

УДК 550.34

Новая прогностическая технология анализа вариаций низкочастотного сейсмического шума (на примере районов Дальнего Востока России)

© 2021 г. Г.Н. Копылова¹, А.А. Любушин², Л.Н. Таранова¹

¹КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия;
²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 24.12.2020 г.

Аннотация. Рассматривается новая технология прогнозирования сильных землетрясений магнитудного диапазона M_w порядка 7 и более, основанная на использовании непрерывных записей сейсмического шума на сети из 21 широкополосной станции ФИЦ ЕГС РАН в районе полуострова Камчатка, Командорских о-вов и о-ва Парамушир. Приводится описание сеймопрогностического алгоритма, созданного А.А. Любушиным (ИФЗ РАН), и состояние его внедрения в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН с целью заблаговременной (месяцы – первые годы) оценки мест возникновения сильных землетрясений. Алгоритм обработки данных включает в себя расчёт временных рядов информативных статистик шума для каждой станции и построение карт их пространственно-временного распределения для различных интервалов времени. В основу сеймопрогностического алгоритма также положены установленные авторами характерные особенности поведения статистик сейсмического шума на стадиях подготовки местных землетрясений 2013–2016 гг. с $M_w=6.9–8.3$, соответствующие аналогичным изменениям перед землетрясениями в Японии с $M_w=8.3$ и 9.0. С 2020 г. осуществляется обработка текущих данных с сети широкополосных станций ФИЦ ЕГС РАН в Дальневосточном регионе в соответствии с сеймопрогностическим алгоритмом для составления ежеквартальных прогнозных заключений, которые направляются в Российский экспертный совет по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (РЭС) и в его Камчатский филиал (КФ РЭС).

Ключевые слова: сейсмический шум, сеймопрогностический алгоритм, прогноз землетрясений, полуостров Камчатка.

Для цитирования: Копылова Г.Н., Любушин А.А., Таранова Л.Н. Новая прогностическая технология анализа вариаций низкочастотного сейсмического шума (на примере районов Дальнего Востока России) // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 1. – С. 75–91. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.05>

Введение

Проблема прогноза землетрясений, сопровождающихся опасными последствиями для населения, инфраструктуры и природной среды урбанизированных территорий, является одной из актуальных в науках о Земле. Для её практического решения необходимо создавать технологии сейсмического прогнозирования с использованием данных геофизических, геохимических, деформационных и других видов наблюдений, в т.ч. данных сейсмического мониторинга ФИЦ ЕГС РАН. Важнейшей задачей ФИЦ ЕГС РАН является повышение информативности получаемых сейсмологических дан-

ных, внедрение новых технологий мониторинга сейсмической опасности и прогноза землетрясений в сейсмоактивных районах России. Основными компонентами таких технологий являются [Любушин и др., 2015; Акоюн и др., 2017]:

- наличие системы сбора и оперативной обработки данных о вариациях геофизических полей;
- наличие признаков (предвестников) подготовки землетрясений, проявляющихся в изменениях наблюдаемых параметров, и выявление их сеймопрогностических свойств;
- разработка алгоритмов обработки сейсмологических и других видов данных для оперативного обнаружения признаков подготовки землетрясений;

– создание информационного и программного обеспечения для эффективного функционирования технологии оценки сейсмической опасности и прогнозирования землетрясений.

В 2011–2014 гг. в Дальневосточном районе России была создана автоматизированная система сбора, обработки, хранения и представления данных сейсмологических наблюдений на основе сети цифровых широкополосных сейсмических станций, корпоративной сети, регионального «Петропавловск» и локальных информационно-обрабатывающих центров. Обеспечивалось поступление в режиме, близком к реальному времени, данных со всех сейсмостанций по спутниковым каналам связи и выделенным линиям, Ethernet [Чебров, 2015; Чеброва и др., 2020]. Техническое развитие системы сейсмологических наблюдений в Дальневосточном регионе России обеспечило необходимые условия для изучения вариаций сейсмического шума на сети широкополосных станций и оценки сейсмопрогностического потенциала таких данных.

Сейсмический шум (синонимы – низкочастотный сейсмический шум, фоновый сейсмический шум (ФСШ)) рассматривается как проявление внутренней жизни планеты и как важный «канал связи», позволяющий исследовать процессы в литосфере, в том числе предваряющие сильные землетрясения. Движения циклонов в атмосфере, воздействие волн на шельф и побережье, а также изменения климата вносят основной вклад в энергию низкочастотного сейсмического шума. Если рассматривать земную кору как среду распространения сейсмических волн от внешних для неё источников (океана и атмосферы), то процессы внутри земной коры могут отражаться в изменениях статистических свойств сейсмического шума. Поэтому изучение этих свойств даёт возможность определять изменения, сопровождающие сейсмический процесс, в т. ч. связанные с подготовкой сильных землетрясений. Выявленные особенности поля сейсмического шума по пространственно-временным вариациям статистик шума на стадиях подготовки землетрясений могут найти применение в практике их прогнозирования.

В настоящей работе в качестве показателей подготовки землетрясений рассматриваются нелинейные статистики временных рядов сейсмического шума, которые оцениваются в скользящем временном окне 1 сутки по данным непрерывной регистрации сейсмических сигналов на сети широкополосных сейсмических станций. В работе использовались четыре статистики шума, включающие минимальную энтропию

распределения квадратов ортогональных вейвлет-коэффициентов, и три характеристики мульти-фрактального спектра сингулярности: обобщённая экспонента Херста, ширина носителя и вейвлетная спектральная экспонента. Полный цикл работ по исследованию прогностических свойств статистических параметров низкочастотного сейсмического шума, а также их связей с неравномерностью вращения Земли представлен в серии публикаций А.А. Любушина [Любушин, 2008–2018; Lyubushin, 2010–2020].

В работах [Любушин и др., 2015; Касимова и др., 2018] приведены результаты изучения вариаций поля низкочастотного сейсмического шума в районе полуострова Камчатка, Командорских о-вов и о-ва Парамушир. В них представлены данные о расположении сети станций, её геометрии и регистрирующей аппаратуре; приведены фрагменты волновых форм шума и их спектральные характеристики. В этих работах дано детальное описание вычислений четырёх статистик сейсмического шума, которые используются для анализа многолетних (2011 г. – сентябрь 2020 г.) и текущих записей сейсмического сигнала на сети из 21 станции ФИЦ ЕГС РАН. В них также даны описания особенностей изменения сейсмического шума на стадиях подготовки землетрясений 2013–2016 гг. с $M_w=6.9–8.3$.

Примеры описания статистик низкочастотного сейсмического шума

Для анализа использовались записи на сейсмических станциях (рис. 1), оборудованных широкополосными датчиками, регистрирующими данные типа LHZ или VHZ в диапазоне частот 0.0027–40 Гц. Данные о сейсмометрической аппаратуре, установленной на станциях, ранее приводились в [Касимова и др., 2018, таблица 1]. Непрерывные записи сейсмических сигналов на каждой станции с частотой дискретизации 100 или 20 Гц характеризуют вертикальные колебания поверхности Земли. Они приводились к шагу по времени 1 мин путём вычисления средних значений в последовательных окнах длиной 6000 или 1200 отсчётов. Далее по 1-минутным временным рядам шума на каждой станции вычислялись четыре статистики в последовательных интервалах времени длиной 1 сутки или 1440 минутных отсчётов с шагом по времени 1 сутки.

Рассмотрим алгоритмы расчёта используемых статистик шума, которые существенно различаются по способам их определения.

Минимальная нормализованная энтропия вейвлет-коэффициентов En . Пусть $x(t)$ – конечная выборка некоторого случайного сигнала, $t=1, \dots, N$ – индекс, нумерующий последовательные отсчёты (дискретное время). Пусть $c_j^{(k)}$ – вейвлет-коэффициенты анализируемого сигнала. Верхний индекс k является номером уровня детальности ортогонального вейвлет-разложения, нижний индекс j нумерует последовательность центров временных интервалов, в окрестности которых вычисляется свёртка сигнала с финитными элементами базиса. Использовались 17 ортогональных вейвлетов Добеши: десять обычных базисов с минимальным носителем с числом обнуляемых моментов от 1 до 10 и семь симлетов Добеши [Любушин, 2010; Lyubushin, 2012, 2018] с числом обнуляемых моментов от 4 до 10. Для каждого из базисов вычислялась нормализованная энтропия распределения квадратов коэффициентов и находился базис, обеспечивающий минимум энтропии:

$$En = - \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^{M_k} p_j^{(k)} / \ln N_r \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$p_j^{(k)} = |c_j^{(k)}|^2 / \sum_{i=1}^{M_k} |c_i^{(k)}|^2,$$

где m – число уровней детальности, принятых к рассмотрению; M_k – число вейвлет-коэффициентов на уровне детальности с номером k . Число уровней m зависит от длины N анализируемой выборки. Например, если $N=2^n$, то $m=n$, $M_k=2^{(n-k)}$. Условие $N=2^n$ необходимо для применения быстрого вейвлет-преобразования. Если длина N не равна степени двойки, то сигнал $x(t)$ дополняется нулями до минимальной длины L , которая больше или равна N : $L=2^n \geq N$. В этом случае среди числа $2^{(n-k)}$ всех вейвлет-коэффициентов на уровне k лишь $N \cdot 2^{-k}$ коэффициентов соответствуют разложению реального сигнала, тогда как остальные коэффициенты равны нулю из-за дополнения нулями сигнала $x(t)$. Таким образом, в формуле (1) $M^k = N \cdot 2^{-k}$ и для вычисления энтропии используются только «реальные» коэффициенты $c_j^{(k)}$. Число N_r в формуле (1) равно числу «реальных» коэффициентов, то есть $N_r = \sum_{k=1}^m M_k$. По построению $0 \leq En \leq 1$.

В силу ортогональности вейвлет-преобразования сумма квадратов коэффициентов равна сумме квадратов (энергии) сигнала $x(t)$. Таким образом, величина (1) представляет энтропию распределения энергии колебаний на различных частотных и временных масштабах. Перед вычислением нормализованной энтропии (1)

производилась операция устранения тренда полиномом 8-го порядка, чтобы избавиться от присутствующих в сигнале детерминированных трендов, вызванных влиянием приливных и термических деформаций земной коры, и перейти к исследованию характеристик шума. Статистика En использовалась ранее при исследовании прогностических свойств сейсмического шума на Японских островах, на Камчатке и в Калифорнии.

