29	13.3	55.670	161.588	80.4	4993	67.13	53.00	6.134	1.265	5.777	2.061	1.600
24	2013.05.24 05:44:47	17.0	54.755	153.785	629.8	45	460.5	362.4	6.162	3.781	6.435	4.006	1.404
25	2014.07.03 12:05:19	13.4	55.196	167.034	41.9	101	178.5	189.4	5.726	1.839	5.264	2.360	1.566

Примечание. * — рассчитывается как средневзвешенное с использованием в качестве веса модуля коэффициента прогнозной нелинейности |K_{пр}|.

Таблица 6. Характеристики зависимостей, соответствующих экстремальным значениям прогнозной нелинейности K_{pn} для некоторых сильных землетрясениями Камчатки (см. табл. 4)

№	Момент ретропрогноза	Аппроксимационная зависимость	n_a	n_e	T_a	X_a ($N_a, D_a,$ E_a)	α	k	L_{reg}	L_p	$\lg K_{pn}$	$\Delta, \text{сут}$	Параметры выборки		
													шир., град.	долг., град.	глуб., км
1	1963.04.23 23:07	$D = D_a + 2.63 \cdot 10^9 \times T_a - t^{2.11} $	24	79	1963.05.28 18:57	$3.89 \cdot 10^5$	1.322	$2.29 \cdot 10^{-3}$	1.180	2.890	3.079	35.13	55.219	160.421	0
2	1971.12.17 16:55	$E = E_a + 1.96 \cdot 10^{11} \times T_a - t^{1.32} $	16	7	1971.12.17 23:47	$1.64 \cdot 10^{11}$	1.431	$2.78 \cdot 10^{-5}$	1.573	3.556	3.912	0.972	55.329	163.866	40
3	1973.03.08 23:13	$E = E_a + 6.69 \cdot 10^{12} \times T_a - t^{1.29} $	20	2	1973.03.11 02:52	$1.99 \cdot 10^{12}$	1.436	$5.23 \cdot 10^{-6}$	1.591	4.079	4.570	3.851	50.389	157.588	40
4	1974.05.15 01:31	$E = E_a + 1.49 \cdot 10^{12} \times T_a - t^{2.70} $	11	2	1974.05.15 21:15	$2.28 \cdot 10^{15}$	1.270	$1.46 \cdot 10^{-3}$	1.099	3.747	4.173	0.728	49.901	157.588	0
5	1975.01.06 05:05	$E = E_a + 8.42 \cdot 10^{14} \times T_a - t^{1.03} $	467	145	1975.05.01 04:47	$6.69 \cdot 10^{13}$	1.492	$9.14 \cdot 10^{-8}$	1.230	2.956	3.285	131.3	52.351	159.967	0
6	1980.01.23 02:13	$E = E_a + 1.33 \cdot 10^{10} \times T_a - t^{0.72} $	12	92	1980.01.23 02:14	$1.83 \cdot 10^{12}$	1.582	$2.67 \cdot 10^{-6}$	1.845	4.084	3.798	1.842	52.275	160.465	10
7	1982.11.16 00:51	$E = E_a + 2.33 \cdot 10^{13} \times T_a - t^{1.85} $	68	21	1982.11.22 12:25	$3.17 \cdot 10^{15}$	1.350	$4.77 \cdot 10^{-5}$	1.091	3.204	3.555	6.024	55.248	164.141	0
8	1983.04.18 17:29	$E = E_a + 1.12 \cdot 10^{15} \times T_a - t^{1.28} $	94	9	1983.07.31 12:59	$9.38 \cdot 10^{12}$	1.438	$5.29 \cdot 10^{-7}$	1.099	3.485	3.979	109.0	53.426	158.824	160
9	1987.10.01 10:28	$E = E_a + 1.46 \cdot 10^{14} \times T_a - t^{2.73} $	58	4	1987.10.05 06:34	$5.99 \cdot 10^{15}$	1.268	$4.51 \cdot 10^{-4}$	1.045	3.093	3.358	3.337	55.248	162.555	100
10	1989.08.30 08:47	$E = E_a + 5.11 \cdot 10^{10} \times T_a - t^{1.01} $	36	2	1989.08.30 09:55	$3.62 \cdot 10^{15}$	1.497	$9.55 \cdot 10^{-6}$	1.489	3.602	4.074	0.118	54.356	161.379	100
