

УДК 550.34

## О СВОЙСТВАХ ПОЛЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ НА КАМЧАТСКОЙ СЕТИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

© 2015 А.А. Любушин<sup>1</sup>, Г.Н. Копылова<sup>2</sup>, В.А. Касимова<sup>2</sup>, Л.Н. Таранова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, 123995. e-mail: lyubushin@yandex.ru

<sup>2</sup>Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006. e-mail: gala@emsd.ru

В статье представлены результаты исследований 2011-2014 гг. по разработке новой сейсмопрогностической технологии с использованием 1-минутных временных рядов низкочастотного шума, зарегистрированного на широкополосных сейсмических станциях Геофизической службы РАН, расположенных на территории Камчатки. Приводится описание алгоритмов получения 8-ми статистических параметров, характеризующих пространственно-временную изменчивость поля шумов, и обсуждаются перспективы их применения для прогнозирования сильнейших землетрясений с  $M \geq 7.5$ .

Оценка изменчивости поля шумов производится с помощью карт пространственного распределения статистик шума и графиков изменения их минимальных, средних и максимальных значений, оцениваемых по всем станциям в заданных временных окнах. Рассмотрены вариации статистик шума в период сейсмической активизации на Камчатке в 2013 г., включающей мантийное Охотоморское землетрясение с  $M_w = 8.3$ . Выделена северная часть Камчатской сейсмофокальной зоны в диапазоне широт  $55-58^\circ$  с. ш. как наиболее опасная для возникновения одного или нескольких сильных землетрясений с  $M \geq 7.5-8.0$ .

*Ключевые слова:* прогноз землетрясений, низкочастотный шум, временные ряды, землетрясения, Камчатка.

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых технологий прогноза сильных землетрясений на основе данных геофизического мониторинга сейсмоактивных областей является одной из приоритетных задач в науках о Земле. В качестве основных компонентов таких технологий можно рассматривать:

1 – наличие системы сбора, хранения и обработки данных о вариациях геофизических полей во времени;

2 – наличие признаков (предвестников) подготовки сильных землетрясений, проявляющихся в изменениях параметров геофизических полей, и выявление их сейсмопрогностических свойств;

3 – разработка алгоритмов обработки геофизической информации, направленных на оперативное выделение признаков подготовки сильных землетрясений;

4 – создание программного и информационного обеспечения для эффективного функ-

ционирования технологии оценки сейсмической опасности и прогнозирования сильных землетрясений.

В работе представлено состояние исследований по разработке третьего и четвертого компонентов новой технологии прогнозирования землетрясений на Камчатке на основе использования сейсмопрогностических свойств поля низкочастотных шумов, зарегистрированных на сети широкополосных сейсмических станций Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН). Основное внимание уделяется описанию алгоритмов получения статистических параметров, характеризующих пространственно-временную изменчивость шума, и их использованию для прогноза сильных землетрясений.

Разработка новой технологии прогноза сильных землетрясений по данным о вариациях низкочастотных шумов проводится совместно КФ ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский и Институтом физики Земли РАН, г. Москва.

Предварительные результаты исследований по данным наблюдений за шумами с января 2011 по июнь 2013 гг. представлены в работе (Любушин и др., 2013).

Хорошо известно, что низкочастотный сейсмический шум является важным источником информации о процессах в земной коре, несмотря на то, что основная энергия этих колебаний обусловлена процессами в атмосфере и океане (Berger et al., 2004; Tanimoto, 2001, 2005; Tanimoto et al., 1998). Земная кора является средой распространения энергии от атмосферных и океанических процессов и, поскольку передаточные свойства коры зависят от ее состояния, то и статистические свойства микросейсм могут отражать изменения свойств литосферы, в том числе и перед сильными землетрясениями.

В научной литературе последних лет наращивается число публикаций, посвященных сейсмопрогностическим свойствам сейсмического шума, записанном широкополосной сейсмометрической аппаратурой в минутном – часовом диапазоне периодов колебаний. Например, в работах (Соболев и др., 2005, 2008; Соболев, Любушин, 2006) исследовалась периодическая структура сейсмического шума, зарегистрированного на широкополосных станциях Камчатки, Японии и Сахалина. Показано, что перед сильными землетрясениями с  $M = 7.5-8.3$  в записях проявлялись импульсные колебания длительностью в несколько минут, следующие друг за другом с интервалом в несколько десятков минут.

В работах (Любушин, 2007, 2008; Любушин, Соболев, 2006; Соболев, Любушин, 2007) продемонстрировано, что за несколько суток перед сильными землетрясениями в записях сейсмического шума на сети разнесенных станций проявляются эффекты линейной синхронизации колебаний с периодами минуты – десятки минут, выделяемые с помощью аппарата канонических корреляций и когерентностей, примененного для анализа вариаций параметров мульти-фрактальных спектров сингулярности волновых форм шума. С использованием такого подхода были выделены относительно кратковременные эффекты синхронизации сейсмических шумов за 3-5 суток до Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г.,  $M = 7.8$  на Камчатке и за 53 часа до землетрясения 26 декабря 2004 г. на о-ве Суматра,  $M = 9.1$ .

При исследовании сейсмопрогностических свойств шума, зарегистрированного на сейсмостанциях, расположенных на территории Камчатского края и о-ва Парамушир (Сахалинская область), применяется методика, разработанная А.А. Любушиным (Любушин, 2009-2012, 2013а; Lyubushin, 2010-2014). В указанных работах с использованием записей вертикальных компонент движений грунта на сети широкополосных

сейсмических станций F-net в Японии, приведенных к интервалу дискретизации 1 минута, убедительно показана возможность оценки времени и места возникновения сильнейших землетрясений с величинами  $M$  порядка 8 и более с выдачей заблаговременного среднесрочного сейсмического прогноза с временем упреждения не более месяцев – первых лет.

## ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

На рассматриваемой территории имеется сеть цифровых широкополосных сейсмических станций (рис. 1), данные с которых в режиме реального времени поступают в Информационно-обработывающий центр КФ ГС РАН по спутниковым и другим каналам связи (Чебров, 2013; Чебров и др., 2013а).

В качестве источников сейсмических данных в работе использовались записи вертикальных компонент движений грунта на канале ВНЗ с частотой оцифровки 100 Гц (за исключением станции РЕТ, для которой частота оцифровки равна 20 Гц) с 01 января 2011 по 31 декабря 2014 гг., полученные на 20-ти широкополосных сейсмических станциях (табл. 1).

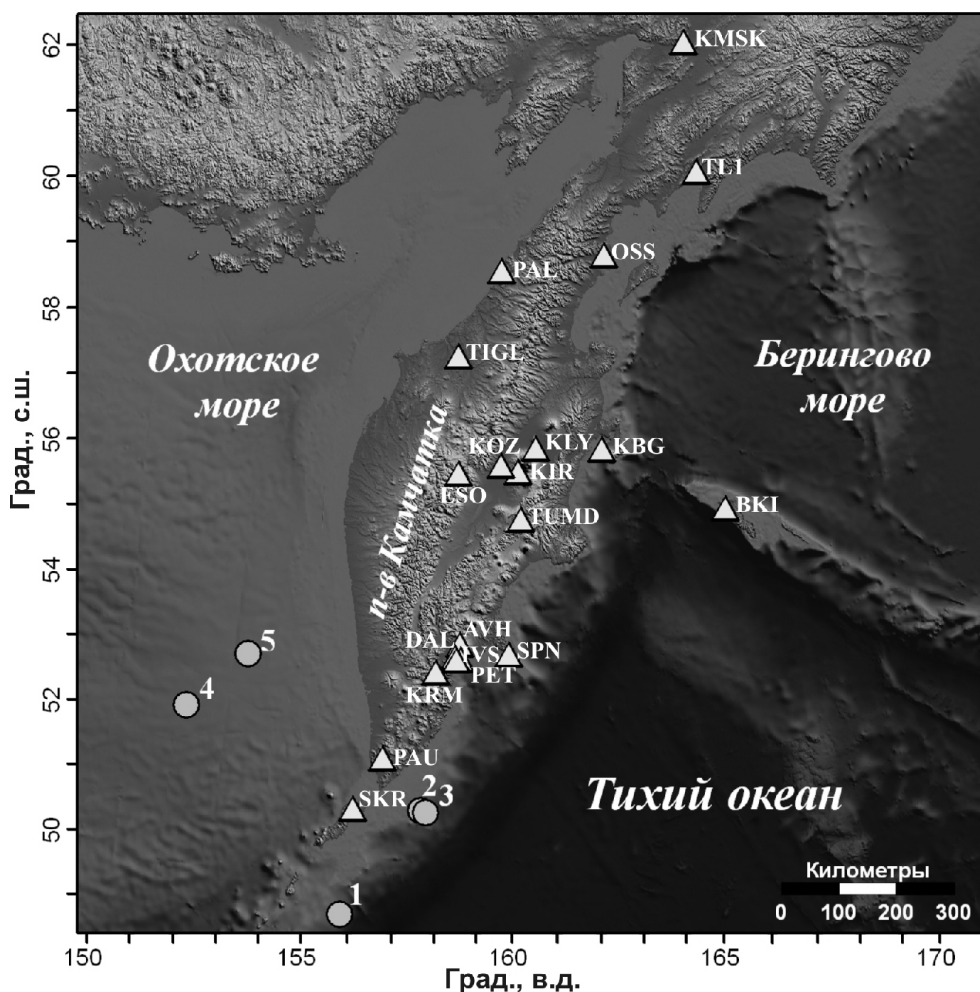
Наблюдательная сеть (рис. 1) характеризуется следующими линейными размерами:

- максимальные расстояния между станциями составляют 1450 км в направлении С-Ю (между станциями SKR и KMSK) и 560 км в направлении З-В (между станциями PAL и BKI);
- среднее расстояние между двумя соседними станциями составляет 120 км (медиана 110 км) при разбросе значений от 10 до 240 км.

Сравнение линейных размеров сети станций с оценками максимальных размеров потенциальных очагов сильных землетрясений в зависимости от магнитуды (Ризниченко, 1976) позволяет предполагать ее чувствительность по отношению к процессам подготовки землетрясений с величинами магнитуд не менее 7.5-9.0. Для таких землетрясений максимальные линейные размеры их очагов составляют 100-800 км, поэтому конфигурация действующей сети станции может перекрывать их области частично или полностью.