Мульти-фрактальные параметры $\Delta\alpha$, α^* . Рассмотрим некоторое случайное колебание $x(t)$ на интервале времени $[t-\delta/2, t+\delta/2]$ длиной δ с центром во временной точке t . Рассмотрим размах $\mu(t, \delta)$ случайного колебания на этом интервале, то есть разницу между максимальным и минимальным значениями:

$$\mu(t, \delta) = \max_{t-\delta/2 \leq s \leq t+\delta/2} x(s) + \min_{t-\delta/2 \leq s \leq t+\delta/2} x(s). \quad (2)$$

Если устремить $\delta \rightarrow 0$, то $\mu(t, \delta)$ будет также стремиться к нулю, но с различной скоростью такого убывания. Если скорость определяется законом $\delta^{h(t)}$: $\mu(t, \delta) \sim \delta^{h(t)}$ и существует предел

$h(t) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg \mu(t, \delta)}{\lg \delta}$ называется экспонентой

Гельдера-Липшица. Если величина $h(t)$ не зависит от момента времени t : $h(t) = \text{const} = H$, то случайное колебание $x(t)$ называется моно-фрактальным, а величина H – экспонентой Херста. Если же экспоненты Гельдера-Липшица $h(t)$ различаются для разных моментов времени t , то случайное колебание называется мульти-фракталом, и для него можно определить понятие спектра сингулярности $F(\alpha)$. Для этого выделим множество $C(\alpha)$ таких моментов времени t , которые имеют одно и то же значение α экспоненты Гельдера-Липшица: $h(t) = \alpha$. Множества $C(\alpha)$ не являются пустыми не для всех значений α , то есть существуют некоторые минимальное α_{\min} и максимальное α_{\max} , такие, что лишь для $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$ множества $C(\alpha)$ содержат некоторые элементы. Мульти-фрактальный спектр сингулярности $F(\alpha)$ представляет фрактальную размерность множества точек $C(\alpha)$. Параметр $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$, называемый шириной носителя спектра сингулярности, является важной мульти-фрактальной характеристикой рассматриваемого сигнала. Кроме того, значительный интерес представляет аргумент α^* , соответствующий максимуму спектра сингулярности: $F(\alpha^*) = \max_{\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}} F(\alpha)$,

который называется обобщённым показателем Херста. Максимум спектра сингулярности не может превосходить 1, т. к. размерности

вмещающего множества (оси времени), $0 < F(\alpha^*) \leq 1$, обычно $F(\alpha^*) = 1$. Для моно-фрактального сигнала $\Delta\alpha = 0$, $\alpha^* = H$.

Ниже для оценки мульти-фрактальных характеристик сигналов использовался метод, основанный на анализе флуктуаций после устранения масштабно-зависимых трендов.

Построение и примеры анализа карт свойств сейсмического шума и временных рядов «обобщённых параметров ФСШ» (сейсмопрогностический алгоритм)

На рис. 1 представлено расположение сети из 21 широкополосной сейсмической станции ФИЦ ЕГС РАН, данные которых анализировались в течение времени с января 2011 г. по 30 сентября 2020 г. (всего 9 лет 9 мес.). С 2011 по 2013 г. число функционирующих станций на рассматриваемой территории возрастало с девяти до 21 [Касимова и др., 2018]. С 2014 г. структура сети станций практически не изменялась. Данные о линейных размерах наблюдательной сети приводились в [Любушин и др., 2015]: максимальные расстояния между станциями составляют 1450 км в направлении С–Ю и 560 км в направлении З–В при среднем расстоянии между двумя соседними станциями 120 км (медиана 110 км). При таких размерах сети предполагалась её чувствительность к процессам подготовки землетрясений с размерами очагов порядка 100–800 км, т.е. для сейсмических событий с величинами магнитуд ≈ 7.5 –9.0. Именно для таких землетрясений конфигурация действующей сети станции может перекрывать области подготовки частично или полностью.

Землетрясения магнитудного диапазона 7.5–9.0 включают события с $M_w \geq 7.7$, относящиеся к классу сильнейших землетрясений района тихоокеанского побережья Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии. С.А. Федотовым было установлено, что для областей очагов таких землетрясений характерны тенденция не перекрывать друг друга и последовательная смена афтершоковой, фоновой и форшоковой фаз в развитии сейсмичности. На основе выявленных закономерностей развития сейсмичности в северо-западной части Тихоокеанского сейсмического пояса в конце XIX–XX вв. была создана методика долгосрочного сейсмического прогноза сильнейших землетрясений с указанием потенциальных мест следующих таких событий [Федотов, 2005; Фирстов и др., 2016]. Ниже термин «сильнейшие землетрясения» применяется в отношении землетрясений с $M_w \geq 7.7$, которые являются

наиболее опасными для района Камчатского края и представляют главный объект прогнозирования в рамках рассматриваемой сейсмопрогностической технологии.

С использованием суточных временных рядов статистик фонового сейсмического шума En , α^* , $\Delta\alpha$ и β (вейвлетная спектральная экспонента, см. [Касимова и др., 2018]), рассчитанных для каждой станции, создавались графические материалы, характеризующие особенности пространственно-временного распределения статистик, в том числе:

- карты распределения величин статистик по площади совместно с картами их экстремальных значений за различные интервалы времени (рис. 2–5);

- построение графиков четырёх «обобщённых параметров ФСШ» (рис. 6).

С использованием набора таких карт и графиков выполнялся анализ особенностей изменчивости поля ФСШ во времени и в связи с произошедшими землетрясениями в сравнении с «фоновыми» картами, полученными за весь период наблюдений.

Для построения карт область в диапазоне широт от 50 до 64°N и долгот от 155 до 168°E (рис. 1) разбивалась равномерной сеткой из 50×50 узлов. Карты распределения четырёх свойств сейсмического шума получались как совокупность медиан параметров на трёх станциях, ближайших в каждом узле сетки, покрывающей рассматриваемую область.

Если усреднить ежесуточные карты по всем суткам внутри заданного интервала времени, то получаются усреднённые карты, характеризующие особенности изменения отдельных статистических параметров по пространству за соответствующий интервал времени. Анализ совокупности карт распределения каждой из четырёх рассматриваемых статистик для одного и того же интервала времени и их изменчивости во времени позволяет проследить главные особенности поля низкочастотного сейсмического шума для рассматриваемой территории [Любушин и др., 2015; Касимова и др., 2018].

Построение карт демонстрируется на примере пространственно-временного распределения энтропии En за весь период наблюдений («фоновая карта») (рис. 2). Карты мульти-фрактальных параметров $\Delta\alpha$ (рис. 3), α^* , β строятся аналогичным образом.

Имея ежесуточные оценки значений En для каждой из сейсмических станций, расположенных на некоторой территории, можно создавать карты пространственного распределения этой

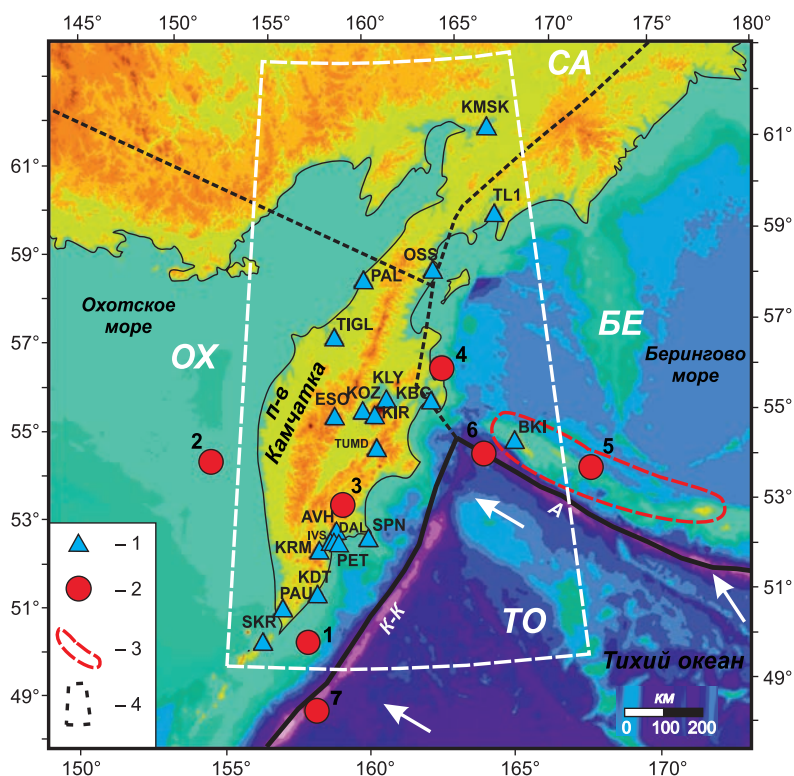


Рис. 1. Карта района с расположением сейсмических станций и эпицентров землетрясений (табл.) с элементами тектоники, орографии и батиметрии.