11	1992.03.04 10:18	$D = D_a + 3.28 \cdot 10^5 \times T_a - t^{1.40} $	24	24	1992.03.05 06:46	$4.70 \cdot 10^6$	1.416	$1.05 \cdot 10^{-2}$	1.513	3.573	3.912	2.064	52.725	159.819	20
12	1993.06.03 06:23	$E = E_a + 1.94 \cdot 10^{16} \times T_a - t^{1.23} $	276	164	1994.01.14 19:39	$4.79 \cdot 10^{12}$	1.449	$9.84 \cdot 10^{-8}$	1.424	3.032	3.299	263.6	51.737	158.789	40
13	1996.01.01 09:32	$E = E_a + 3.00 \cdot 10^9 \times T_a - t^{0.63} $	25	51	1996.01.01 09:33	$6.61 \cdot 10^{12}$	1.613	$3.38 \cdot 10^{-6}$	2.105	5.958	5.650	0.182	53.802	159.450	10
14	1997.12.05 04:20	$E = E_a + 1.28 \cdot 10^{12} \times T_a - t^{1.67} $	130	35	1997.12.05 09:32	$2.32 \cdot 10^{14}$	1.374	$6.54 \cdot 10^{-5}$	1.809	4.661	5.182	0.362	54.861	163.096	0
15	1998.10.12 11:45	$E = E_a + 2.68 \cdot 10^{16} \times T_a - t^{1.74} $	249	258	1999.02.28 20:01	$2.11 \cdot 10^{13}$	1.365	$2.29 \cdot 10^{-6}$	1.191	3.445	3.818	186.5	52.096	159.805	0
16	1999.11.26 04:40	$E = E_a + 6.42 \cdot 10^9 \times T_a - t^{0.81} $	12	8	1999.11.26 05:05	$2.77 \cdot 10^{11}$	1.551	$7.98 \cdot 10^{-6}$	1.836	4.853	4.591	0.502	55.087	165.556	35
17	2001.10.08 06:18	$E = E_a + 4.58 \cdot 10^{11} \times T_a - t^{1.29} $	26	4	2001.10.08 09:59	$1.68 \cdot 10^{14}$	1.436	$1.67 \cdot 10^{-5}$	1.862	3.569	3.781	0.501	52.455	160.525	20
18	2006.04.27 07:03	$E = E_a + 2.72 \cdot 10^{12} \times T_a - t^{4.08} $	33	5	2006.04.29 10:54	$8.18 \cdot 10^{11}$	1.197	$1.38 \cdot 10^{-2}$	1.504	6.714	7.369	2.484	60.598	168.245	40
19	2006.07.27 06:24	$E = E_a + 1.86 \cdot 10^{22} \times T_a - t^{3.62} $	302	49	2007.09.01 12:27	$5.29 \cdot 10^{13}$	1.217	$5.27 \cdot 10^{-5}$	1.078	3.078	3.299	284.4	55.150	162.362	60
20	2009.09.01 12:23	$E = E_a + 2.22 \cdot 10^{14} \times T_a - t^{1.66} $	106	21	2009.09.13 09:17	$1.50 \cdot 10^{15}$	1.376	$8.96 \cdot 10^{-6}$	1.328	2.971	3.223	10.98	49.010	155.267	0
21	2009.01.26 17:56	$E = E_a + 2.29 \cdot 10^{15} \times T_a - t^{1.16} $	31	29	2011.02.14 13:28	$2.76 \cdot 10^{13}$	1.463	$1.55 \cdot 10^{-7}$	1.290	3.210	3.623	747.0	48.503	156.109	40
22	2010.09.19 21:09	$E = E_a + 4.00 \cdot 10^{18} \times T_a - t^{1.95} $	57	28	2012.06.26 03:44	$1.55 \cdot 10^{12}$	1.340	$1.14 \cdot 10^{-6}$	1.001	2.913	3.171	913.8	48.048	155.785	80
23	2012.07.20 03:40	$E = E_a + 5.01 \cdot 10^{11} \times T_a - t^{0.44} $	41	5	2012.07.20 03:50	$3.34 \cdot 10^{14}$	1.693	$2.00 \cdot 10^{-8}$	1.700	3.455	3.093	0.120	49.124	156.881	40
24	2013.05.18 16:54	$E = E_a + 4.89 \cdot 10^{11} \times T_a - t^{1.01} $	18	117	2013.05.19 16:20	$2.21 \cdot 10^{10}$	1.497	$3.07 \cdot 10^{-6}$	1.880	4.618	5.234	3.533	52.006	160.722	60
25	2015.02.03 09:49	$E = E_a + 2.52 \cdot 10^{14} \times T_a - t^{1.42} $	175	4	2015.03.04 03:20	$3.20 \cdot 10^{10}$	1.413	$2.34 \cdot 10^{-6}$	1.533	3.486	3.868	19.62	52.635	159.268	100