Для создания 1-минутных временных рядов низкочастотного шума, зарегистрированного на каждой станции, вычислялись средние значения исходных записей в последовательных интервалах времени длиной 6000 отсчетов. Получаемые 1-минутные временные ряды для всех 20-ти станций хранятся в пополняемой базе данных на сервере КФ ГС РАН с доступом по локальной сети.

В работе (Касимова, Копылова, 2013) исследовалась спектральная структура 1-минутных и среднечасовых временных рядов низкочастотного



**Рис. 1.** Схема расположения сейсмостанций (треугольники) и эпицентров землетрясений с  $M_w \geq 6.5$  (кружки). Название сейсмических станций приведено в табл. 1. Номера землетрясений соответствуют номерам в табл. 2.

шума, записанного на станциях КФ ГС РАН, и показано, что в диапазоне минутных периодов присутствуют сезонные изменения его уровня, проявляющиеся в увеличении амплитуд шума в первой половине календарного года. В спектрах мощности среднечасовых рядов шума четко выделялись суточные и полусуточные максимумы, морфология и интенсивность которых определялись местоположением станций (прибрежная или континентальная). На прибрежных станциях, наряду с суточной и полусуточной компонентами с периодами 24 и 12 ч соответственно, выделяются спектральные максимумы, соответствующие волнам  $O_1$  (период 25.82 ч) и  $M_2$  (12.42 ч).

В соответствии с используемой методикой производились оценки 8-ми информативных статистик в последовательных интервалах времени длиной 1440 отсчетов или 1 сутки для 1-минутных временных рядов по каждой станции. При этом расчеты величин статистик шума производились после удаления низкочастотных трендов полиномом 8-го порядка. Удаление трендов направлено на подавление влияния приливных и термических деформаций земной коры в вариациях сейсмического шума и явля-

ется необходимой процедурой при исследовании его статистических характеристик. Использование ортогонального полинома обеспечивает устойчивость оценки значений тренда в точках отсчетов. При этом порядок полинома (8-ой) был выбран в результате численных экспериментов как наименьший порядок, позволяющий гарантированно устранять суточные и полусуточные вариации на интервалах времени длиной одни сутки.

Важным вопросом дискуссионного характера в применении используемой методики для исследования свойств фоновых низкочастотных шумов является то, что формально частотный диапазон сигналов, записанных сейсмометрическими датчиками, не включает в себя периоды от 2 до примерно 1000 минут, которые фактически исследуются после перехода к шагу по времени 1 минута на временных интервалах длиной одни сутки. Возникает закономерный вопрос о правомерности перехода в столь низкочастотную область записей сейсмического сигнала.

Здесь мы исходим из предположения, что аппаратные ограничения по низкой частоте сигнала (табл. 1) приводятся исключительно для

О СВОЙСТВАХ ПОЛЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ

Таблица 1. Данные о сейсмостанциях, регистрирующей аппаратуре и локальных сейсмогеологических условиях.

Сейсмическая станция	Код станции	Координаты			Аппаратура	Частотный диапазон, Гц	Дата начала записи в базе данных	Характеристика грунтовых условий
		с.ш.	в.д.	h, м				
Авача	AVH	53.264	158.740	942	CMG-6TD	0.033-40	01.01.2012	дисперсный уплотненный (глыбы, щебень, глина)
Беринг	BKI	55.194	165.984	12	CMG-3TB	0.0083-40	01.01.2011	дисперсный уплотненный (глыбы, щебень, дресва)
Дальний	DAL	53.031	158.754	57	CMG-6TD	0.033-40	01.01.2012	скальный, выветрелые сланцы
Институт	IVS	53.066	158.608	160	CMG-3TB	0.0083-40	04.03.2011	дисперсный уплотненный (глыбы, щебень, глина)
Каменская	KMSK	62.467	166.206	40	CMG-6TD	0.033-40	01.01.2011	дисперсный уплотненный мерзлый (щебень, глина)
Карымшина	KRM	52.828	158.131	100	CMG-3TB	0.033-40	16.01.2011	дисперсный уплотненный (глыбы, щебень, глина)
Киришева	KIR	55.953	160.342	1470	CMG-6TD	0.033-40	01.08.2013	дисперсный уплотненный мерзлый, пирокласты с обломками лавы
Ключи	KLY	56.317	160.857	35	KS2000	0.01-40	17.02.2011	дисперсный уплотненный (глыбы, щебень, глина)
Козыревск	KOZ	56.058	159.872	60	CMG-6TD	0.033-40	05.12.2013	дисперсный уплотненный, песчанно-гравийные отложения
Крутоберегово	KBG	56.258	162.713	30	CMG-3TB	0.0083-40	01.01.2011	дисперсный уплотненный (пирокласты)
Оссора	OSS	59.262	163.072	35	CMG-6TD	0.033-40	01.01.2011	дисперсный уплотненный (щебень, глина)
Палана	PAL	59.094	159.968	70	STS-2	0.0083-40	01.01.2011	дисперсный уплотненный (глина)
Паужетка	PAU	51.468	156.815	130	CMG-6TD	0.033-40	01.01.2011	дисперсный уплотненный (глыбы, щебень, глина)
Петропавловск	PET	53.023	158.650	100	STS-1	0.0027-10	01.01.2011	скальный (долериты, кремнистые сланцы)
Северо-Курильск	SKR	50.670	156.116	30	CMG-3TB	0.0083-40	01.01.2011	дисперсный уплотненный (глыбы, щебень, глина)
Тигиль	TIGL	57.765	158.671	115	CMG-6TD	0.033-40	01.03.2014	дисперсный уплотненный, пески с супесчаным заполнителем
Тилички	TL1	60.446	166.145	25	CMG-3TB	0.0083-40	01.01.2011	дисперсный уплотненный мерзлый (щебень, глина)
Тумрок источники	TUMD	55.203	160.399	478	CMG-6TD	0.033-40	01.01.2012	дисперсный уплотненный (глыбы, щебень, глина)
Шипунский	SPN	55.106	160.011	95	CMG-6TD	0.033-40	01.01.2012	дисперсный уплотненный (глыбы, щебень, глина)
Эссо	ESO	55.932	158.695	490	CMG-6TD	0.033-40	01.01.2011	дисперсный уплотненный (глыбы, щебень, глина)

корректного отображения движений грунта при отдельных землетрясениях и количественного определения их параметров. Следует заметить, что разработчиками широкополосной сейсмометрической аппаратуры не рассматривались задачи использования непрерывно регистрируемых сейсмических записей в более широком диапазоне частот, превышающем частоты сигналов от землетрясений, и не предполагалось, что сейсмометрические датчики можно было бы использовать также, как обычный наклономер, то есть регистрировать изменения сигнала в приливной полосе частот. Мы полагаем, что при решении задач геофизического мониторинга и изучения процессов подготовки сильных землетрясений имеется принципиальная возможность более

широкого применения широкополосной сейсмометрической аппаратуры, превышающая формальные ограничения на рабочую полосу частот, которая традиционно используется при изучении отдельных землетрясений.

На рис. 2 представлены графики, иллюстрирующие это соображение. Были взяты самые длинные непрерывные записи сейсмических шумов на 9-ти станциях и осуществлен переход к шагу дискретизации 1 час. Для этого по исходной записи с частотой дискретизации 100 Гц вычислялись средние значения в последовательных интервалах времени длиной 360000 отчетов, что составляет 1 час. Таким образом, обеспечивался выход в частотный диапазон, традиционный для гравиметрии. Если руководствоваться традици-