1 – сейсмические станции с указанием их кодов, 2 – эпицентры землетрясений с $M_w \geq 6.6$ (номера соответствуют номерам в табл.), 3 – область очага Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. [Чебров и др., 2019], 4 – область построения карт статистик сейсмического шума. Наименование и границы тектонических плит даны по [Зоненшайн, Савостин, 1979; Ландер и др., 1994; De Mets et al., 1990; Kozhurin, 2007; Гордеев и др., 2015]: ТО – Тихоокеанская океаническая плита, СА – Северо-Американская континентальная плита; малые литосферные плиты БЕ – Берингия, ОХ – Охотская. К-К – Курило-Камчатский глубоководный жёлоб, А – Алеутский глубоководный жёлоб. Стрелками указано направление движения Тихоокеанской океанической плиты [Argus, Gordon, 1991]

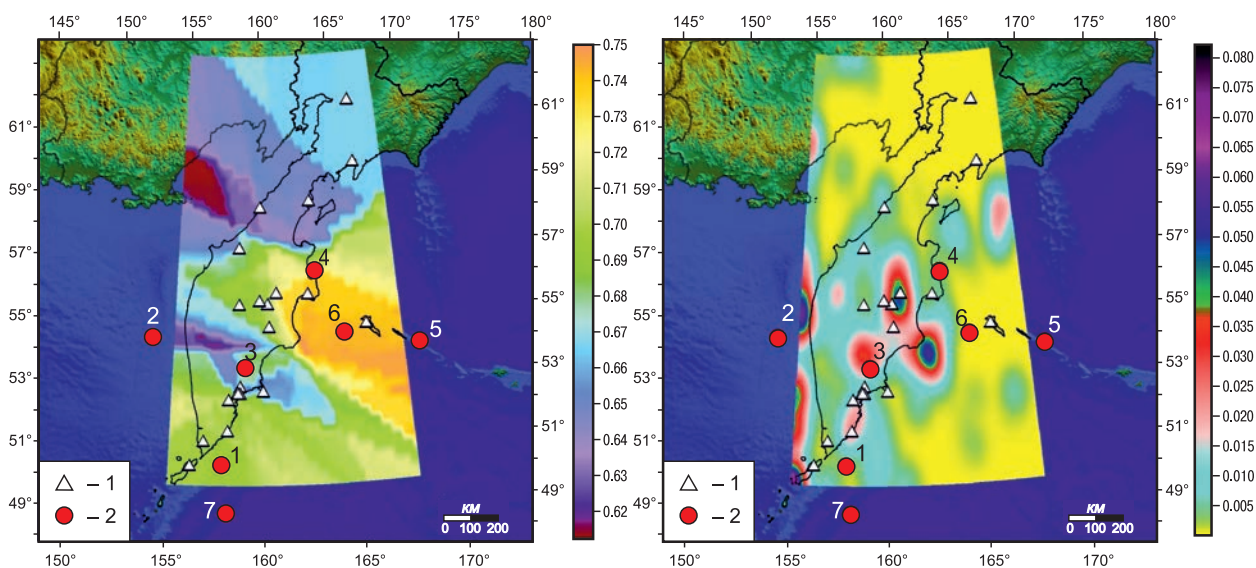


Рис. 2. Усреднённые «фоновые» карты энтропии сейсмического шума E_n (а) и плотности вероятности распределения точек её максимумов (б), 2011 г. – сентябрь 2020 г. в сопоставлении с произошедшими землетрясениями (табл.).

1 – сейсмостанции, 2 – эпицентры землетрясений

Таблица. Землетрясения 2011–2020 гг. с $M_w \geq 6.6$ (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes>)

№	Дата, <i>дд.мм.гггг</i> (название землетрясения)	Время, <i>чч:мм:сс</i>	Координаты		Глубина, <i>км</i>	Магнитуда M_w
			φ , °N	λ , °E		
1	28.02.2013 (Южно-Камчатское)	14:05:50	50.95	157.28	41	6.9
2	24.05.2013 (Охотоморское)	05:44:48	54.89	153.22	598	8.3
3	30.01.2016 (Жупановское)	03:25:12	53.98	158.55	177	7.2
4	29.03.2017 (Южно-Озерновское)	04:09:24	56.94	162.79	17	6.6
5	17.07.2017 (Ближне-Алеутское)	23:34:13	54.44	168.86	10	7.7
6	20.12.2018 (Углового поднятия)	17:01:55	55.10	164.70	17	7.3
7	25.03.2020 (Северо-Курильское)	02:49:21	48.96	158.70	58	7.5

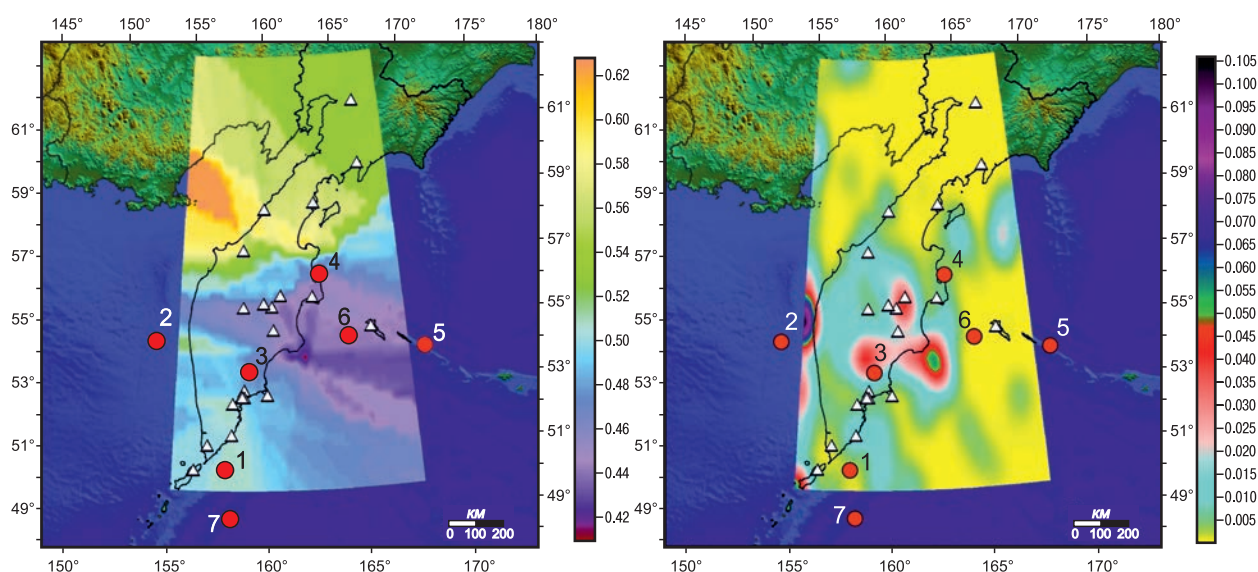


Рис. 3. Усреднённые «фоновые» карты ширины носителя спектра сингулярности сейсмического шума $\Delta\alpha$ (а) и плотности вероятности распределения точек её минимумов (б), 2011 г. – сентябрь 2020 г. в сопоставлении с произошедшими землетрясениями (табл.)

(или любой другой) статистики сейсмического шума. Для этого рассмотрим регулярную сетку, покрывающую область, которая вмещает в себя исследуемый регион. Для каждого узла сетки находятся соответствующие суточные значения статистики, которые вычисляются как медианы для значений заданного числа ближайших к узлу работающих сейсмических станций. Для рассматриваемого района (рис. 1) использовались три ближайшие станции. Эта простая процедура обеспечивает создание последовательности ежесуточных карт. Усреднённые карты создаются путём усреднения суточных карт для всех суток между двумя заданными датами. Метод ближайших соседей обеспечивает достаточно естественную экстраполяцию имеющихся зна-

чений статистики в области, не имеющей точек наблюдений.

Обозначим через $En_{ij}^{(t)}$ энтропию, соответствующую узлу сетки (i, j) и суточному интервалу времени с номером t . Каждый вектор сетки $En_{ij}^{(t)}$ можно рассматривать как «элементарную» суточную карту. Мы можем рассматривать усреднённую карту:

$$\bar{En}_{ij}(t_0, t_1) = \sum_{t=t_0}^{t_1} En_{ij}^{(t)} / (t_1 - t_0 + 1), \quad (3)$$

что соответствует некоторым интервалам временного индекса t от минимального t_0 до максимального t_1 .

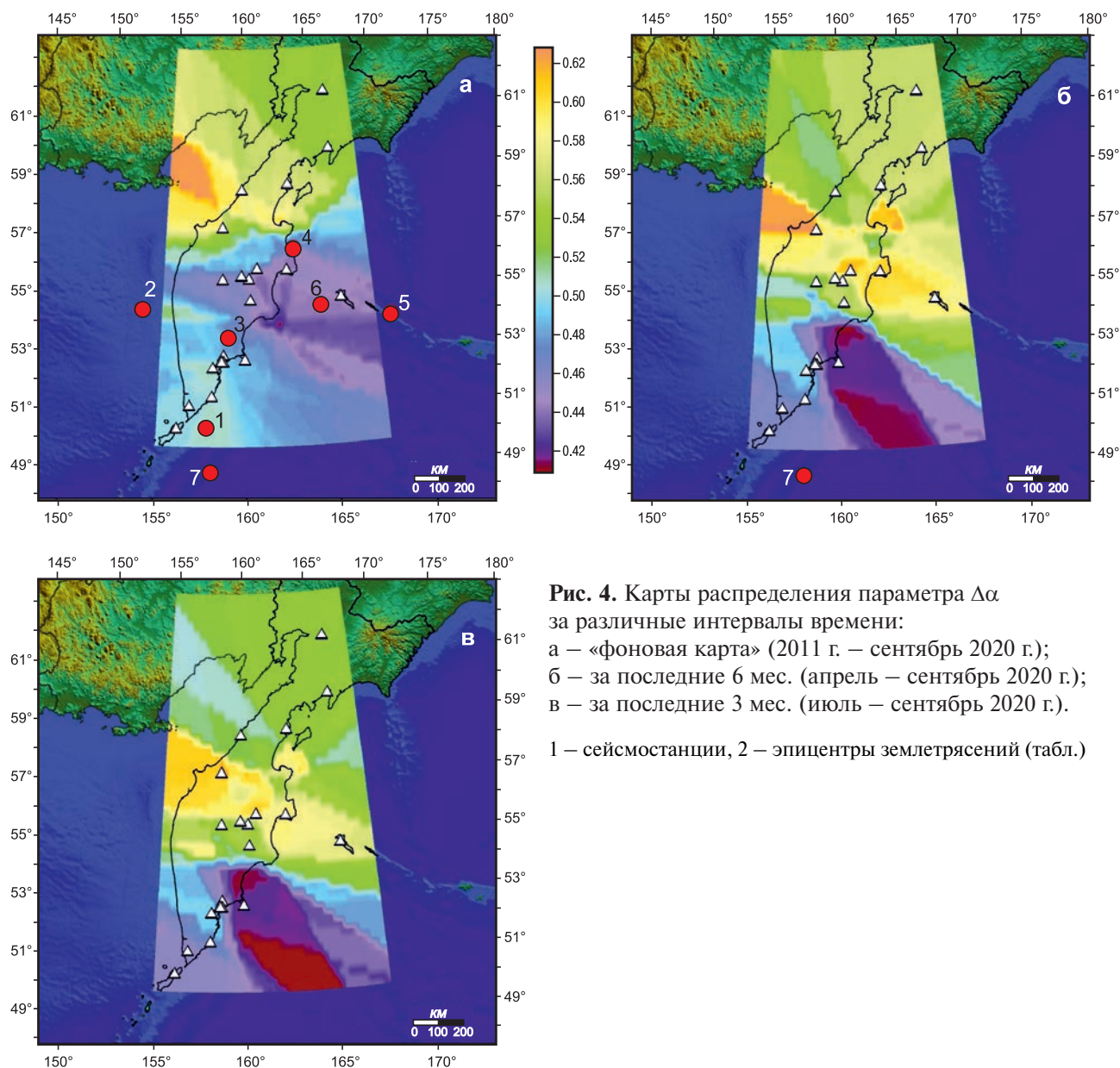


Рис. 4. Карты распределения параметра $\Delta\alpha$ за различные интервалы времени: а – «фоновая карта» (2011 г. – сентябрь 2020 г.); б – за последние 6 мес. (апрель – сентябрь 2020 г.); в – за последние 3 мес. (июль – сентябрь 2020 г.).