Примечание. n_a и n_e — число событий в аппроксимационной и экстраполяционной (прогнозной) частях последовательности, значения асимптоты X_a и коэффициента k приведены с учетом соответствующих размерностей параметров (N — количество событий, D — Дж0.5, E — Дж); $L_{reg} = \lg |K_{reg}|$.

Таблица 7. Характеристики зависимостей затухания сейсмичности после некоторых сильных землетрясениями Камчатки (см. табл. 5), соответствующие экстремумам прогнозной нелинейности K_{pn}

№	Момент ретропрогноза	Аппроксимационная зависимость	n_a	n_e	T_a	X_a ($N_a, D_a,$ E_a)	α	k	L_{reg}	L_p	$\lg K_{pn} $	Δ , сут	Параметры выборки		
													шир., град.	долг., град.	глуб., км
1	1964.01.16 17:53	$E = E_a - 1.67 \cdot 10^{11} \times T_a - t ^{-0.24}$	45	1615	1963.05.26 23:06	$2.52 \cdot 10^{14}$	1.810	$-3.28 \cdot 10^{-9}$	1.851	5.308	5.596	17009	55.060	160.227	0
2	1970.02.13 16:40	$E = E_a - 4.47 \cdot 10^{11} \times T_a - t ^{-0.58}$	21	39	1970.02.05 23:13	$2.04 \cdot 10^{13}$	1.632	$-9.60 \cdot 10^{-8}$	1.439	5.192	5.872	16419	54.503	163.672	40
3	1971.12.17 07:20	$E = E_a - 4.39 \cdot 10^{11} \times T_a - t ^{-0.66}$	20	51	1971.12.15 08:29	$2.52 \cdot 10^{15}$	1.601	$-2.15 \cdot 10^{-7}$	2.161	6.428	7.189	11330	55.868	163.498	20
4	1980.02.26 11:53	$E = E_a - 4.61 \cdot 10^{11} \times T_a - t ^{-0.41}$	77	26	1980.01.23 02:33	$7.86 \cdot 10^{13}$	1.708	$-1.48 \cdot 10^{-8}$	1.986	4.846	5.272	5219	52.186	160.358	0
5	1982.12.03 19:17	$E = E_a - 3.38 \cdot 10^{11} \times T_a - t ^{-0.23}$	29	45	1982.11.21 23:27	$3.60 \cdot 10^{13}$	1.814	$-1.68 \cdot 10^{-9}$	1.476	4.746	5.131	2206	55.509	163.160	20
6	1983.08.17 17:25	$E = E_a - 1.69 \cdot 10^{10} \times T_a - t ^{-0.93}$	34	108	1983.08.17 10:55	$2.59 \cdot 10^{15}$	1.519	$-9.86 \cdot 10^{-6}$	2.156	4.909	5.450	33.91	55.689	161.809	100
7	1984.12.31 02:37	$E = E_a - 3.21 \cdot 10^9 \times T_a - t ^{-0.41}$	12	14	1984.12.28 10:37	$1.00 \cdot 10^{14}$	1.710	$-4.77 \cdot 10^{-7}$	2.182	5.822	6.347	1265	56.138	163.541	20
8	1987.10.07 08:13	$E = E_a - 2.55 \cdot 10^9 \times T_a - t ^{-0.81}$	18	16	1987.10.06 20:11	$1.32 \cdot 10^{14}$	1.553	$-1.28 \cdot 10^{-5}$	2.367	6.091	6.775	469.8	52.886	160.269	35
9	1992.03.07 07:58	$E = E_a - 1.77 \cdot 10^8 \times T_a - t ^{-0.65}$	18	25	1992.03.05 14:39	$7.96 \cdot 10^{13}$	1.605	$-2.18 \cdot 10^{-5}$	2.787	6.132	6.728	838.7	52.751	159.885	30
10	1993.07.09 23:59	$E = E_a - 8.83 \cdot 10^9 \times T_a - t ^{-0.42}$	29	59	1993.06.08 13:03	$1.01 \cdot 10^{15}$	1.705	$-2.56 \cdot 10^{-7}$	2.353	5.196	5.543	2269	51.198	157.895	60
11	1996.01.12 05:05	$E = E_a - 1.16 \cdot 10^{12} \times T_a - t ^{-0.34}$	227	230	1996.01.01 09:57	$2.04 \cdot 10^{14}$	1.747	$-2.93 \cdot 10^{-9}$	1.898	5.756	6.283	7011	54.072	159.762	0