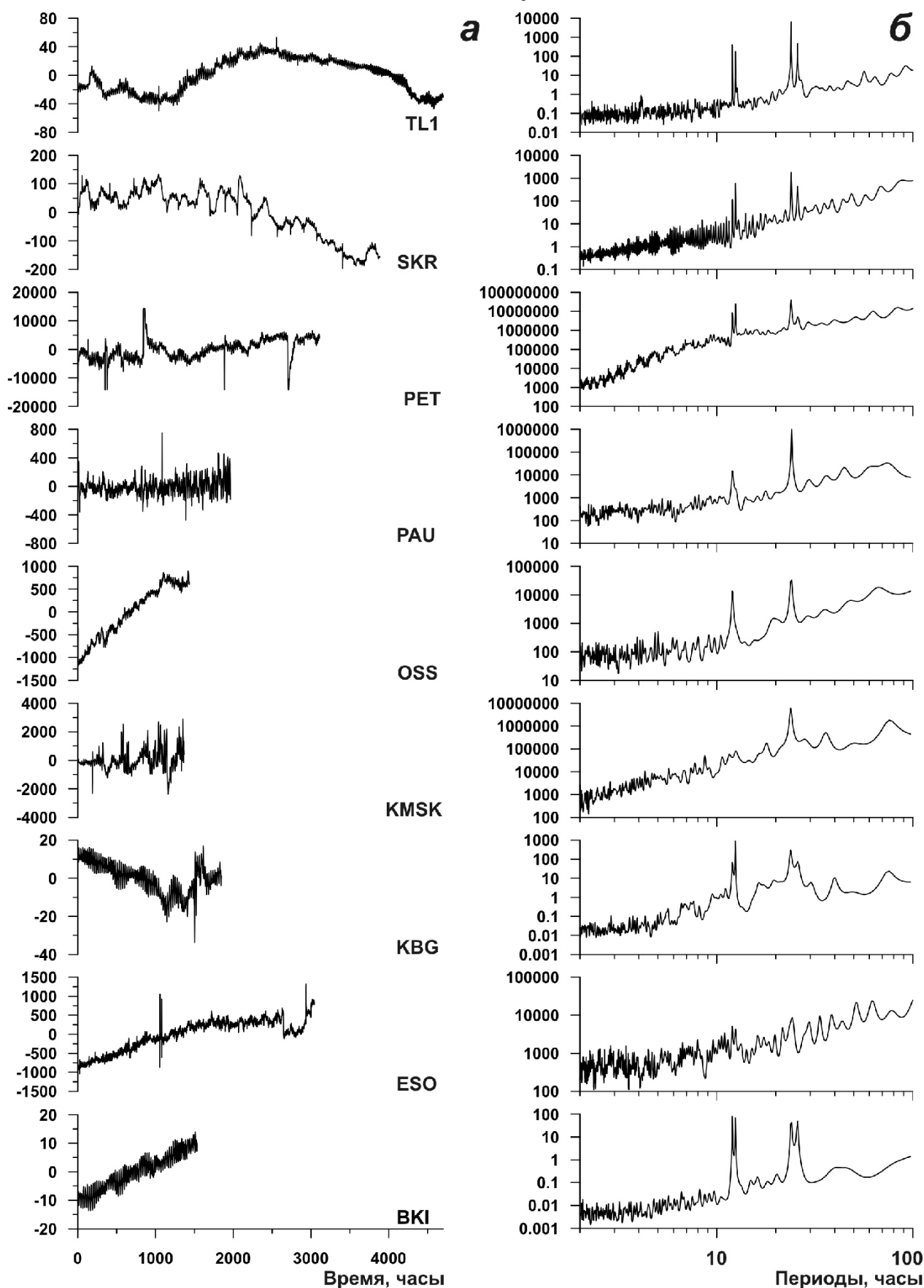


Рис. 2. Фрагменты непрерывных сейсмических записей на девяти станциях Камчатки длиной 58 – 196 суток после перехода к шагу по времени 1 час (а) и оценки соответствующих спектров мощности (б). В левой колонке графиков по осям ординат отложены исходные единицы сейсмических записей, в правой колонке спектральных плотностей – их дисперсии, приходящиеся на шаг по частоте.

онными взглядами на такую процедуру, то переход на часовой шаг дискретизации для сигналов, зарегистрированных сейсмометрическими датчиками, является заведомо неприемлемым. В то же время графики часовых временных рядов на рис. 2а по своему поведению внешне не отличаются от подобных графиков показаний наклономеров. Более того, если оценить спектры мощности часовых вариаций сейсмического шума, зарегистрированного используемой на Камчатке сейсмометрической аппаратурой (табл. 1), то в них проявляются приливные 12 и 24-часовые спектральные пики, причем даже с расщеплением на различные приливные гармоники при достаточной длине временного ряда (исключение составляет станция ESO вследствие техногенной зашумленности сигнала). Спектры часовых записей сейсмического шума представлены на рис. 2б.

Этот пример показывает, что в сигнале, записанном современной широкополосной сейсмометрической аппаратурой, присутствуют низкочастотные компоненты, значительно превосходящие формальные границы, указанные в технических паспортах изготовителя. Именно этими недокументированными и слабо изученными возможностями широкополосных сейсмометров мы воспользовались в данном исследовании.

Следует также отметить, что все используемые статистики шума являются по построению безразмерными и не зависящими от масштабов исходных данных. Это в значительной степени снижает их зависимость от того факта, что на сейсмических станциях установлена различная сейсмометрическая аппаратура (табл. 1).

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СТАТИСТИКИ

*Минимальная нормализованная энтропия вейвлет-коэффициентов шума  $En$ , индекс гладкости волновых форм  $SI$  и вейвлетная спектральная экспонента  $\beta$ .*

Введем в рассмотрение параметр нормализованной энтропии распределения квадратов коэффициентов «наилучшего» ортогонального вейвлета. В отличие от классического Фурье-анализа при обработке сигналов с использованием ортогональных вейвлетов возникает вопрос о выборе базиса. Чаще всего этот вопрос решается с помощью критерия минимума энтропии распределения вейвлет-коэффициентов (Малла, 2005).

Пусть  $c_j^{(k)}$  – вейвлет-коэффициенты анализируемого сигнала  $x(t)$ ,  $t = 1, \dots, L$  – дискретный индекс, нумерующий последовательные отсчеты. Верхний индекс  $k$  является номером уровня детальности ортогонального вейвлет-разложения,

нижний индекс  $j$  нумерует последовательность центров временных интервалов, в окрестности которых вычисляется свертка сигнала с финитными элементами базиса. Использовались 17 ортогональных вейвлетов Добеши: 10 обычных базисов с минимальным носителем с числом обнуляемых от 1 до 10 и 7 так называемых симлетов Добеши (Малла, 2005), с числом обнуляемых моментов от 4 до 10. Для каждого из базисов вычислялась нормализованная энтропия распределения квадратов коэффициентов и находился базис, обеспечивающий минимум энтропии:

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

$$p_j^{(k)} = |c_j^{(k)}|^2 / \sum_{l,j} |c_l^{(k)}|^2$$

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

Число  $N_r$  в формуле (1) равно числу «реальных»

коэффициентов, то есть  $N_r = \sum_{k=1}^m M_k$ . По построению  $0 \leq En \leq 1$ .

Другой характеристикой шума является ее индекс гладкости  $SI$ , который определим как число обнуляемых моментов у оптимального ортогонального вейвлета, найденного из условия минимума величины (1). По построению этот индекс является целым числом, изменяющимся от 1 до 10. Чем выше число обнуляемых моментов базиса, тем он глаже и тем более гладкой является волновая форма шума.

После определения оптимального ортогонального вейвлета можно вычислить средние значения квадратов вейвлет-коэффициентов на каждом уровне детальности:

$$S_k = \sum_{j=1}^{M_k} |c_j^{(k)}|^2 / M_k. \quad (2)$$

Среднее значение (2) квадратов вейвлет-коэффициентов является частью энергии колебаний, соответствующей уровню детальности  $k$ . Иными словами, эта величина может быть рассмотрена как оценка спектра мощности сигнала  $x(t)$  в полосе частот, соответствующих уровню детальности  $k$  (Малла, 2005):

$$[f_{\min}^{(k)}, f_{\max}^{(k)}] = [1 / (2^{(k+1)} \Delta s), 1 / (2^k \Delta s)], \quad (3)$$

где  $\Delta s$  – длина временного интервала дискретизации (в нашем случае  $\Delta s = 1$  мин). Рассмотрим значения периодов, соответствующих центрам частотных полос (3):

$$T_k = 2 / (f_{\min}^{(k)} + f_{\max}^{(k)}) = 2 \Delta s / (2^{-k} + 2^{-(k+1)}). \quad (4)$$

Тогда величины  $S_k = S(T_k)$ ,  $k = 1, \dots, m$  аналогичны обычным Фурье спектрам мощности. Отличие заключается в том, что величины (4) гораздо более гладкие, что удобно при вычислении спектральной экспоненты – наклона графика логарифма спектра мощности в зависимости от логарифма периода. Для вычисления спектральной экспоненты рассмотрим модель:

$$\ln(S(T_k)) = \beta \cdot \ln(T_k) + c + \varepsilon_k, \quad k = 1, \dots, m, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_k$  – последовательность независимых случайных величин с нулевым средним. Параметр  $\beta$  в формуле (5) можно назвать вейвлетной спектральной экспонентой, значение которой может быть найдено методом наименьших ква-

дратов:  $\sum_{k=1}^m \varepsilon_k^2 \rightarrow \min_{\beta, c}$ .

Далее оценки величин  $En$ ,  $SI$  и  $\beta$  и других статистик производились в скользящем временном окне, состоящем из фиксированного числа 1440 соседних минутных отсчетов, что составляет одни сутки. Перед их вычислением производилась операция устранения тренда полиномом 8-го порядка и осуществлялся переход к приращениям. Таким образом, для каждой станции получались временные ряды значений  $En$ ,  $SI$  и  $\beta$  и др. с шагом по времени 1 сутки.

Вейвлетная спектральная экспонента ранее использовалась в работе (Lyubushin, Yakovlev, 2014) для анализа шумовой компоненты GPS сигналов от сети из 1203 датчиков в Японии перед мега-землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г.

*Спектральная нормализованная энтропия  $SpEn$ .*

Величина нормализованной энтропии (1) относится к энтропии распределения энергии на различных временных масштабах (в силу использования финитных ортогональных базисных функций). В то же время можно оценить энтропию в частотной области. Пусть  $S_{xx}(\omega_j)$  – оценка спектра мощности сигнала  $x(t)$ ,  $\omega_j$  – последовательность дискретных значений частот с

шагом  $\Delta\omega$ ,  $\omega_j = (j-1) \cdot \Delta\omega$ ,  $\Delta\omega = 2\pi / (N \cdot \Delta s)$ ,  $j = 1, \dots, N$ . Величины

$$p_j^{(s)} = S_{xx}(\omega_j) / \sum_{k=1}^{N/2} S_{xx}(\omega_k), \quad j = 1, \dots, N/2, \quad (6)$$

можно рассматривать как вероятности распределения энергии в последовательности непересекающихся частотных интервалов длиной  $\Delta\omega$ . Здесь  $N$  – минимальная длина, которая больше или равна длине выборки  $L$ :  $N = 2^n \geq L$ , индекс  $j$  в формуле (6) меняется в пределах до  $N/2$  в силу симметрии спектра мощности вещественных сигналов относительно частоты Найквиста  $\omega_{N/2+1}$ :  $S_{xx}(\omega_{N/2+1-k}) = S_{xx}(\omega_{N/2+1+k})$ ,  $k = 1, \dots, N/2-1$ . Аналогично величине (1) введем спектральную нормализованную энтропию по формуле:

$$SpEn = - \sum_{j=1}^{N/2} p_j^{(s)} \ln(p_j^{(s)}) / \ln(N/2), \quad (7)$$

$$0 \leq SpEn \leq 1$$

Для вычисления оценки спектра мощности  $S_{xx}(\omega_j)$  использовался метод максимальной энтропии (Марпл, 1990) с порядком авторегрессии 144 (10% от длины выборки во временном окне).

Близость нормализованной спектральной энтропии  $SpEn$  к максимальному значению 1 означает, что распределение энергии по частотам близко к равномерному, то есть спектр мощности близок к спектру белого шума.