1 – сейсмостанции, 2 – эпицентры землетрясений (табл.)

Ранее с использованием теоретического моделирования и примеров сейсмических записей, было показано, что низкие значения энтропии E_n обусловлены большим числом выбросов в изменениях рассматриваемого временного ряда. В случае временного ряда непрерывного сейсмического сигнала предполагалось, что возрастание числа выбросов может возникать из-за усиления взаимных перемещений малых блоков земной коры. Тогда высокие значения энтропии будут обусловлены уменьшением числа высокоамплитудных вариаций в сейсмических записях, что можно связывать с ростом консолидации малых блоков земной коры. Формирование крупного консолидированного блока способствует нако-

плению его энергии и, следовательно, увеличивает опасность сильного землетрясения. В качестве примеров таких крупных консолидированных блоков могут выступать длительно существующие области сейсмического затишья в земной коре, выделяемые по уменьшению числа слабых землетрясений, или сейсмические бреши (“seismic gaps”) [Федотов, 2005; Моги, 1988]. Повышенные значения плотности вероятности распределения максимальных значений E_n выделяют области в пределах исследуемого региона, где наиболее часто реализуются максимумы энтропии сейсмического шума и которые могут быть опасными с точки зрения возникновения крупных землетрясений.

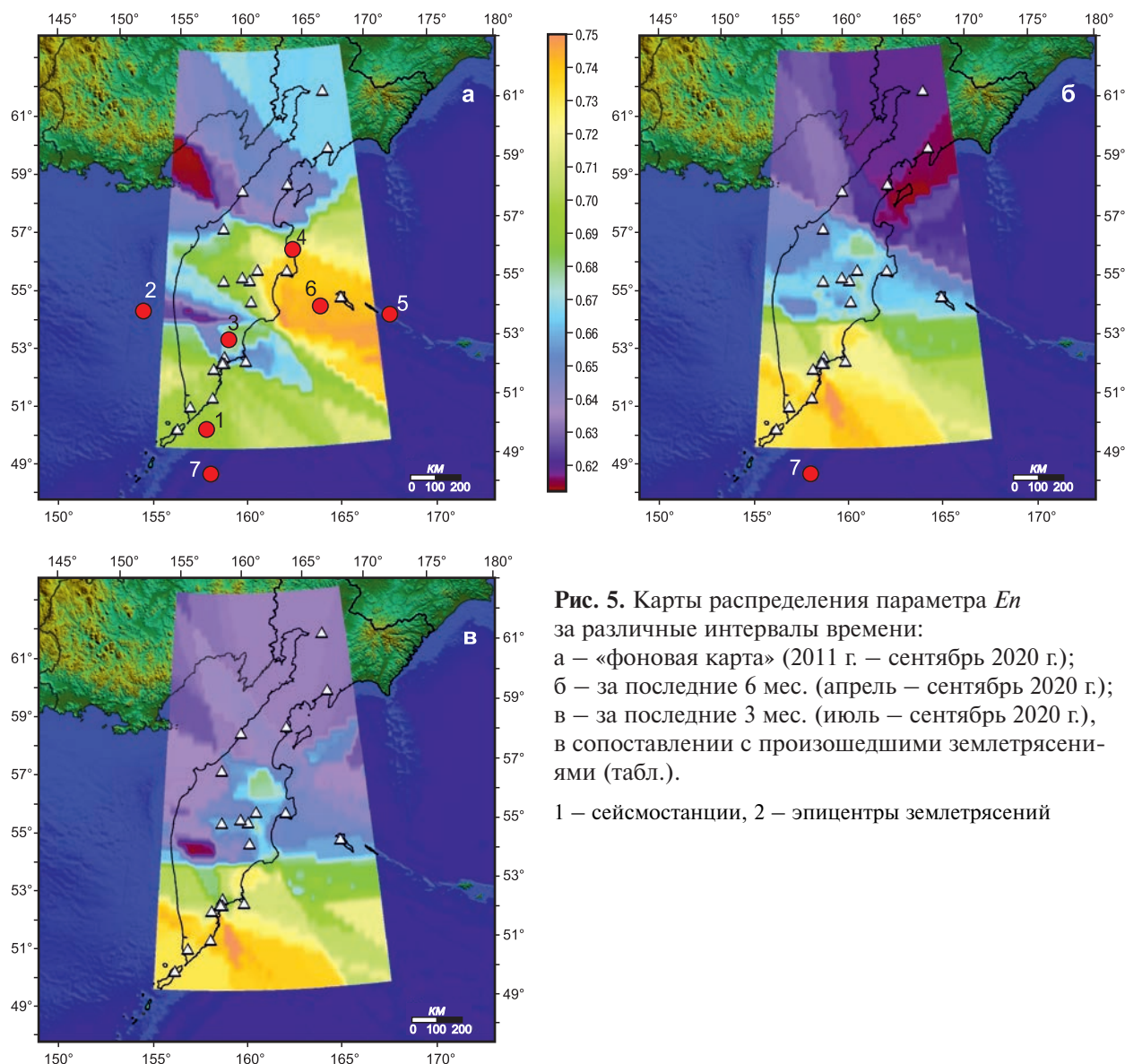


Рис. 5. Карты распределения параметра E_p за различные интервалы времени: а – «фоновая карта» (2011 г. – сентябрь 2020 г.); б – за последние 6 мес. (апрель – сентябрь 2020 г.); в – за последние 3 мес. (июль – сентябрь 2020 г.), в сопоставлении с произошедшими землетрясениями (табл.).

1 – сейсмостанции, 2 – эпицентры землетрясений

При анализе распределения мульти-фрактальных свойств шума α^* , $\Delta\alpha$ и β вместо распределения точек максимума внимание уделяется распределению точек минимума. Это следует из «антагонистичности» свойств энтропии и, в частности, ширины носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$, поскольку упрощение стохастической структуры случайного сигнала приводит к увеличению энтропии и уменьшению ширины носителя («потеря мульти-фрактальности»). Соответственно, увеличению опасности сильного землетрясения соответствуют рост энтропии и уменьшение ширины носителя и других параметров спектра сингулярности.

Вопрос о соотношении между поведением энтропии и мультифрактальных параметров при

упрощении стохастической структуры случайного сигнала неоднократно обсуждался в предыдущих публикациях [Lyubushin, 2012–2014, 2018, 2020с]. Полагалось, что при усилении взаимных движений малых блоков земной коры структура сейсмического сигнала усложняется и характеризуется хаотической последовательностью высокоамплитудных выбросов. Наличие таких выбросов влечёт за собой низкую энтропию и расширение спектра сингулярности. В то время как консолидация малых блоков земной коры на стадии подготовки сильного землетрясения приводит к ослаблению взаимных движений, к уменьшению числа выбросов в сейсмических записях и, соответственно, сопровождается увеличением энтропии и уменьшением параметров спектра сингулярности.

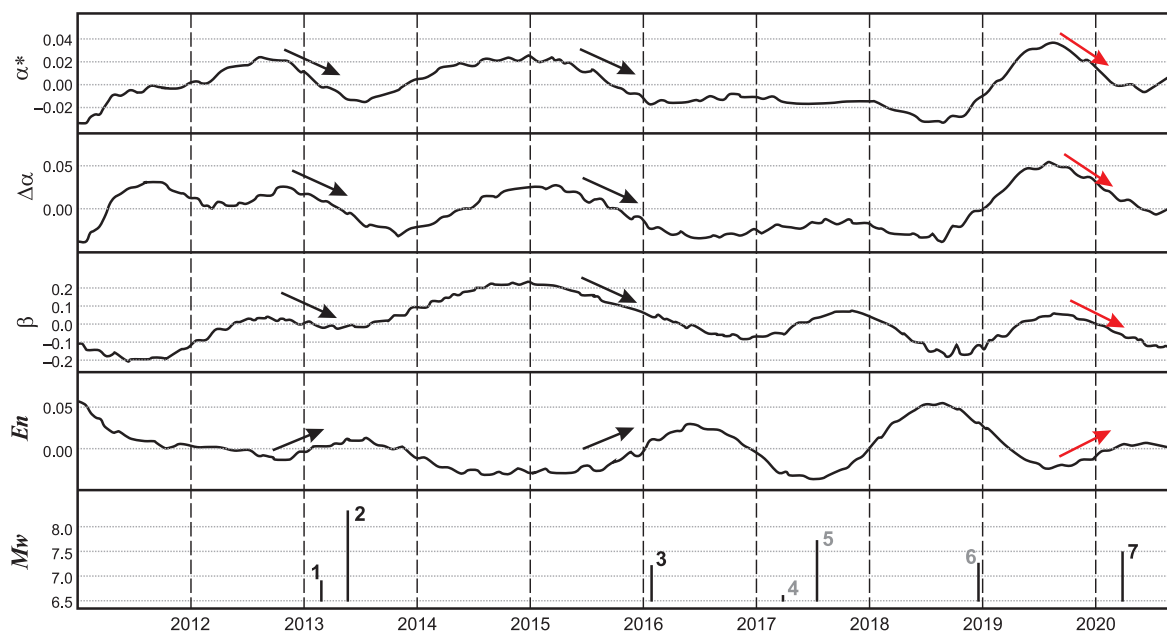


Рис. 6. Изменения «обобщённых параметров ФСШ» α^* , $\Delta\alpha$, β и En в 2011 г. – сентябре 2020 г. в сопоставлении с землетрясениями с $M_w \geq 6.6$ (табл.).