12	1996.07.17 01:17	$E = E_a - 1.41 \cdot 10^{11} \times T_a - t ^{-0.52}$	17	49	1996.07.16 03:47	$6.41 \cdot 10^{13}$	1.657	$-1.11 \cdot 10^{-7}$	1.531	4.638	5.160	272.8	56.295	165.054	0
13	1997.12.13 00:50	$E = E_a - 3.26 \cdot 10^{12} \times T_a - t ^{-0.52}$	88	533	1997.12.05 11:26	$3.23 \cdot 10^{15}$	1.658	$-1.36 \cdot 10^{-8}$	2.214	6.104	6.704	6317	54.431	162.371	0
14	1999.03.29 20:16	$E = E_a - 8.93 \cdot 10^9 \times T_a - t ^{-0.73}$	24	23	1999.03.08 12:25	$2.17 \cdot 10^{14}$	1.578	$-3.69 \cdot 10^{-6}$	2.739	5.644	6.114	2122	52.006	159.846	0
15	1999.11.28 15:39	$E = E_a - 6.24 \cdot 10^{11} \times T_a - t ^{-0.69}$	16	63	1999.11.26 13:13	$5.30 \cdot 10^{13}$	1.590	$-2.29 \cdot 10^{-7}$	1.118	4.562	5.217	1956	55.150	165.367	30
16	2001.10.09 02:03	$E = E_a - 1.25 \cdot 10^{11} \times T_a - t ^{-0.47}$	84	172	2001.10.08 18:20	$1.29 \cdot 10^{14}$	1.680	$-7.01 \cdot 10^{-8}$	1.714	5.620	6.252	524.0	52.635	160.304	20
17	2003.03.25 21:33	$E = E_a - 1.65 \cdot 10^9 \times T_a - t ^{-0.94}$	64	34	2003.03.15 19:41	$1.31 \cdot 10^{14}$	1.515	$-3.58 \cdot 10^{-5}$	2.702	5.868	6.512	3719	52.186	160.505	0
18	2003.12.17 02:16	$E = E_a - 3.04 \cdot 10^8 \times T_a - t ^{-0.68}$	18	18	2003.12.05 21:26	$6.31 \cdot 10^{14}$	1.597	$-1.83 \cdot 10^{-5}$	3.554	7.093	7.651	3172	55.778	165.613	20
19	2004.07.31 03:18	$E = E_a - 5.69 \cdot 10^{10} \times T_a - t ^{-0.23}$	64	113	2004.06.10 15:19	$1.13 \cdot 10^{15}$	1.814	$-7.22 \cdot 10^{-9}$	2.107	5.497	5.714	2120	55.509	160.300	200
20	2006.04.21 09:27	$E = E_a - 1.12 \cdot 10^{12} \times T_a - t ^{-0.40}$	46	212	2006.04.20 23:24	$5.04 \cdot 10^{15}$	1.717	$-6.25 \cdot 10^{-9}$	2.115	7.373	8.072	3184	60.898	167.420	0
21	2007.03.11 00:36	$E = E_a - 3.02 \cdot 10^4 \times T_a - t ^{-2.31}$	15	26	2007.03.10 21:12	$2.75 \cdot 10^{14}$	1.302	$-1.13 \cdot 10^{-1}$	1.930	5.441	5.076	39.46	55.150	162.047	40
22	2011.02.21 15:36	$E = E_a - 8.39 \cdot 10^{10} \times T_a - t ^{-0.23}$	26	114	2011.02.20 21:43	$1.26 \cdot 10^{14}$	1.813	$-5.35 \cdot 10^{-9}$	1.611	5.712	6.279	1486	55.761	162.431	50
23	2012.07.17 09:32	$E = E_a - 1.65 \cdot 10^6 \times T_a - t ^{-0.90}$	38	1403	2012.07.16 03:08	$3.40 \cdot 10^{15}$	1.528	$-1.05 \cdot 10^{-3}$	2.900	5.729	6.134	53.00	56.139	160.541	0
24	2013.05.24 14:33	$E = E_a - 1.29 \cdot 10^{10} \times T_a - t ^{-1.11}$	30	27	2013.05.24 05:44	$1.06 \cdot 10^{17}$	1.474	$-3.24 \cdot 10^{-5}$	2.529	6.405	6.162	362.4	54.356	153.621	700
25	2014.07.05 11:54	$E = E_a - 3.77 \cdot 10^9 \times T_a - t ^{-0.72}$	40	2	2014.07.03 12:05	$1.70 \cdot 10^{14}$	1.581	$-5.68 \cdot 10^{-6}$	2.467	5.264	5.726	189.4	55.219	167.368	0