*Мульти-фрактальные параметры  $\Delta a$  и  $a^*$ .*

Рассмотрим некоторое случайное колебание  $x(t)$  на интервале времени  $[t - \delta/2, t + \delta/2]$  длиной  $\delta$  с центром во временной точке  $t$ . Рассмотрим размах  $\mu(t, \delta)$  случайного колебания на этом интервале, то есть разницу между максимальным и минимальным значениям:

$$\mu(t, \delta) = \max_{t-\delta/2 \leq s \leq t+\delta/2} x(s) - \min_{t-\delta/2 \leq s \leq t+\delta/2} x(s). \quad (8)$$

Если устремить  $\delta \rightarrow 0$ , то  $\mu(t, \delta)$  будет также стремиться к нулю, но здесь важна скорость этого убывания. Если скорость определяется законом  $\delta^{h(t)}$ :  $\mu(t, \delta) \sim \delta^{h(t)}$  при  $\delta \rightarrow 0$ , или если существует

предел  $h(t) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log(\mu(t, \delta))}{\log(\delta)}$ , то величина  $h(t)$  на-

зывается экспонентой Гельдера-Липшица. Если величина  $h(t)$  не зависит от момента времени  $t$ :  $h(t) = const = H$ , то случайное колебание  $x(t)$  называется моно-фрактальным, а величина  $H$  – экспонентой Херста. Если же экспоненты Гельдера-Липшица  $h(t)$  существенно различаются для разных моментов времени  $t$ , то случайное колебание называется мульти-фракталом и для него можно определить понятие спектра сингулярности  $F(\alpha)$  (Федер, 1991). Для этого мысленно выделим множество  $C(\alpha)$  таких моментов времени  $t$ , которые имеют одно и то же

значение  $\alpha$  экспоненты Гельдера-Липшица:  $h(t) = \alpha$ . Множества  $C(\alpha)$  существуют, то есть содержат какие-то элементы и не являются пустыми множествами, не для всех значений  $\alpha$ . То есть существуют некоторые минимальное  $\alpha_{\min}$  и максимальное  $\alpha_{\max}$  такие, что лишь для  $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$  множества  $C(\alpha)$  непустые. Мульти-фрактальный спектр сингулярности  $F(\alpha)$  – это фрактальная размерность множества точек  $C(\alpha)$ . Параметр  $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ , называемый шириной носителя спектра сингулярности, представляется наиболее важной мульти-фрактальной характеристикой. Кроме того, значительный интерес представляет аргумент  $\alpha^*$ , доставляющий максимум

$$F(\alpha^*) = \max_{\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}} F(\alpha),$$

называемый обобщенным показателем Херста. Максимум спектра сингулярности не может превосходить 1 – размерности вмещающего множества или оси времени,  $0 < F(\alpha^*) \leq 1$ , обычно  $F(\alpha^*) = 1$ . Заметим, что для монофрактального сигнала  $\Delta\alpha = 0$ ,  $\alpha^* = H$ .

Детали вычисления мульти-фрактальных статистик шума подробно изложены в работах (Любушин, 2007-2011).

По своему определению  $\Delta\alpha$  является мерой разнообразия случайного поведения сигнала, которая отражает число экспонент Гельдера-Липшица. В простом моно-фрактальном случайном сигнале есть только один показатель Гельдера-Липшица, он же показатель Херста. Поэтому уменьшение  $\Delta\alpha$  является признаком подавления определенных степеней свободы системы, генерирующей изучаемый сигнал, и уменьшения их числа.

*Отношение квантилей QR.*

Эта характеристика была введена в работе (Lyubushin et al., 2014). Пусть  $\Delta x$  – отклонение волновой формы шума от подогнанного полиномиального тренда на некотором временном фрагменте. Пусть  $F(c) = \text{Prob}(|\Delta x| < c)$  – эмпирическая функция распределения абсолютных величин  $|\Delta x|$ , которая вычисляется с помощью вариационного ряда (результата сортировки величин  $|\Delta x|$ ). Пусть  $Q_\beta$  – квантиль эмпирической функции распределения, который определяется как минимальный корень уравнения  $F(Q_\beta) = \beta$ ,  $0 < \beta < 1$ . Определим отношение квантилей по формуле:

$$QR = (Q_{0.75} - Q_{0.25}) / Q_{0.50} - 1. \tag{9}$$

Эту статистику можно рассматривать как простую меру отклонения распределения значений  $|\Delta x|$  от равномерного распределения, для которого  $QR = 0$ .

*Индекс линейной предсказуемости  $\rho$ .*

Индекс линейной предсказуемости был

введен в работе (Любушин, 2010а), см. также (Lyubushin, 2012). Рассмотрим величину:  $\rho = V_0 / V_{AR} - 1$ . Здесь  $V_0$  – дисперсия ошибки  $\varepsilon_0(t+1)$  тривиального прогноза  $\hat{x}_0(t+1)$  на 1 шаг вперед для приращений  $x(t)$  сигналов, который равен среднему по предыдущему «малому» временному окну длиной  $n$  отсчетов:

$$\hat{x}_0(t+1) = \sum_{s=t-n+1}^t x(s) / n.$$

Таким образом,  $\varepsilon_0(t+1) = x(t+1) - \hat{x}_0(t+1)$ , а

$$V_0 = \sum_{t=n+1}^N \varepsilon_0^2(t) / (N - n),$$

где  $N > n$  – число отсчетов в последовательных «больших» временных фрагментах. Величина  $V_{AR}$  вычисляется по аналогичной формуле  $V_{AR} = \sum_{t=n+1}^N \varepsilon_{AR}^2(t) / (N - n)$ , в

которой  $\varepsilon_{AR}(t+1) = x(t+1) - \hat{x}_{AR}(t+1)$  – ошибка

линейного прогноза  $\hat{x}_{AR}(t+1)$  на 1 шаг вперед с помощью модели авторегрессии 2-го порядка (AR-прогноз), коэффициенты которой оцениваются также по предыдущему «малому» временному окну длиной  $n$  отсчетов. То есть, рассматривается модель:

$$x(t) + a_1 \cdot x(t-1) + a_2 \cdot x(t-2) = e(t) + d, \tag{10}$$

в которой вектор  $c = (a_1, a_2, d)^T$  является вектором неизвестных параметров, определяемых по скользящему «малому» окну длиной  $n$  отсчетов из условия минимума суммы квадратов невязок  $e(t)$ . Введем вектор  $Y(t) = (-x(t-1), -x(t-2), 1)^T$ . Тогда авторегрессионную модель можно коротко записать в виде:  $x(t) = c^T \cdot Y(t) + e(t)$ . Для вычисления прогноза на шаг вперед  $\hat{x}_{AR}(t+1)$  найдем вектор  $c$  из условия минимума суммы квадратов невязок  $e(t)$  по предыдущим  $n$  отсчетам:

$$\sum_{\lambda=t-n+3}^t e^2(\lambda) = \sum_{\lambda=t-n+3}^t (x(\lambda) - c^T Y(\lambda))^2 \rightarrow \min_c,$$

откуда можно получить формулы для оценки методом наименьших квадратов вектора параметров и прогноза на 1 шаг вперед:

$$\hat{c}(t) = A^{-1}(t) \cdot R(t), \quad A(t) = \sum_{\lambda=t-n+3}^t Y(\lambda) \cdot Y^T(\lambda), \quad R(t) = \sum_{\lambda=t-n+3}^t x(\lambda) \cdot Y(\lambda), \tag{11}$$

$$\hat{x}_{AR}(t+1) = x(t+1) - \hat{c}^T(t) \cdot Y(t)$$

Выбор 2-го порядка авторегрессии обусловлен тем, что этот порядок – минимальный для AR-модели, при котором описывается колебательное движение и допускается положение максимума спектральной плотности в значениях частот между частотой Найквиста и нулевой



(Бокс, Дженкинс, 1974; Кашьяп, Рао, 1983). Переход к приращениям связан с необходимостью избавления от доминирования низких частот (приливной компоненты и прочих трендов). AR-прогноз использует свойство коррелированности соседних значений приращений записей и, если она имеет место, то  $V_{AR} < V_0$  и  $\rho > 0$ .

Ниже при вычислении индекса линейной предсказуемости  $\rho$  для 1-минутных данных оценки производились в последовательных «длинных» временных окнах длиной  $N = 1440$  отсчетов (1 сутки) и при «коротком» окне длиной  $n = 60$  отсчетов (1 час). Аналогично всем рассмотренным выше статистикам волновых форм шума получался временной ряд значений индекса  $\rho$  с шагом по времени 1 сутки для каждой станции.

### ПОСТРОЕНИЕ КАРТ

Для каждой станции были получены ежесуточные оценки 8-ми параметров шума:  $E_n$ ,  $SI$ ,  $\beta$ ,  $SpEn$ ,  $\Delta\alpha$ ,  $\alpha^*$ ,  $QR$  и  $\rho$ . Это позволяет строить карты распределения каждого параметра по пространству ежедневно.

Чтобы получить такие карты, прямоугольная область, включающая в себя все станции, покрывалась равномерной сеткой узлов. Далее каждому узлу с двойным целочисленным индексом  $(i, j)$ , где  $i$  – количество узлов в направлении изменения долготы,  $j$  – количество узлов в направлении изменения широты, сопоставлялись значения рассмотренных параметров шума, равные медианам по заданному числу сейсмических станций, наиболее близких к рассматриваемому узлу. Все карты были получены как совокупность медиан параметров в узлах равномерной сетки из  $50 \times 50$  узлов, покрывающей прямоугольную область с широтами от  $50^\circ$  до  $64^\circ$  с. ш. и долготами от  $155^\circ$  до  $168^\circ$  в.д., от трех ближайших к каждому узлу станций. Если усреднить ежедневные карты по всем дням внутри заданного интервала времени, то получаются усредненные карты, характеризующие особенности изменения отдельных параметров по пространству за соответствующий интервал времени. Анализ совокупности карт распределения рассматриваемого набора статистик для одного и того же интервала времени и их изменчивости позволяет проследивать главные особенности поля низкочастотного шума.