Чёрным цветом обозначены номера землетрясений 1–3 и 7, произошедшие в области Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны; серым цветом показаны номера землетрясений 4–6, произошедших в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Чёрными стрелками отмечены синхронные изменения параметров ФСШ перед землетрясениями 2013 г. (№ 1–2) и 2016 г. (№ 3) по [Касимова и др., 2018]. Красными стрелками отмечены аналогичные синхронные изменения параметров ФСШ во второй половине 2019 г. – сентябре 2020 г.

Полезным дополнением в анализе распределения параметров сейсмического шума является построение карт плотности вероятностей их экстремальных свойств [Lyubushin, 2019]. Рассмотрим значения энтропии как функцию двумерных векторов долгот и широт $z_{ij} = (x_i, y_j)$ узлов (i, j) в явном виде: $En_{ij}^{(t)} = En^{(t)}(z_{ij})$. Для каждой ежесуточной «элементарной карты» с дискретным временным индексом t находим координаты $z_{mn}^{(t)} = (x_m^{(t)}, y_n^{(t)})$ узлов, в которых энтропия достигает максимального значения по отношению ко всем остальным узлам регулярной сетки. Облако двумерных векторов $z_{mn}^{(t)}$, рассматриваемых на заданном интервале времени, образует некоторое случайное множество. Оценим его двумерную функцию распределения вероятностей для каждого узла регулярной сетки. Для этого воспользуемся оценкой Парзена-Розенблатта с гауссовой функцией ядра:

$$p(z_{ij} | t_0, t_1) = \frac{1}{2\pi h^2 (t_1 - t_0 + 1)} \sum_{t=t_0}^{t_1} \sum_{mn} \exp\left(-\frac{|z_{ij} - z_{mn}^{(t)}|^2}{2h^2}\right), \quad (4)$$

здесь h – радиус сглаживания, который для используемых сейсмических данных задавался равным 0.5 градуса.

В работе [Lyubushin, 2020c] построение таких карт применялось при оценке прогностических свойств энтропии сейсмического шума в Калифорнии, США для уточнения мест ожидаемых сильных землетрясений.

На рис. 2 показано распределение En и плотности распределения точек её максимумов за весь период наблюдений 9.75 лет. На рис. 3 представлены аналогичные карты для параметра $\Delta\alpha$.

Ретроспективный анализ карт распределения статистик сейсмического шума. Основные особенности пространственного распределения En и $\Delta\alpha$ сохранялись в течение всего времени наблюдений ([Lyubushin и др., 2015; Касимова и др., 2018], рис. 2а, 3а). На всех таких картах выделялись главные закономерности поля ФСШ в рассматриваемом районе, поэтому такие карты назывались «фоновыми». С «фоновыми» картами производилось сравнение карт распределения статистик шума, построенных для более коротких временных интервалов по текущим данным или при ретроспективном анализе.

На основе анализа «фоновых карт» в рассматриваемом районе была выделена область в диапазоне широт 53–58°N как наиболее опасная для возникновения сильнейших землетрясе-

ний [Любушин и др., 2015; Касимова и др., 2018]. По картам распределения плотности вероятностей минимальных значений En (рис. 2б) и максимальных значений $\Delta\alpha$ (рис. 3б), а также других параметров спектров сингулярности сейсмического шума можно более точно определять районы их экстремальных значений с учётом структуры сети станций.

Для получения картины динамического изменения поля ФСШ по текущим данным карты распределения информативных статистик шума строились для интервалов времени 3, 6 и 9 последних месяцев. Примеры таких карт распределения параметров $\Delta\alpha$ и En в сопоставлении с «фоновыми» картами за весь период наблюдений и произошедшими землетрясениями (табл.) представлены в [Касимова и др., 2018] и на рис. 4, 5.

«Обобщённые параметры ФСШ». В качестве дополнительного способа слежения за динамикой поля сейсмического шума в [Касимова и др., 2018] было предложено использовать совместно с картами также временные ряды суточных медианных значений четырёх статистик α^* , $\Delta\alpha$, β и En , вычисляемых по всем станциям сети и названных «обобщёнными параметрами ФСШ». При этом полагалось, что подготовка землетрясений с размерами очагов в сотни километров может сопровождаться изменением поля низкочастотного сейсмического шума в районе, вмещающем все или большую часть станций наблюдательной сети. В указанной работе было продемонстрировано, что после компенсации в таких временных рядах сезонной годовой компоненты в поведении «обобщённых параметров ФСШ» прослеживались характерные изменения на стадиях подготовки землетрясений 2013–2016 гг. с магнитудами $M_w=6.9-8.3$ (табл). Перед событиями №№ 1–3 наблюдалось выраженное синхронное уменьшение параметров α^* , $\Delta\alpha$, β и увеличение En в течение времени от 3 до 8 месяцев. На рис. 6 соответствующие эффекты выделены чёрными стрелками. Такая особенность поведения обобщённых статистических параметров шума перед землетрясениями 2013–2016 гг. (табл) также подтверждалась картами их пространственного распределения, построенными для интервалов времени 3 и 6 месяцев. Отмечалось, что аналогичные особенности в поведении статистик шума проявлялись также перед землетрясениями 2003 г. с $M_w=8.3$ и 2011 г. с $M_w=9.0$ в районе Японии [Любушин, 2012].

Рассмотрим графики изменения четырёх «обобщённых параметров ФСШ» за весь период наблюдений (рис. 6) в сопоставлении с произошедшими землетрясениями (табл.).

В 2013–2019 гг. в рассматриваемом районе произошли шесть землетрясений (№ 1–6 в табл., рис. 1–3, 4а, 5а), в т.ч. два события, которые относятся к классу сильнейших – мантийное Охотоморское землетрясение с $M_w=8.3$ (№ 2) и Ближне-Алеутское землетрясение с $M_w=7.7$ (№ 5).

Охотоморское землетрясение (табл., № 2) является наиболее сильным сейсмическим событием в районе полуострова Камчатка за период детальных сейсмологических наблюдений с 1961 г. [Чебров и др., 2013]. Выделившаяся при этом землетрясении энергия превышала суммарную сейсмическую энергию всех землетрясений, произошедших в рассматриваемом районе за предшествующие 41.5 лет. Охотоморское землетрясение ощущалось во многих населённых пунктах России от Камчатки до территории Восточно-Европейской равнины, в т.ч. в г. Москве, а также в странах Азии (Японии, Китае, Индии и др.). Землетрясение сопровождалось серией афтершоков, которые оконтурили область очага длиной 300 км и шириной 170 км в диапазоне глубин 425–720 км [Чебров и др., 2013].

Охотоморское землетрясение, так же, как Южно-Камчатское (№ 1) и Жупановское (№ 3) землетрясения с величинами магнитуд $M_w=6.9$ и 7.2 (таблица), произошли в пределах Камчатской сейсмофокальной зоны. В работе [Касимова и др., 2018] по картам распределения статистик сейсмического шума, построенным для интервалов времени 3, 6 и 9 месяцев, предшествующих этим землетрясениям, были выделены характерные изменения поля ФСШ вблизи их очагов – рост величин параметров спектров сингулярности и уменьшение энтропии сейсмического шума. Аналогичные изменения проявились в поведении графиков «обобщённых параметров ФСШ» в виде выраженного синхронного уменьшения мульти-фрактальных параметров α^* , $\Delta\alpha$, β и увеличения En в течение времени около трёх-восьми месяцев перед землетрясениями 2013 г. № 1 и 2 и перед Жупановским землетрясением 30 января 2016 г. (№ 3). На рис. 6 такие изменения «обобщённых параметров» отмечены чёрными стрелками. Это показывало, что при подготовке землетрясений с $M\approx 7$ места возникновения таких землетрясений могут также определяться по распределению статистик низкочастотного сейсмического шума в рамках рассматриваемого прогностического алгоритма на масштабах времени от месяцев до примерно одного года.

В 2017–2018 гг. в северной части района в ранее выделенном «опасном» диапазоне широт 53–58°N произошли три землетрясения (табл.,

рис. 1, № 4–6), в т.ч. Ближне-Алеутское землетрясение с $M_w=7.7$ (БАЗ). Здесь, в зоне контакта Тихоокеанской океанической плиты с малыми континентальными плитами Охотской, Берингией и Командорским блоком Алеутской островной дуги, наблюдалась активизация сейсмичности в области размером порядка 750 км. По данным работы [Чебров и др., 2019], протяжённость очага БАЗ составила ≈ 500 км (рис. 1), что в несколько раз превышает типичные линейные размеры очагов субдукционных и континентальных землетрясений с $M \approx 7.7-7.8$. Косейсмические смещения, вызванные БАЗ, по данным системы GNSS-измерений (Global Navigation Satellite Systems) были зарегистрированы в радиусе до 1000 км от эпицентра, что также значительно превышало характерные области проявления инструментально зафиксированных косейсмических деформаций при землетрясениях магнитудного диапазона 7.5–8. В ряде работ, в т.ч. в [Чебров и др., 2017], отмечалось, что очаг БАЗ расположен вблизи зоны сейсмического затишья на западе Алеутской дуги, названной Командорской сейсмической брешью, которая по своим размерам примерно соответствует очагу субдукционного землетрясения с $M \sim 9.0$.

Перед землетрясениями 2017–2018 гг. (№ 4–6) в изменениях «обобщённых параметров ФСШ» эффект их синхронизации, подобный эффектам перед землетрясениями 2013 и 2016 г. в Камчатской сейсмофокальной зоне, не проявлялся (рис. 6). В качестве одной из возможных причин этого можно рассматривать различие сейсмотектонических условий возникновения сильных землетрясений в пределах Курило-Камчатской зоны субдукции и в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Углублённый анализ этого вопроса предполагает более детальное рассмотрение геодинамических особенностей возникновения всех произошедших землетрясений (табл.) с привлечением данных о механизмах их очагов и спутниковой геодезии. Также следует отметить, что в северной части района плотность сети широкополосных сейсмостанций ниже по сравнению с конфигурацией сейсмостанций в центральной части полуострова Камчатка. Это также может быть причиной менее выраженного эффекта синхронизации в поведении «обобщённых» параметров шума перед землетрясениями № 4–6.