Примечание. См. табл. 6.

Тем не менее, для перехода от анализа прогнозируемости сейсмического потока к прогнозу собственно сильных землетрясений необходимо предварительно решить две проблемы: 1) отработать и верифицировать алгоритм автоматического выделения зон максимальной изменчивости сейсмического потока, что позволило бы уже сейчас перейти к оперативному сейсмическому мониторингу с отслеживанием гипоцентральных зон с максимальными тенденциями к активизации/затуханию сейсмического потока; 2) попытаться установить статистическую связь пространственных производных сейсмического потока с максимальной энергией землетрясений в их прогнозных зависимостях. Последнее позволяет определить допустимый предел возможных экстраполяций. Наиболее перспективны экстраполяции в будущее тенденций к увеличению выделяющейся сейсмической энергии E , позволяющие рассчитать в какой именно промежуток времени выделение сейсмической энергии может достичь потенциально опасных значений. Предельный диапазон выделения сейсмической энергии в определенный период времени можно оценить по вертикальной составляющей полосы ошибок на экстраполяционной части прогнозной зависимости. Аналогичная экстраполяция суммарного количества землетрясений (параметр N) позволяет рассчитать на этот же период времени ожидающееся число сейсмических толчков. Соотношение этих величин дает расчетное значение вероятной энергии одиночного сейсмического события. Параметр D (накопленные условные деформации), хотя и демонстрирует хорошую прогнозируемость, но в экстраполяционных расчетах представляется избыточным и для повышения оперативности вычислений им можно пренебречь.

Мониторинг на основе метода саморазвивающихся процессов с предварительным картированием нелинейности сейсмического потока для Камчатского региона имеет смысл на средних и больших радиусах гипоцентральных выборок. При этом с повышением радиуса выборок увеличивается число сильных землетрясений, имеющих прогнозируемость по сейсмическому потоку, тогда как уменьшение радиуса приводит к возрастанию точности пространственного определения экстремумов нелинейности сейсмического потока, к которым приурочены сильные землетрясения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированные для Камчатского региона потоковые параметры сейсмичности показывают хорошую прогнозируемость. Следовательно, уравнение (2) при использова-