Следует отметить, что информационная значимость таких карт убывает по мере удаления положения узлов сетки карты от мест размещения сейсмических станций. Это является общей проблемой для методов геостатистики, когда приходится экстраполировать данные из точек измерений в области, где измерения отсутствуют. Вопрос об оценках надежности, вычислении ошибок и доверительных интервалов является

одним из наиболее сложных в статистике и было бы правильным сопровождать карты распределения статистик шума картами распределения стандартного отклонения (ошибки) их определения. Однако рассмотрение таких методов выходит далеко за рамки настоящей статьи. Вместе с тем необходимо учитывать, что чем дальше от пунктов измерений шума находится рассматриваемая область, тем меньше надежность значений, представленных на карте, и тем больше их ошибка. Это создает определенные сложности при выработке сейсмопрогностических заключений. С другой стороны, это является обычной практикой при решении задач прогнозирования землетрясений, когда выводы и прогнозные заключения приходится делать на основании тех данных, которые имеются в наличии, а не тех, которые должны были бы быть в идеальной ситуации, то есть в данном случае при наличии сейсмических станций на океаническом дне.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Карты распределения параметров волновых форм шума, усредненных за все время наблюдений (4 года), приводятся на рисунках 3 и 4. На рис. 3 сгруппированы карты, которые имеют минимум значений параметров в акватории Тихого океана, примыкающей к центральной части п-ова Камчатка. На рис. 4 представлены карты параметров, имеющих в той же области максимальные значения. Несмотря на принципиально разные способы вычисления параметров шума, эти карты хорошо коррелированы между собой, на них выделяется одна и та же область пониженных (рис. 3) или повышенных (рис. 4) значений. Как следует из результатов исследования поля сейсмических шумов в Японии (Любушин, 2012, 2013а; Lyubushin, 2012-2014), области минимальных средних значений ширины носителя мульти-фрактального спектра сингулярности  $\Delta\alpha$  и области максимальных средних значений минимальной нормированной энтропии квадратов вейвлет-коэффициентов  $En$  выделяют области повышенной сейсмической опасности, в которых могут происходить сильнейшие землетрясения. Исходя из такой интерпретации, можно выдвинуть гипотезу о повышенной сейсмической опасности в районе северной части Камчатского фрагмента зоны субдукции Тихоокеанской океанической плиты под Евразийскую континентальную плиту. Именно этот район, характеризующийся минимальными значениями параметров шума на картах на рис. 3, совпадающими с зонами максимальных значений параметров на рис. 4, может быть выделен как наиболее сейсмически опасная область.

Для того, чтобы проследить изменения

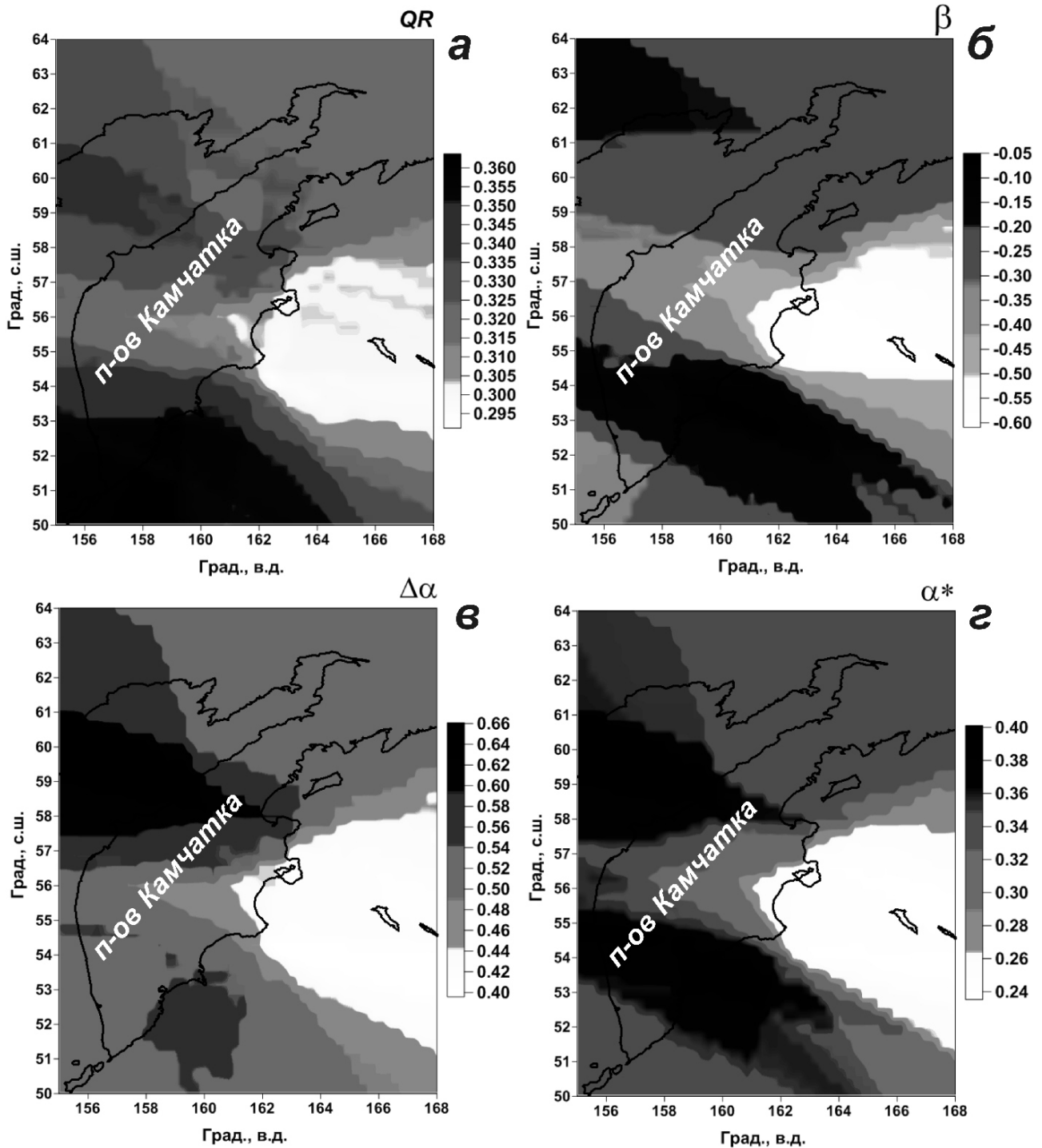


Рис. 3. Усредненные карты распределения значений отношения кватилей модуля приращений волновых форм  $QR$  (а), вейвлетной спектральной экспоненты  $\beta$  (б), ширины носителя мульти-фрактального спектра сингулярности  $\Delta\alpha$  (в) и обобщенного показателя Херста  $\alpha^*$  (г) за 48 месяцев наблюдений, с 01 января 2011 по 31 декабря 2014 гг.

параметров во времени можно использовать совокупность карт, усредненных для последовательных временных интервалов меньшей длины, например, полгода или квартал. Однако такой способ прослеживания эволюции поля шумов сильно увеличивает объем представляемой информации. Поэтому в дополнение к нему был использован другой способ оценивания дина-

мики изменения параметров шума во времени. Для этого были вычислены последовательности усредненных карт рассматриваемых параметров шума в скользящем временном окне длиной 30 суток с минимальным смещением 1 сутки. Далее в узлах регулярной сетки на каждой такой карте были найдены минимальные ( $Z_{\min}$ ), средние ( $Z_{\text{mean}}$ ) и максимальные ( $Z_{\max}$ ) значение каждой из

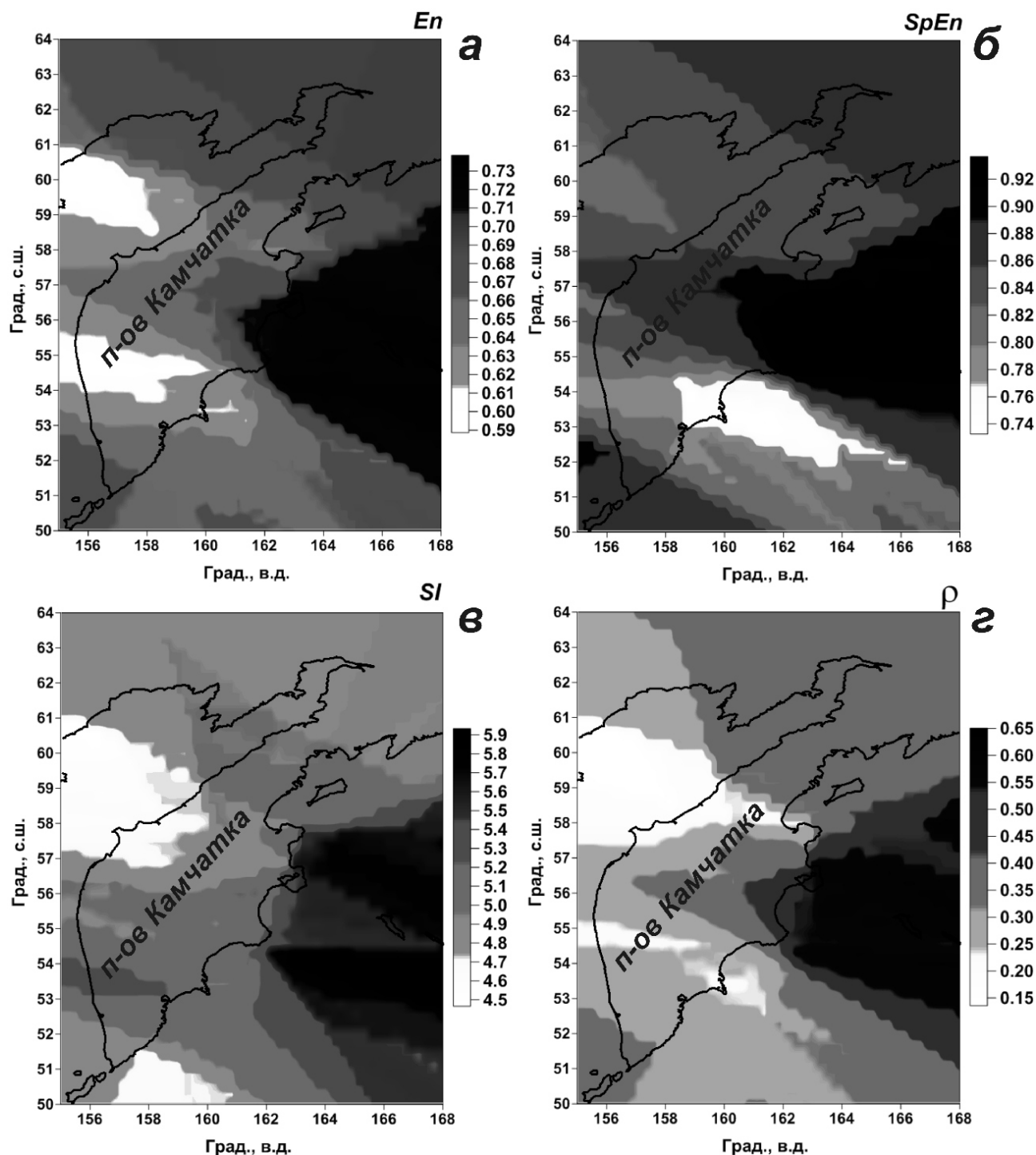


Рис. 4. Усредненные карты распределения значений минимальной нормализованной энтропии квадратов вейвлет-коэффициентов  $En$  (а), нормированной спектральной энтропии  $SpEn$  (б), индекса гладкости  $SI$  (в) и индекса линейной предсказуемости  $\rho$  (г) за 48 месяцев наблюдений, с 01 января 2011 г. по 31 декабря 2014 г.