Анализ карт и графиков параметров ФСШ в режиме реального времени. Накопленный в 2011–2019 гг. опыт работы по рассматриваемому региону позволил перейти в 2020 г. к регулярной обработке данных с сети сейсмостанций (рис. 1) с составлением ежеквартальных заклю-

чений с оценками мест возникновения последующих землетрясений с величинами магнитуд 7 и более.

С середины 2019 г. по сентябрь 2020 г. в пространственном распределении статистик сейсмического шума происходили существенные изменения, по сравнению с их распределением на «фоновых картах». Распределение параметров $\Delta\alpha$ и En в 2020 г. приводится на рис. 4б, в и 5б, в, которые показывают смещение области повышенной опасности сильных землетрясений в южную часть района (диапазон широт $50-54^\circ N$). Кроме этого, с середины 2019 г. проявляются выраженные синхронные изменения «обобщённых параметров ФСШ» (отмечены красными стрелками на рис. 6), которые ранее наблюдались перед землетрясениями с $M_w=6.9-8.3$ в Камчатском фрагменте Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны.

На основании этих данных авторами было сделано заключение о наличии признака подготовки одного или нескольких землетрясений с $M \geq 7$ в центральной и южной части Камчатского фрагмента Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны, включающей заливы Кроноцкий, Авачинский и Южно-Камчатскую зону. Северо-Курильское землетрясение 25 марта 2020 г. с $M_w=7.5$, произошедшее восточнее о-ва Парамушир в районе глубоководного жёлоба (рис. 1–5, № 7), может рассматриваться в качестве одного из таких прогнозируемых событий. Также отметим, что после этого землетрясения, по результатам обработки данных за июль-сентябрь 2020 г., область повышенных величин мультифрактальных параметров и пониженных величин En в южной части района (рис. 4в, 5в) не претерпела каких-либо существенных изменений. На основании опыта предыдущих исследований поля ФСШ в районах полуострова Камчатка, Японии и других сейсмоактивных районов мира ожидаемые сейсмические события могут произойти в течение месяцев – первых лет.

С 2020 г. представленная технология анализа поля низкочастотного сейсмического шума реализуется в КФ ФИЦ ЕГС РАН в режиме, обеспечивающем ежеквартальные оценки опасности сильных землетрясений в рассматриваемом районе с выдачей прогнозных заключений для Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (РЭС) и его Камчатского филиала. Анализ ежеквартальных данных и подготовка прогностических заключений осуществляется сотрудниками КФ ФИЦ ЕГС РАН совместно с А.А. Любушиным (ИФЗ РАН).

Заключение

Настоящая работа относится к области повышения эффективности мониторинга сейсмической опасности и прогноза сильных землетрясений в северной части Дальневосточного региона России на основе углублённой обработки непрерывных записей на сети широкополосных сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН. Представлена соответствующая прогностическая технология, которая реализуется в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН под методическим руководством доктора физ.-мат. наук А.А. Любушина (ИФЗ РАН). Представленная технология удовлетворяет всем необходимым требованиям и может рассматриваться в качестве дополнительного компонента функционирования информационно-обрабатывающего центра КФ ФИЦ ЕГС РАН. Для этого достаточно включить в состав функций ИОЦ постоянное пополнение архива непрерывных суточных записей на сети широкополосных сейсмических станций и их оперативную обработку с использованием программного комплекса для расчёта информативных статистик шума по каждой станции и построения карт и графиков их пространственно-временного распределения с использованием ГИС-технологии. Указанные информационные и графические компоненты были созданы в результате сотрудничества КФ ФИЦ ЕГС РАН и ИФЗ РАН и апробированы в лаборатории геофизических исследований КФ ФИЦ ЕГС РАН в течение 2011–2020 гг.

В результате выполненных исследований показано, что пространственно-временные изменения статистических параметров ФСШ перед сильными землетрясениями в северной части Дальневосточного региона согласуются с их изменениями на стадиях подготовки двух землетрясений 2003 и 2011 гг. с $M_w=8.3$ и 9.0 в Японии с плотной сетью широкополосных сейсмических станций. Заблаговременные и ретроспективные прогнозы авторов относительно районов возникновения сильных землетрясений, приведённые в публикациях 2015 и 2018 гг., в целом оправдались. В частности, оба из двух сильнейших землетрясений с $M_w=8.3$ и 7.7 произошли в указанном диапазоне широт $53\text{--}58^\circ\text{N}$, определённом по пространственному распределению статистик низкочастотного сейсмического шума за период 2011–2016 гг.

С 2020 г. обеспечиваются оперативная обработка и анализ текущих сейсмологических данных, поступающих с широкополосных сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН, с выдачей ежеквартальных прогнозных заключений в РЭС

и КФ РЭС. В связи с изменением структуры пространственного распределения четырёх статистик сейсмического шума во второй половине 2019 г. – сентябре 2020 г. (рис. 4, 5) сделано заключение о повышенной опасности возникновения сильных землетрясений в южной части рассматриваемого района в диапазоне широт $50\text{--}54^\circ\text{N}$ в течение месяцев – первых лет.

Результаты выполненных исследований прогностических свойств сейсмического шума в районе полуострова Камчатка, Командорских островов и острова Парамушир дают основание рекомендовать созданную технологию динамической средне-долгосрочной оценки опасности сильных землетрясений для внедрения в других сейсмоактивных районах России при наличии в них достаточно плотных сетей широкополосных сейсмических станций.

Несомненным является и то, что в Дальневосточном регионе России такие исследования необходимо продолжать, в том числе путём расширения автоматизированной сети широкополосных сейсмических станций и доведения её плотности до величин, сопоставимых с плотностью аналогичных сетей в Японии и США.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Научные исследования, положенные в основу разработки представленной сейсмопрогностической технологии, в течение многих лет поддерживались РФФИ, проекты:

- 06-05-64625-а, 2006–2008 гг. «Масштабно-зависимые сценарии коллективного поведения геофизических процессов перед сильными землетрясениями»;
- 09-05-00134-а, 2009–2011 гг. «Тренды, ритмы и синхронизация мульти-фрактальных параметров шумов геофизических процессов»;
- 12-05-00146-а, 2012–2014 гг. «Глобальное поле низкочастотных сейсмических шумов: эффекты синхронизации и предвестники»;
- 15-05-00414-а, 2015–2017 гг. «Новые методы динамической оценки сейсмической опасности на основе анализа случайных флуктуаций геофизических полей»;
- 18-05-00133-а, 2018–2020 гг. «Оценка флуктуаций сейсмической опасности на основе комплексного анализа собственного шума Земли».

Все указанные проекты РФФИ выполнялись под руководством А.А. Любушина с участием сотрудников КФ ФИЦ ЕГС РАН Г.Н. Копыловой, В.А. Касимовой, Л.Н. Тарановой и С.В. Болдиной.

Отметим также поддержанный РФФИ проект молодого учёного 16-35-00516 мол_а, 2016–2017 гг. «Особенности вариаций низкочастотного сейсмического шума и параметров геомагнитного поля в Камчатском сейсмоактивном регионе», который выполнялся в КФ ФИЦ ЕГС РАН В.А. Касимовой.

Авторы выражают благодарность мл. науч. сотр. В.А. Касимовой за помощь в подготовке рис. 1–5 с использованием ГИС-проекта, созданного ею на основе ГИС-проекта «Петропавловский геодинамический полигон».

Литература

- Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А. Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // *Физика Земли*. – 2017. – № 1. – С. 34–53. doi:10.7868/S0002333717010021.
- Гордеев Е.И., Пинегина Т.К., Ландер А.В., Кожурин А.И. Берингия: сейсмическая опасность и фундаментальные вопросы геотектоники // *Физика Земли*. – 2015. – № 4. – С. 58–67.
- Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А. Введение в геодинамику. – М.: Недра, 1979. – 311 с.
- Иванов В.Ю., Касимова В.А. Создание макета ГИС-проекта «Петропавловский геодинамический полигон» для информационного обеспечения системы комплексных геофизических наблюдений // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. – 2009. – № 1, вып. 13. – С. 208–213.
- Касимова В.А., Копылова Г.Н., Любушин А.А. Вариации параметров фонового сейсмического шума на стадиях подготовки сильных землетрясений в Камчатском регионе // *Физика Земли*. – 2018. – № 2. – С. 269–283.
- Копылова Г.Н., Иванов В.Ю., Касимова В.А. Разработка элементов информационной системы комплексных геофизических наблюдений на территории Камчатки // *Российский журнал наук о Земле*. – 2009. – Т. 11. – RE2002. doi:10.2205/2009ES000329.
- Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дроздин Д.В., Кирюшин А.В. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 г.: существует ли плита Берингия? // *Вычислительная сейсмология*. – М.: Наука, 1994. – Вып. 26. – С. 103–122.
- Любушин А.А. Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки // *Физика Земли*. – 2008. – № 4. – С. 17–34.
- Любушин А.А. Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм // *Физика Земли*. – 2009. – № 5. – С. 15–28.
- Любушин А.А. Статистики временных фрагментов низкочастотных микросейсм: их тренды и синхронизация // *Физика Земли*. – 2010. – № 6. – С. 86–96.
- Любушин А.А. Кластерный анализ свойств низкочастотного микросейсмического шума // *Физика Земли*. – 2011. – № 6. – С. 26–34.
- Любушин А.А. Прогноз Великого Японского землетрясения // *Природа*. – 2012. – № 8. – С. 23–33.
- Любушин А.А. Карты свойств низкочастотных микросейсм для оценки сейсмической опасности // *Физика Земли*. – 2013а. – № 1. – С. 11–20.
- Любушин А.А. Карты линейной синхронизации свойств глобального поля низкочастотных сейсмических шумов // *Геофизические исследования*. – 2013б. – Т. 14, № 1. – С. 41–53.
- Любушин А.А. Анализ когерентности глобального сейсмического шума, 1997–2012 // *Физика Земли*. – 2014. – № 3. – С. 18–27.
- Любушин А.А. Связь полей низкочастотных сейсмических шумов Японии и Калифорнии // *Физика Земли*. – 2016. – № 6. – С. 28–38.
- Любушин А.А. Циклические свойства сейсмического шума и проблема прогнозируемости сильнейших землетрясений на Японских островах // *Геофизические процессы и биосфера*. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 62–77.
- Любушин А.А., Копылова Г.Н., Касимова В.А., Таранова Л.Н. О свойствах поля низкочастотных шумов, зарегистрированных на Камчатской сети широкополосных сейсмических станций // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. – 2015. – № 2, вып. 26. – С. 20–36.
- Моги К. Предсказание землетрясений. – М.: Мир, 1988. – 382 с.
- Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. – М.: Наука, 2005. – 303 с.
- Фирстов П.П., Копылова Г.Н., Соломатин А.В., Серафимова Ю.К. О прогнозировании сильного землетрясения в районе полуострова Камчатка // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. – 2016. – № 4, вып. 32. – С. 106–114.
- Чебров В.Н. 100 лет инструментальным сейсмологическим наблюдениям на Камчатке // *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Пятой научно-технической конференции / Отв. ред. В.Н. Чебров*. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 6–13.
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.В., Кравченко Н.М., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Раевская А.А., Салтыков В.А., Чебров Д.В., Ландер А.В. Глубокое Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. с магнитудой $M_w=8.3$ – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. – 2013. – № 1, вып. 21. – С. 17–24.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Ландер А.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Титков Н.Н. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w=7.8$ на границе Командорской сейсмической брешы // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. – 2017. – № 3, вып. 35. – С. 22–25.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., Абубакиров А.Р., Гусев А.А., Дроздина С.Я., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Титков Н.Н. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w=7.8$. I. Протяжённый разрыв вдоль