нии описанной методики адекватно моделирует динамику сейсмичности и его можно использовать для картирования экстремальной нелинейности сейсмического потока. Комбинация метода саморазвивающихся процессов с предварительным картированием позволяет перейти к прогнозу сейсмичности в зонах экстремальной нелинейности. Полученные результаты демонстрируют очень хорошие перспективы аппроксимационно-экстраполяционного подхода для прогноза как самих сильных землетрясений, так и последующего афтершокового затухания сейсмической активности. При этом суммарная энергия землетрясений E представляет собой характеристику сейсмического потока, которую возможно непосредственно использовать для прогноза энергии землетрясений. Анализ количества событий N имеет вспомогательное значение, а параметр D (накопленные условные деформации) для прогнозного мониторинга представляется избыточным.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы АААА-А18-118052890018-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мальшев А.И.* Динамика саморазвивающихся процессов // Вулканология и сейсмология. 1991. № 4. С. 61–72.
- Мальшев А.И.* Гиперболические закономерности сейсмической подготовки извержения вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. // Вулканология и сейсмология. 2000. № 3. С. 70–78.
- Мальшев А.И.* Закономерности нелинейного развития сейсмического процесса. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. 111 с.
- Мальшев А.И.* Первые результаты 3D-мониторинга сейсмической активности и его перспективы // Ежегодник-2013. Тр. Института геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого. Вып. 161. 2014. С. 390–395.
- Мальшев А.И.* Оценка прогнозируемости сейсмического потока на примере извержения вулкана Шивелуч 1964 г. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 6. С. 22–36.
- Тихонов И.Н.* Методы и результаты анализа каталогов землетрясений для целей средне- и краткосрочного прогнозов сильных сейсмических событий. Владивосток, Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 214 с.
- Тихонов И.Н.* Методология прогноза сильных землетрясений по потоку сейсмичности на примере северо-западной части Тихоокеанского пояса / Автореф. дисс. ... доктора физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009. 192 с.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.

Чеброва А.Ю., Матвеев Е.А. Состояние окончательного каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов в 2013 году // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2013. С. 122–126.

Bell A.F., Kilburn C.R.J., Main I.G. Volcanic Eruptions, Real-Time Forecasting of // Encyclopedia of Earthquake Engineering. Springer, 2016. P. 3892–3906.

Bell A.F., Naylor M., Heap M.J., Main I.G. Forecasting volcanic eruptions and other material failure phenomena:

An evaluation of the failure forecast method // Geoph. Res. Letters. 2011. V. 38. Iss. 15. L15304. DOI: 10.1029/2011GL048155

Bell A.F., Naylor M., Main I.G. The limits of predictability of volcanic eruptions from accelerating rates of earthquakes // Geophys J Int. Geophys. J. Int. 2013 V. 194. P. 1541–1553. DOI: 10.1093/gji/ggt191

Encyclopedia of Earthquake Engineering. Springer, 2016. 3965 p.

Voight B. A method for prediction of volcanic eruptions // Nature. 1988. V. 332. P. 125–130.

THE PREDICTABILITY OF SEISMICITY AND LARGE EARTHQUAKES: KAMCHATKA 1962 TO 2014

A. I. Malyshev

*Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Akademika Vonsovskogo, 15, Yekaterinburg, 620016 Russia*

e-mail: malyshev@igg.uran.ru

Received January 09, 2017

This paper reports the estimation of the predictability of seismicity and large earthquakes in Kamchatka as inferred from data in the Kamchatka regional catalog for 1962–2014. The mathematical model uses a second-order nonlinear differential equation, while the optimization algorithm and the estimates of predictability are the author's own. The estimates show a high predictability of seismicity; the extrema of prediction nonlinearity typical of large earthquakes usually occur simultaneously with similar extrema of seismicity as a whole. Overall, 220 large ($K \geq 13.3$) Kamchatka earthquakes were analyzed to find that foreshock predictability was available for 200 earthquakes (~30000 determinations) and aftershock predictability for 215 earthquakes (~300000 determinations). The predictability related to large earthquakes began to be seen and was rapidly increasing at intermediate (7.5–30 km) radii of hypocenter samples. The prediction distances over time were some tens and hundreds of days for foreshock predictability and some hundreds and thousands of days for aftershock predictability. These results demonstrate very good promise for the approximation extrapolation approach to the prediction of both large earthquakes themselves and of subsequent aftershock decay of seismic activity.

Key words: Kamchatka, earthquake, dynamics, prediction.