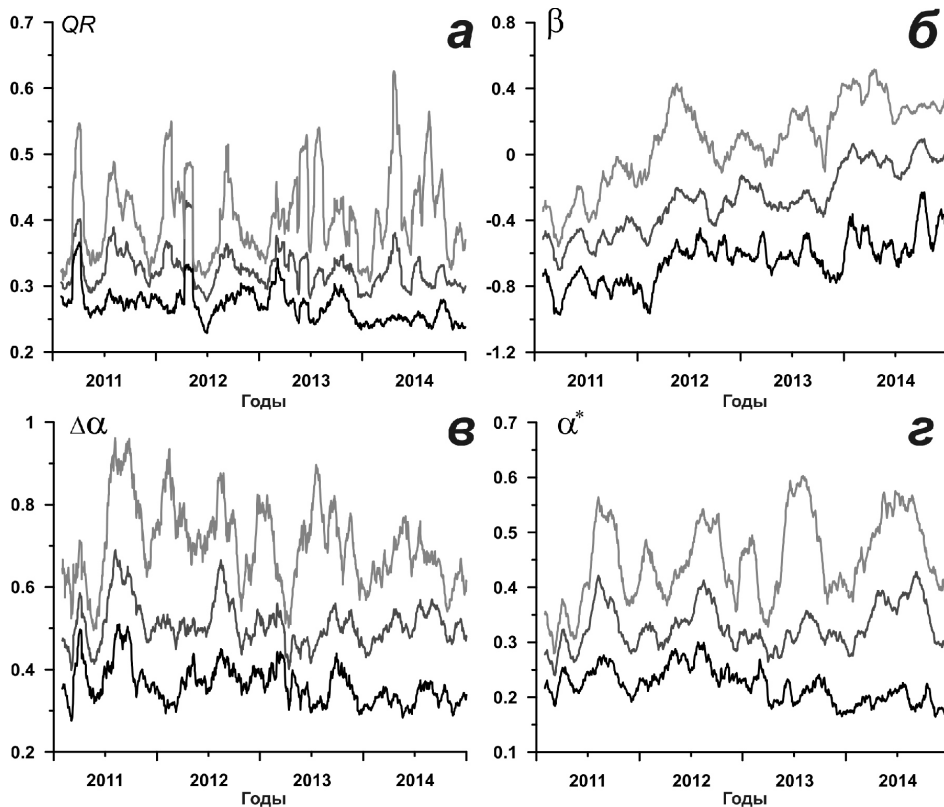
статистик шума, представленных на рис. 3 и 4.

Оценка  $Z_{\min}$ ,  $Z_{\text{mean}}$  и  $Z_{\max}$  в узлах решетки с индексами  $(i, j)$  и величинами статистик в узлах  $Z_{ij}$ , где  $1 \leq i \leq N_1$ ,  $1 \leq j \leq N_2$ , где  $N_1, N_2$  – числа узлов по широте и долготе, производилась как  $Z_{\min} = \min_{(i,j)} Z_{ij}$ ,

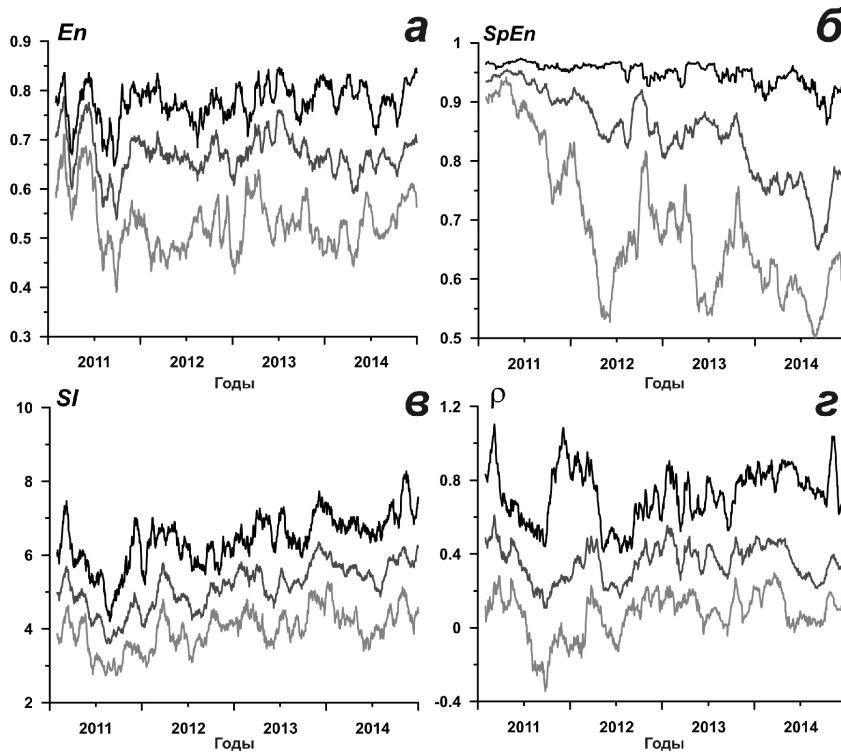
$$Z_{\max} = \max_{(i,j)} Z_{ij}, \quad Z_{\text{mean}} = \sum_{(i,j)} Z_{ij} / (N_1 \cdot N_2). \text{ Соответ-}$$

ствующие графики приводятся на рис. 5 и 6.

Исходя из предложенной интерпретации исследуемых параметров шума, на рис. 5 особое внимание следует уделить графикам изменения минимальных значений  $Z_{\min}$ , а на рис. 6 – графикам изменения максимальных значений  $Z_{\max}$ . Именно по таким графикам можно давать динамическую оценку изменчивости сейсмической опасности на Камчатке.



**Рис. 5.** Графики максимального, среднего и минимального значений отношения кватертилей модуля приращений волновых форм  $QR$  (а), вейвлетной спектральной экспоненты  $\beta$  (б), ширины носителя мульти-фрактального спектра сингулярности  $\Delta\alpha$  (в) и обобщенного показателя Херста  $\alpha^*$  (г) в узлах регулярной сетки для усредненных карт, вычисленных в скользящем временном окне длиной 30 суток в зависимости от положения правого конца временного окна. Оценка трендов сейсмической опасности представлена графиками минимальных значений.



**Рис. 6.** Графики максимального, среднего и минимального значений минимальной нормированной энтропии квадратов вейвлет-коэффициентов  $En$  (а), нормированной спектральной энтропии  $SpEn$  (б), индекса гладкости  $SI$  (в) и индекса линейной предсказуемости  $\rho$  (г) в узлах регулярной сетки для усредненных карт, вычисленных в скользящем временном окне длиной 30 суток в зависимости от положения правого конца временного окна. Оценка трендов сейсмической опасности представлена графиками максимальных значений.



Рассмотрим изменения параметров шума в связи с сильными землетрясениями, произошедшими на Камчатке за время наблюдений. На рис. 1 показаны эпицентры сейсмических событий с  $M_w \geq 6.5$  (табл. 2) в круговой области радиусом 500 км с центром в точке с координатами  $55^\circ$  с.ш.,  $159^\circ$  в.д.

Сейсмические события (табл. 2) произошли на интервале времени с ноября 2012 по октябрь 2013 гг. в южной части Камчатской сейсмофокальной зоны. Среди них можно выделить землетрясение 28 февраля с  $M_w=6.9$  (№ 2 в табл. 2), являющееся наиболее сильным событием в пределах южного фрагмента Камчатской сейсмофокальной зоны за последние 14 лет (Чебров и др., 2013б), и сильнейшее ( $M_w=8.3$ ) Охотоморское землетрясение 24 мая (№ 4 в табл. 2), произошедшее на глубине 600 км (Чебров и др., 2013в).

Изменения величин  $Z_{min}$  параметров  $QR$ ,  $\beta$ ,  $\Delta\alpha$  и  $\alpha^*$  в сопоставлении с произошедшими сейсмическими событиями (табл. 2) приводится на рис. 7. На рис. 8 приведены аналогичные графики  $Z_{max}$  для параметров  $En$ ,  $SpEn$ ,  $Sl$  и  $\rho$ . Как следует из этих рисунков, выраженные предвестниковые эффекты в поведении временных рядов  $Z_{min}$  и  $Z_{max}$  для всех восьми статистик шума перед отдельными сильными землетрясениями, а также и перед их совокупностью, не прослеживаются.

## ОБСУЖДЕНИЕ

*Физические предпосылки сейсмопрогностической информативности предложенных статистик шума.* Физические принципы, лежащие в основе использования критериев минимальной нормализованной энтропии и ширины носителя спектра сингулярности для выделения сейсмически опасных регионов, основаны на предположении о консолидации малых блоков земной коры во временную структуру больших размеров, которая становится способной накопить энергию для крупного сейсмического события.

На рис. 9 приводится сравнение волновых форм низкочастотного шума, которое иллюстрирует это соображение. Низкие значения нормализованной энтропии (рис. 9а) обусловле-

ны большим числом низкочастотных выбросов, проявляющихся в записи сейсмического сигнала на широкополосной аппаратуре. Такие выбросы могут быть связаны с взаимными движениями относительно малых неконсолидированных блоков земной коры.