- Командорского блока Алеутской островной дуги по данным наблюдений на Камчатке // *Физика Земли*. – 2019. – № 4. – С. 48–71. doi:10.31857/S0002-33372019448-71
- Чебров Д.В., Кузнецов Ю.А., Ландер А.В., Абубакиров И.Р., Воропаев П.В., Гусев А.А., Дроздин Д.В., Дроздина С.Я., Иванова Е.И., Кравченко Н.М., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Раевская А.А., Салтыков В.А., Сеников С.Л., Скоркина А.А., Серафимова Ю.К. Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. с $M_w=6.6$, $K_s=15.0$, $I=6$ (Камчатка) // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. – 2017. – № 3, вып. 35. – С. 7–21.
- Чеброва А.Ю., Чемарев А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // *Геофизические исследования*. – 2020. – Т. 21, № 3. – С. 66–91.
- Argus D.F., Gordon R.G. No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1 // *Geophysical Research Letters*. – 1991. – V. 18. – P. 2039–2042. doi:10.1029/91GL01532
- DeMets C.R., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Current plate motions // *Geophysical Journal International*. – 1990. – V. 101. – P. 425–478.
- Kozhurin A.I. Active Faulting in the Kamchatsky Peninsula, Kamchatka-Aleutian Junction // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Geophysical Monograph Series, V. 172* / Eds. J. Eichelberger, E. Gordeev, M. Kasahara, et al. – American Geophysical Union, 2007. – P. 263–282.
- Lyubushin A. Multifractal parameters of low-frequency microseisms // *Synchronization and Triggering: from Fracture to Earthquake Processes. GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences* / Eds. V. de Rubeis, Z. Czechowski, R. Teisseyre. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. – P. 253–272. doi:10.1007/978-3-642-12300-9_15
- Lyubushin A.A. Seismic catastrophe in Japan on March 11, 2011: long-term prediction on the basis of low-frequency microseisms // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2011. – V. 46, N 8. – P. 904–921. doi:10.1134/S0001433811080056
- Lyubushin A. Prognostic properties of low-frequency seismic noise // *Natural Science*. – 2012. – V. 4. – P. 659–666. doi:10.4236/ns.2012.428087
- Lyubushin A. How soon would the next mega-earthquake occur in Japan? // *Natural Science*. – 2013. – V. 5. – P. 1–7. doi:10.4236/ns.2013.58A1001
- Lyubushin A.A. Dynamic estimate of seismic danger based on multifractal properties of low-frequency seismic noise // *Natural Hazards*. – 2014. – V. 70. – P. 471–483. doi:10.1007/s11069-013-0823-7
- Lyubushin A.A. Wavelet-based coherence measures of global seismic noise properties // *Journal of Seismology*. – 2015. – V. 19. – P. 329–340. doi:10.1007/s10950-014-9468-6
- Lyubushin A.A. Long-range coherence between seismic noise properties in Japan and California before and after Tohoku mega-earthquake // *Acta Geodaetica et Geophysica*. – 2017. – N 52. – P. 467–478. doi:10.1007/s40328-016-0181-5
- Lyubushin A. Synchronization of geophysical field fluctuations // *Complexity of Seismic Time Series: Measurement and Applications. Ch. 6* / Eds. T. Chelidze, L. Telesca, F. Valianatos. – Amsterdam, Oxford, Cambridge: Elsevier, 2018. – P. 161–197. doi:10.1016/B978-0-12-813138-1.00006-7
- Lyubushin A. Field of coherence of GPS-measured earth tremors // *GPS Solutions*. – 2019. – V. 23. – A. 120. doi:10.1007/s10291-019-0909-0
- Lyubushin A. Trends of Global seismic noise properties in connection to irregularity of Earth's rotation // *Pure and Applied Geophysics*. – 2020a. – V. 177. – P. 621–636. doi:10.1007/s00024-019-02331-z
- Lyubushin A. Connection of seismic noise properties in Japan and California with irregularity of Earth's rotation // *Pure and Applied Geophysics*. – 2020b. – V. 177. – P. 4677–4689. doi:10.1007/s00024-020-02526-9
- Lyubushin A.A. Seismic noise wavelet-based entropy in Southern California // *Journal of Seismology*. – 2020c. doi:10.1007/s10950-020-09950-3
- Lyubushin A. Global seismic noise entropy // *Frontiers in Earth Science*. – 2020d. – V. 8. – P. 611–663. doi:10.3389/feart.2020.611663

Сведения об авторах

Копылова Галина Николаевна, д-р геол.-мин. наук, доцент, гл. науч. сотр. Камчатского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Петропавловск Камчатский, Россия. E-mail: gala@emsd.ru

Любушин Алексей Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. Шмидта О.Ю. Российской академии наук, г. Москва, Россия. E-mail: lyubushin@yandex.ru

Таранова Лариса Николаевна, инженер-исследователь КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск Камчатский, Россия. E-mail: lara7@emsd.ru

New prognostic technology for analysis of low-frequency seismic noise variations (on the example of the Russian Far East)

© 2021 G.N. Kopylova¹, A.A. Lyubushin², L.N. Taranova¹

¹KD GS RAS, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia; ²IPE RAS, Moscow, Russia

Received December 24, 2020

Abstract A new technology for predicting strong earthquakes with a magnitude range of M_w about 7 and more is considered, based on the use of continuous recordings of seismic noise on a network of 21 broadband stations of the GS RAS in the region of the Kamchatka Peninsula, the Commander Islands and the Paramushir Island. The article is described a forecasting algorithm created by A.A. Lyubushin, IPE RAS, and the state of its implementation in the Kamchatka Division GS RAS for the purpose of an advance (months - first years) assessment of the strong earthquakes preparation sites. The data processing algorithm includes the calculation of four noise statistics time series for each station and the construction of their spatial distribution maps for different time intervals. We used four noise statistics, including the minimal entropy of the orthogonal wavelet coefficients squares and three characteristics of the multifractal spectrum of singularity – the generalized Hurst exponent, the carrier width, and the spectral wavelet exponent. Based on previous research, characteristic features of the four seismic noise statistics behavior at preparation stages of the local earthquakes 2013-2016 with $M_w=6.6-8.3$ were revealed, corresponding to similar changes before the two earthquakes with $M_w=8.3$ and 9.0 in Japan. It was found that an increase in the danger of a strong earthquake is accompanied by an increase in minimal entropy and a decrease in the carrier width and other parameters of the singularity spectrum. Since 2020, the processing of current data from the network of broadband stations of the GS RAS in the Far East region has been carried out in accordance with the seismic forecasting algorithm for drawing up quarterly forecast conclusions, which are sent to the Russian Expert Council on Earthquake Forecasting, Seismic Hazard and Risk Assessment (REC) and to Kamchatka Branch of REC.

Keywords seismic noise, seismic forecasting algorithm, earthquake forecast, Kamchatka Peninsula.

For citation Kopylova, G.N., Lyubushin, A.A., & Taranova, L.N. (2021). [New prognostic technology for analysis of low-frequency seismic noise variations (on the example of the Russian Far East)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(1), 75-91. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.05>

References

- Akopian, S.T., Bondur, V.G., & Rogozhin, E.A. (2017). Technology for monitoring and forecasting strong earthquakes in Russia with the use of the seismic entropy method. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 53, 32-51. doi:10.1134/S1069351317010025
- Argus, D.F., & Gordon, R.G. (1991). No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1. *Geophysical Research Letters*, 18, 2039-2042. doi:10.1029/91GL01532
- Chebrov, D.V., Kugaenko, Iu.A., Abubakirov, I.R., Lander, A.V., Pavlov, V.M., Saltykov, V.A., & Titkov, N.N. (2017). [Near Islands Aleutian Earthquake of July 17, 2017 with $M_w=7.8$ at the border of the Commander seismic gap]. *Vestnik KRAUNTS. Seriya: Nauki o Zemle* [Bulletin KRAUNZ. Series: Earth Sciences], 3(35), 22-25. (In Russ.). Retrieved from <http://www.kscnet.ru/journal/kraesc/article/viewFile/140/pdf>
- Chebrov, D.V., Kugaenko, Iu.A., Lander, A.V., Abubakirov, I.R., Voropaev, P.V., Gusev, A.A., Droznin, D.V., Droznina, S.Ia., Ivanova, E.I., Kravchenko, N.M., Matveenko, E.A., Mitiushkina, S.V., Ototiuk, D.A., Pavlov, V.M., Raevskaia, A.A., Saltykov, V.A., Seniukov, S.L., Skorkina, A.A., & Serafimova, Iu.K. (2017). [South Ozernovsk earthquake of March 29, 2017 with $M_w=6.6$, $K_s=15.0$, $I=6$ (Kamchatka)]. *Vestnik KRAUNTS. Seriya: Nauki o Zemle* [Bulletin KRAUNZ. Series: Earth Sciences], 3(35), 7-21. (In Russ.). Retrieved from <http://www.kscnet.ru/journal/kraesc/article/viewFile/139/pdf>
- Chebrov, D.V., Kugaenko, Y.A., Lander, A.V. et al. (2019). Near Islands Aleutian Earthquake with $M_w=7.8$ on July 17, 2017: I. Extended rupture along the

- Commander block of the Aleutian Island Arc from observations in Kamchatka. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 55, 576–599. doi:10.1134/S1069351319040037
- Chebrov, V.N. (2015). [100 years of instrumental seismological observations in Kamchatka]. In *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii. Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii. Trudy Piatoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Otv. red. V.N. Chebrov* [Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East. Proceedings of the Fifth Scientific and Technical Conference. Ed. V.N. Chebrov] (pp. 6–13). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). Retrieved from http://emsd.ru/static/library/2015_conf/book.pdf
- Chebrov, V.N., Kugaenko, Iu.A., Vikulina, S.V., Krvchenko, N.M., Matveenko, E.A., Mitiushkina, S.V., Raevskaia, A.A., Saltykov, V.A., Chebrov, D.V., & Lander, A.V. (2013). [The deep sea of Okhotsk earthquake of May 24, 2013 with a magnitude of Mw=8.3 is the strongest seismic event off the coast of Kamchatka during the period of detailed seismological observations]. *Vestnik KRAUNTS. Seriya: Nauki o Zemle* [Bulletin KRAUNZ. Series: Earth Sciences], 1(21), 17–24. (In Russ.). Retrieved from <http://www.kscnet.ru/journal/kraesc/article/viewFile/343/pdf>
- Chebrova, A.Yu., Chemarev, A.S., Matveenko, E.A., & Chebrov, D.V. (2020). Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions. *Geophysical Research*, 21(3), 66–91. doi:10.21455/gr2020.3-5
- DeMets, C.R., Gordon, R.G., Argus, D.F., & Stein, S. (1990). Current plate motions. *Geophysical Journal International*, 101, 425–478.
- Gordeev, E.I., Pinagina, T.K., Lander, A.V. et al. (2015). Beringia: Seismic hazard and fundamental problems of geotectonics. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 51, 512–521. doi:10.1134/S1069351315030039
- Ivanov, V.Yu., & Kasimova, V.A. (2009). [Creation of the layout of gis - project “Petropavlovsk geodynamical polygon” for an information supply with system for complex geophysical observations]. *Vestnik KRAUNTS. Seriya: Nauki o Zemle* [Bulletin KRAUNZ. Series: Earth Sciences], 1(13), 208–213. (In Russ.). Retrieved from <http://www.kscnet.ru/journal/kraesc/article/viewFile/534/pdf>
- Kasimova, V.A., Kopylova, G.N., & Lyubushin, A.A. (2018). Variations in the parameters of background seismic noise during the preparation stages of strong earthquakes in the Kamchatka region. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 54, 269–283. doi:10.1134/S1069351318020076
- Kopylova, G.N., Ivanov, V.Yu., & Kasimova, V.A. (2009). The implementation of information system elements for interpreting integrated geophysical observations in Kamchatka. *Russian Journal Earth Sciences*, 11, ES1006. doi:10.2205/2009ES000329
- Kozhurin, A.I. (2007). Active faulting in the Kamchatsky peninsula, Kamchatka-Aleutian junction. In *Eichelberger J., Gordeev E., Kasahara M. et al. (eds) Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Geophysical Monograph Series, V. 172*, (pp. 263–282). American Geophysical Union Publ.
- Lander, A.V., Bukchin, B.G., Droznin, D.V., & Kirushin, A.V. (1994). [Tektonicheskaia pozitsiia i ocha-govye parametry Khailinskogo (Koriakskogo) zemletriaseniia 8 marta 1991 g.: sushchestvuet li plita Beringiia?]. *Vychislitel'naia seismologiya* [Computational Seismology], 26, 103–122. (In Russ.).
- Lyubushin, A.A. (2008). Microseismic noise in the low frequency range (Periods of 1–300 min): Properties and possible prognostic features. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 44, 275–290. doi:10.1134/s11486-008-4002-6
- Lyubushin, A.A. (2009). Synchronization trends and rhythms of multifractal parameters of the field of low-frequency microseisms. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 45, 381–394. doi:10.1134/S1069351309050024
- Lyubushin, A. (2010a). Multifractal parameters of low-frequency microseisms. In: *de Rubeis V., Czechowski Z., Teisseyre R. (eds.) Synchronization and Triggering: from Fracture to Earthquake Processes. Geoplanet: Earth and Planetary Sciences* (pp. 253–272). Berlin, Heidelberg: Springer Publ. doi:10.1007/978-3-642-12300-9_15
- Lyubushin, A.A. (2010b). The statistics of the time segments of low-frequency microseisms: Trends and synchronization. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 46, 544–554. doi:10.1134/S1069351310060091
- Lyubushin, A.A. (2011a). Cluster analysis of low-frequency microseismic noise. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 47, 488–495.
- Lyubushin, A.A. (2011b). Seismic catastrophe in Japan on March 11, 2011: long-term prediction on the basis of low-frequency microseisms. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 46(8), 904–921. doi:10.1134/S0001433811080056
- Lyubushin, A.A. (2012a). Prediction of the Great Japanese Earthquake. *Nature*, 8, 23–33.
- Lyubushin, A. (2012b). Prognostic properties of low-frequency seismic noise. *Natural Science*, 4, 659–666. doi:10.4236/ns.2012.428087
- Lyubushin, A. (2013a). How soon would the next mega-earthquake occur in Japan? *Natural Science*, 5, 1–7. doi:10.4236/ns.2013.58A1001
- Lyubushin, A.A. (2013b). Mapping the properties of low-frequency microseisms for seismic hazard assessment. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 49, 9–18. doi:10.1134/S1069351313010084
- Lyubushin, A.A. (2013c). Maps of linear synchronization for the properties of global low-frequency seismic noise. *Geophysical Research*, 1, 11–20.

- Lyubushin, A.A. (2014a). Analysis of coherence in global seismic noise for 1997–2012. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 50, 325–333. doi:10.1134/S1069351314030069
- Lyubushin, A.A. (2014b). Dynamic estimate of seismic danger based on multifractal properties of low-frequency seismic noise. *Natural Hazards*, 70, 471–483. doi:10.1007/s11069-013-0823-7
- Lyubushin, A.A. (2015). Wavelet-based coherence measures of global seismic noise properties. *Journal of Seismology*, 19, 329–340. doi:10.1007/s10950-014-9468-6
- Lyubushin, A.A. (2016). Coherence between the fields of low-frequency seismic noise in Japan and California. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, 52, 810–820. doi:10.1134/S1069351316050086
- Lyubushin, A.A. (2017). Long-range coherence between seismic noise properties in Japan and California before and after Tohoku mega-earthquake. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 52, 467–478. doi:10.1007/s40328-016-0181-5
- Lyubushin, A.A. (2018a). Cyclic properties of seismic noise and the problem of predictability of the strongest earthquakes in the Japanese islands. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 54, 1460–1469. doi:10.1134/S0001433818100067
- Lyubushin, A. (2018b). Synchronization of geophysical field fluctuations. In *Chelidze T., Telesca L., Vallianatos F. (eds) Complexity of Seismic Time Series: Measurement and Applications, Chapter 6*, (pp. 161–197). Amsterdam, Oxford, Cambridge: Elsevier Publ. doi:10.1016/B978-0-12-813138-1.00006-7
- Lyubushin, A. (2019). Field of coherence of GPS-measured earth tremors. *GPS Solutions*, 23, 120. doi:10.1007/s10291-019-0909-0
- Lyubushin, A. (2020a). Trends of Global seismic noise properties in connection to irregularity of Earth's rotation. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 621–636. doi:10.1007/s00024-019-02331-z
- Lyubushin, A. (2020b). Connection of seismic noise properties in Japan and California with irregularity of Earth's rotation. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 4677–4689. doi:10.1007/s00024-020-02526-9
- Lyubushin, A.A. (2020c). Seismic noise wavelet-based entropy in Southern California. *Journal of Seismology*. doi:10.1007/s10950-020-09950-3
- Lyubushin, A. (2020d). Global seismic noise entropy. *Frontiers in Earth Science*, 8, 611–663. doi:10.3389/feart.2020.611663
- Lyubushin, A.A., Kopylova, G.N., Kasimova, V.A., & Taranova, L.N. (2015). [The properties of fields of low frequency noise from the network of broadband seismic stations in Kamchatka]. *Vestnik KRAUNTS. Seriya: Nauki o Zemle* [Bulletin KRAUNZ. Series: Earth Sciences], 2(26), 20–36. (In Russ.). Retrieved from http://www.kscnet.ru/kraesc/2015/2015_26/art3.pdf
- Mogi, K. (1985). *Earthquake prediction*. Tokyo, Japan: Academic press, 355 p.
- Fedotov, S.A. (2005). *Dolgosrochnyy seysmicheskiy prognoz dlya Kurilo-Kamchatskoy dugi* [Long-term seismic forecast for Kurilo-Kamchatka arcs]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 303 p. (In Russ.).
- Firstov, P.P., Kopylova, G.N., Solomatin, A.V., & Serafimova, Yu.K. (2016). [Strong earthquake forecast near the Kamchatka peninsula]. *Vestnik KRAUNTS. Seriya: Nauki o Zemle* [Bulletin KRAUNZ. Series: Earth Sciences], 4(32), 106–114. (In Russ.). Retrieved from <http://www.kscnet.ru/journal/kraesc/article/viewFile/106/pdf>
- Zonenshain, L.P., & Savostin, L.A. (1979). *Vvedenie v geodinamiku* [Introduction to Geodynamics]. Moscow, Russia: Nedra Publ., 311 p. (In Russ.).

Information about authors

Kopylova Galina Nikolaevna, Dr., Associate Professor, Chief Researcher of the Kamchatka Division of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (KD GS RAS), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: gala@emsd.ru

Lyubushin Aleksey Aleksandrovich, Dr., Professor, Chief Researcher of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia. E-mail: lyubushin@yandex.ru

Taranova Larisa Nikolaevna, Research Engineer of the KD GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: lara7@emsd.ru