Высокие значения нормализованной энтропии (рис. 9б) можно связывать с повышенной консолидацией малых блоков земной коры и, как следствие этого, малым числом высокоамплитудных вариаций шума. Формирование крупного консолидированного блока означает потерю разнообразия передаточных и резонансных свойств среды. А это приводит к тому, что параметр  $\Delta\alpha$  уменьшается, происходит потеря мультифрактальности временных рядов шума.

Кроме этого, пониженные значения отношения квартилей  $QR$  и повышенные значений спектральной энтропии  $SpEn$ , наблюдаемые в той же области, где фиксируются минимальные значения  $\Delta\alpha$  и максимальные значения энтропии вейвлет-коэффициентов  $En$  (рис. 3, рис. 4), независимо подтверждают гипотезу об упрощении структуры шума и его приближении по свойствам к «белому шуму» в областях потенциальной сейсмической опасности.

*О потенциальной сейсмической опасности в районе Камчатки и свойствах параметров шума.* Анализ данных по вариациям параметров шума за четырехлетний период наблюдений на Камчатке (рис. 3, рис. 4), а также опыт изучения признаков подготовки сильнейших землетрясений Японии 2003-2011 гг. в их изменениях, позволяет выделить северную часть Камчатской сейсмофокальной зоны в диапазоне широт  $55-58^\circ$  с. ш. как наиболее опасную для возникновения одного или нескольких сильнейших ( $M \geq 7.5-8.0$ ) землетрясений. Вместе с тем, оценка времени возникновения таких сейсмических событий в этом районе не представляется возможной из-за недостаточной изученности свойств поля низкочастотных шумов и их вариаций в связи с возникновением таких землетрясений в Камчатском регионе.

Ретроспективное рассмотрение временных вариаций шумовых параметров в 2011-2014 гг. не выявило их значимых изменений на стадиях

**Таблица 2.** Данные о землетрясениях с  $M_w \geq 6.5$  (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes>).

Номер землетрясения	Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс	Координаты		Глубина, км	Магнитуда, $M_w$
			град., с.ш.	град., в.д.		
1	16.11.2012	18:12:39	49.280	155.425	29	6.5
2	28.02.2013	14:05:50	50.942	157.339	41	6.9
3	01.03.2013	13:20:50	50.949	157.448	29	6.5
4	24.05.2013	05:44:49	54.874	153.281	609	8.3
5	01.10.2013	03:38:21	53.199	152.786	573	6.7

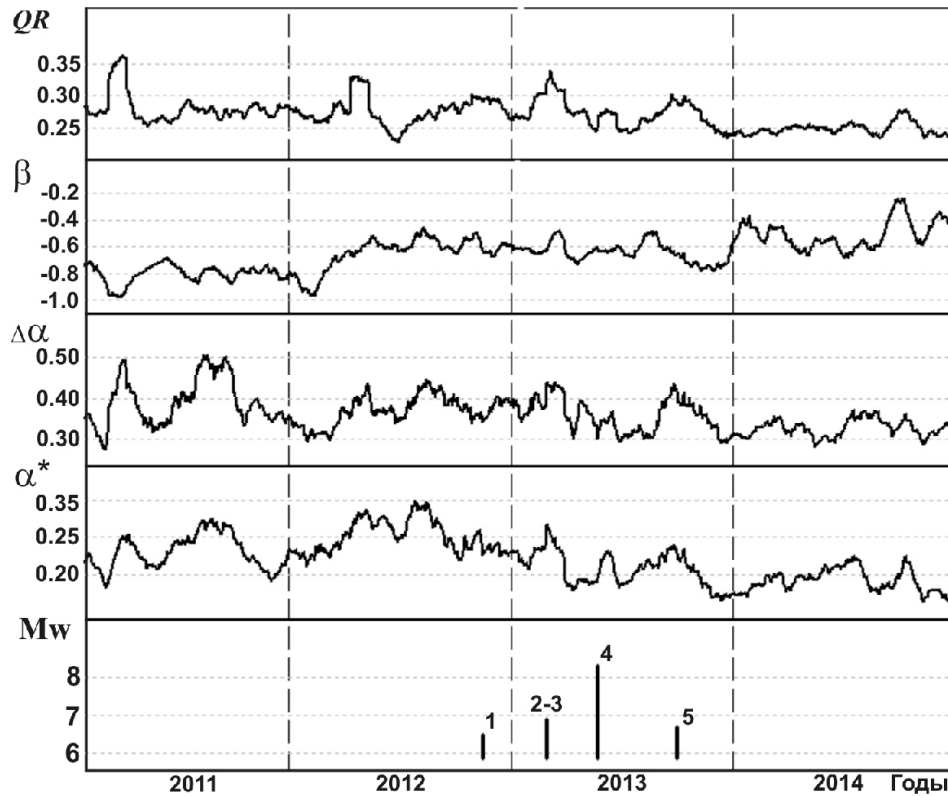


Рис. 7. Изменения минимальных значений отношения квантилей модуля приращений волновых форм  $QR$ , вейвлетной спектральной экспоненты  $\beta$ , ширины носителя мульти-фрактального спектра сингулярности  $\Delta\alpha$  и обобщенного показателя Херста  $\alpha^*$  в узлах регулярной сетки для усредненных карт, вычисленных в скользящем временном окне длиной 30 суток с шагом один сутки в сопоставлении с произошедшими землетрясениями с  $Mw \geq 6.5$  (табл. 2).

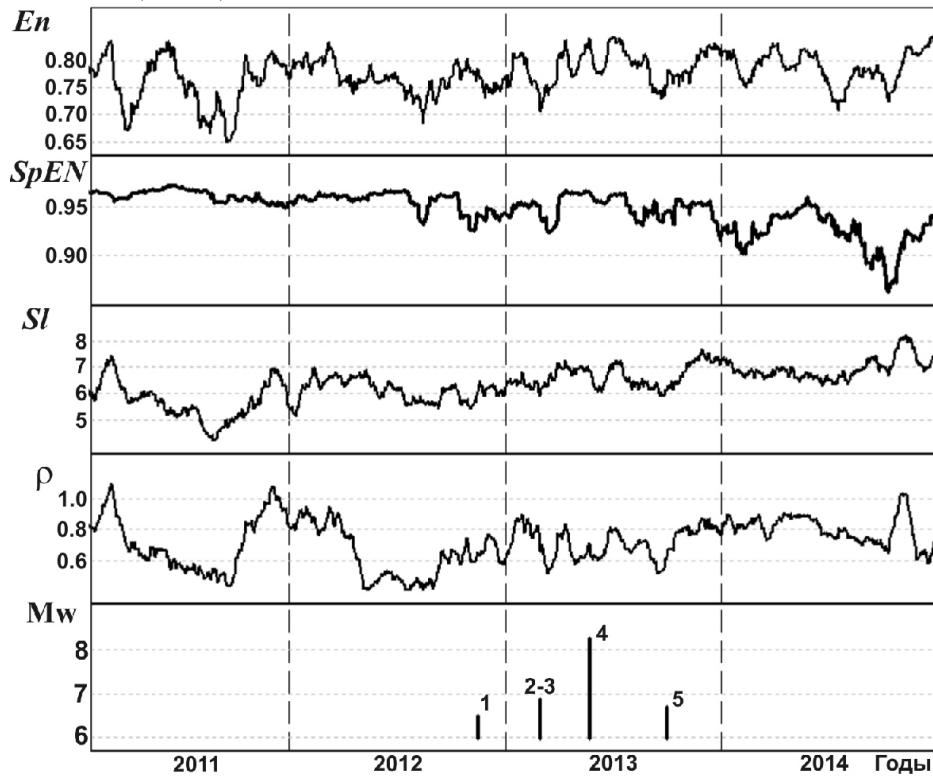
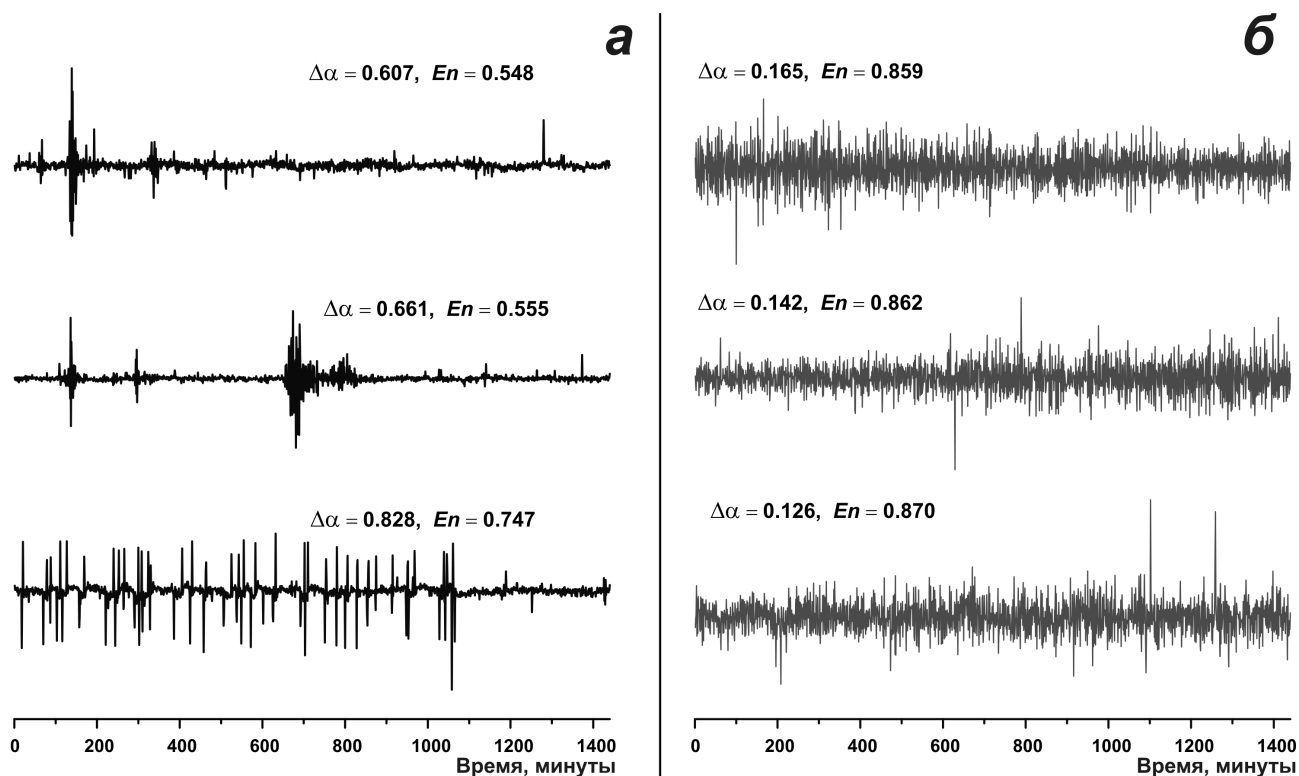


Рис. 8. Изменения максимальных значений минимальной нормированной энтропии квадратов вейвлет-коэффициентов  $En$ , нормированной спектральной энтропии  $SpEn$ , индекса гладкости  $SI$  и индекса линейной предсказуемости  $\rho$  в узлах регулярной сетки для усредненных карт, вычисленных в скользящем временном окне длиной 30 суток с шагом один сутки в сопоставлении с произошедшими землетрясениями с  $Mw \geq 6.5$  (табл. 2).



**Рис. 9.** Сравнение волновых форм шума длиной 1 сутки после перехода к шагу по времени 1 минута и устранения приливных трендов на примере станции Тилички (TL1): *а* – высокие значения  $\Delta\alpha$  и низкие значения нормализованной энтропии  $En$ ; *б* – низкие значения  $\Delta\alpha$  и высокие значения нормализованной энтропии  $En$ .

подготовки наиболее сильных из произошедших землетрясений (рис. 7, рис. 8). Это может быть обусловлено, в первую очередь, недостатками конфигурации сети и малым количеством сейсмостанций на Камчатке, особенно в районах Южной Камчатки (рис. 1). Также следует отметить, что очаги сильных землетрясений 2013 г., располагались на расстояниях, составляющих первые сотни и более км от станций. При этом наиболее сильное землетрясение 24 мая 2013 г.,  $M_w = 8.3$  являлось мантийным (табл. 2).

Таким образом, вопрос о проявлении процессов подготовки коровых землетрясений с  $M_w = 6.5-6.9$  и сильнейших мантийных землетрясений в вариациях параметров шумового поля и возможности прогнозирования таких событий с использованием представленной технологии при существующей системе наблюдений за параметрами шума пока является открытым. Вместе с тем, при развитии сети широкополосных сейсмостанций на территории Камчатского края и на сопредельных территориях, существенном увеличении их числа и при совершенствовании структуры сети с учетом решения сейсмопрогностических задач с использованием данных по сейсмическим шумам, можно будет вернуться к этому важному в методическом и практическом плане вопросу.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты №№ 12-05-00146, 15-05-00414 и Министерства образования и науки Российской Федерации (в соответствии с требованием государственного контракта №14.577.21.0109).

#### Список литературы

- Бокс Дж., Дженкинс Г.* Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974. Кн. 1. 406 с.
- Касимова В.А., Копылова Г.Н.* Спектральная структура низкочастотного сейсмического шума на широкополосных станциях Камчатки // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Четвертой научно-техн. конф. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 64-68.
- Кашьяп Р.Л., Рао А.Р.* Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным. М.: Наука, 1983. 384 с.
- Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
- 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.* Мультифрактальные статистики региональных и глобальных полей низкочастотных микросейсм // *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России*. Тр. Второй научно-техн. конф. Петропавловск-Камчатский. 11-17 октября 2009 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН. 2010а. С. 186-190.
- Любушин А.А.* Статистики временных фрагментов низкочастотных микросейсм: их тренды и синхронизация // *Физика Земли*. 2010б. № 6. С. 86-96.
- Любушин А.А.* Кластерный анализ свойств низкочастотного микросейсмического шума // *Физика Земли*. 2011. № 6. С. 26-34.
- Любушин А.А.* Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсмам // *Геофизические процессы и биосфера*. 2011. Т. 10. № 1. С. 9-35.
- Любушин А.А.* Прогноз Великого Японского землетрясения // *Природа*. 2012. № 8. С. 23-33.
- Любушин А.А.* Карты линейной синхронизации свойств глобального поля низкочастотных сейсмических шумов // *Геофизические исследования*. 2013. Т. 14. № 1. С. 41-53.
- Любушин А.А.* Карты свойств низкочастотных микросейсм для оценки сейсмической опасности // *Физика Земли*. 2013. № 1. С. 11-20.
- Любушин А.А.* Анализ когерентности глобального сейсмического шума, 1997-2012 // *Физика Земли*. 2014. № 3. С. 18-27.
- Любушин А.А., Копылова Г.Н., Касимова В.А., Таранова Л.Н.* Мульти-фрактальные характеристики сейсмического шума на Камчатке, 2011-2013 гг. // *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России*. Тр. Четвертой научно-техн. конф. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 382-386.
- Любушин А.А., Соболев Г.А.* Мультифрактальные меры синхронизации микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // *Физика Земли*. 2006. № 9. С. 18-28.
- Малла С.* Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 671 с.
- Марпл С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
- Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // *Исследования по физике землетрясений*. М.: Наука, 1976. С. 9-27.
- Соболев Г.А., Любушин А.А.* Микросейсмические импульсы как предвестники землетрясений // *Физика Земли*. 2006. № 9. С. 5-17.
- Соболев Г.А., Любушин А.А.* Микросейсмические аномалии перед землетрясением 26 декабря 2004 года на Суматре // *Физика Земли*. 2007. № 5. С. 3-16.
- Соболев Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А.* Асимметричные импульсы, периодичности и синхронизация низкочастотных микросейсм // *Вулканология и сейсмология*. 2008. № 2. С. 135-152.
- Соболев Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А.* Синхронизация микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // *Физика Земли*. 2005. № 8. С. 3-27.
- Федер Е.* Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с.
- Чебров В.Н.* Региональная система сейсмического мониторинга // *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России*. Тр. Четвертой научно-техн. конф. Обнинск: ГС РАН. 2013. С. 8-15.
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // *Вулканология и сейсмология*. 2013а. № 1. С. 18-40.
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А. и др.* Сильное землетрясение 28.02.2013 г. у юго-восточного побережья Камчатки с магнитудой  $M_w=6.8$  по данным оперативной обработки // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2013б. № 1. Вып. 21. С. 9-16.
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А. и др.* 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. Науки о Земле*. 2013в. № 1. Вып. 21. С. 17-24.
- Berger J., Davis P., Ekstrom G.* Ambient Earth Noise: A survey of the Global Seismographic Network // *JGR*. 2004. V. 109. P. 11307.
- Lyubushin A.A.* Multifractal Parameters of Low-Frequency Microseisms / V. de Rubeis et al. (eds.). Synchronization and Triggering: from Fracture to Earthquake Processes. GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences 1. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2010. Chapter 15. P. 253-272.
- Lyubushin A.* Prognostic properties of low-frequency seismic noise // *Natural Science*. 2012. V. 4. № 8A. P. 659-666.
- Lyubushin A.* Spots of Seismic Danger Extracted by Properties of Low-Frequency Seismic Noise. European Geosciences Union General Assembly 2013. Vienna. 07-12 of April. 2013. Geophysical Research Abstracts. 2013. V. 15. EGU 2013-1614.
- Lyubushin A.* How soon would the next mega-earthquake occur in Japan // *Natural Science*. 2013. V. 5. № 8 A1. P. 1-7.
- Lyubushin A.A.* Dynamic estimate of seismic danger based on multifractal properties of low-frequency



- seismic noise // *Natural Hazards*. January 2014. V. 70. Iss. 1. P. 471-483.
- Lyubushin A., Kalab Z., Lednicka M.* Statistical properties of seismic noise measured in underground spaces during seismic swarm // *Acta Geodaetica et Geophysica*. June 2014. V. 49. Iss. 2. P. 209-224.
- Lyubushin A., Yakovlev P.* Properties of GPS noise at Japan islands before and after Tohoku mega-earthquake // *SpringerPlus (Open Access Journal)*. 2014. 3:364 doi:10.1186/2193-1801-3-364.
- Tanimoto T., J.Um, K.Nishida, and N.Kobayashi.* Earth's continuous oscillations observed on seismically quiet days // *Geophys. Res. Lett.* 1998. 25. P. 1553-1556.
- Tanimoto T.* Continuous Free Oscillations: Atmosphere-Solid Earth Coupling // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2001. 29:563//84.
- Tanimoto T.* The oceanic excitation hypothesis for the continuous oscillations of the Earth // *Geophys. J. Int.* 2005. 160:276//288.

## THE PROPERTIES OF FIELDS OF LOW FREQUENCY NOISE FROM THE NETWORK OF BROADBAND SEISMIC STATIONS IN KAMCHATKA

A.A. Lyubushin<sup>1</sup>, G.N. Kopylova<sup>2</sup>, V.A. Kasimova<sup>2</sup>, L.N. Taranova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Physics of the Earth Russian Academy of Science*

<sup>2</sup>*Kamchatka Branch of Geophysical Service Russian Academy of Science*

The article presents the results of the development of new technology for seismic hazard estimate in Kamchatka using prognostic properties of the low-frequency noise recorded at the broadband network stations. The article shows the description of the algorithms for obtaining of 8 statistical parameters, which characterize the spatial and temporal variability of the noise field and provides the discussion of their application to the prediction of strong earthquakes with magnitudes  $M \geq 7.5$ . Two methods of data presentation are described: 1 — in the form of maps with the spatial and temporal distribution of noise statistics; 2 — a new method of dynamic estimate of seismic hazard in Kamchatka by plotting monthly minimum, average and maximum values of the noise statistics. According to the observations over the period 2011-2014, the central part of the Kamchatka seismic focal zone in the latitude range 55-58° is revealed to be the most potential for one or more earthquakes with  $M \geq 7.5-8.0$ .

*Keywords: earthquake forecast, low-frequency noise, time series, earthquakes, Kamchatka.*