

УДК 550.34

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ СИЛЬНЫХ ($M \geq 6.0$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ И АЛЕУТСКОЙ ОСТРОВНЫХ ДУГ

© 2023 г. А. А. Коновалова^a, *, В. А. Салтыков^a

^aКамчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая Геофизическая Служба РАН”,
бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

*e-mail: seismo@emsd.ru

Поступила в редакцию 06.09.2022 г.

После доработки 26.04.2023 г.

Принята к публикации 04.09.2023 г.

Дано описание поведения ряда сейсмических предвестников перед активизацией 2016–2019 гг. в районе с тектонически сложной геодинамической обстановкой на границах Тихоокеанской, Северо-Американской и Евразийской литосферных плит. С целью уточнения местоположения возможных очагов будущих сильных землетрясений рассмотрен комплексный подход применения выделяемых предвестников: затиший по параметру RTL и “Z-функция”, вариаций наклона графика повторяемости γ и площади сейсмогенных разрывов dS . Впервые применительно к Камчатке для аномалий по параметру dS , интерпретируемых как сейсмические активизации, показано наличие прогнозной составляющей до начала форшоковой активизации на примере увеличения его значений перед событиями, являющимися сильнейшими для районов расположения их очаговых областей: Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. $M_w = 7.8$ и землетрясения Угловое Поднятия 20.12.2018 г. $M_w = 7.3$. Общая протяженность аномальной области, существующей в настоящее время и включающей последовательные стадии затиший и форшоковых активизаций, составляет ~900 км, что допускает возможность возникновения в зоне сочленения трех литосферных плит нового сильнейшего землетрясения с магнитудой, превышающей все ранее зарегистрированные в этом районе.

Ключевые слова: сейсмичность, мониторинг, Камчатка, землетрясения, форшок, предвестники

DOI: 10.31857/S0203030623700323, **EDN:** AZDSHI

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в местах взаимодействия тектонических плит локализованы масштабные и яркие проявления геодинамических процессов: сильнейшие катастрофические землетрясения, цунами, извержения вулканов, и одним из таких районов является Камчатка. Здесь не раз происходили сильные разрушительные землетрясения [Гусев, 2004; Гусев, Шумилина, 2004].

В настоящее время, как одно из мест, представляющих потенциальную угрозу сильного разрушительного землетрясения, рассматривается зона длительного сейсмического затишья в западной части Алеутской островной дуги — так называемая “Командорская брешь” [Федотов, 1968; Селиверстов, 2009; Лобковский и др., 2014; Sykes, 1971]. Этот район является зоной сочленения трех литосферных плит: Тихоокеанской, Северо-Американской и Евразийской. При этом непосредственный контакт Тихоокеанской плиты происходит с микроплитами Берингия [Ландер и др.,

1994; Селиверстов, 1998] и Охотоморская, как часть Евразийской [Павленкова и др., 2018].

В целях поиска предвестников сильных землетрясений указанный выше район покрыт сетью пунктов геофизических наблюдений существенно хуже по сравнению с окрестностью г. Петропавловск-Камчатский [Чебров и др., 2011]. Вполне очевидно, что доступным методом получения своевременной информации прогноза землетрясений являются сейсмологические методы, основанные на данных каталога землетрясений, получаемого в реальном времени. В настоящее время сеть сейсмических наблюдений Камчатского филиала Федерального исследовательского центра “Единой геофизической службы Российской академии наук” (КФ ФИЦ ЕГС РАН) оснащена современными цифровыми приборами регистрации и обеспечивает представительность каталога [Чебров и др., 2013] на уровне, достаточном для использования его данных в статистических методах прогноза.

Таблица 1. Параметры землетрясений 2016–2019 гг. и номера соответствующих им аномалий

№	Дата	λ° в.д.	φ° с.ш.	H , км	ML	M_w	Номер аномалии
1	03.06.2016	169.36	53.95	17	5.5	5.3	RTL_3, Z_1, dS_2
2	04.07.2016	171.92	52.63	45.7	5.4	5.2	dS_4
3	22.08.2016	165.32	54.94	43.6	5.4	5.1	RTL_4, Z_{II}, dS_1
4	05.09.2016	168.53	54.42	34	6.3	6.1	RTL_5, Z_{III}
5	24.11.2016	164.78	55.11	50.3	5.9	5.5	RTL_4, Z_{II}, dS_1
6	27.03.2017	171.99	52.44	59.9	6.3	6.2	dS_6
7	29.03.2017	163.22	56.97	43	6.8	6.6	$RTL_{2 \text{ и } 6}, Z_{II}, dS_3, \gamma_2$
8	02.06.2017	170.55	53.99	32	6.6	6.7	RTL_3, Z_1, dS_5
9	17.07.2017	168.67	54.42	27.7	6.2	6.3	$RTL_{3 \text{ и } 5}, Z_{I \text{ и } III}, dS_7$
10	17.07.2017	168.9	54.35	7	7.3	7.8	
11	07.01.2018	165.55	54.96	59.8	5.9	5.1	$RTL_4, Z_{II}, dS_1, \gamma_4$
12	25.01.2018	166.65	55.37	45.6	6.3	6.2	$RTL_{1 \text{ и } 4}, Z_{II \text{ и } III}$
13	20.12.2018	164.71	54.91	54	7.3	7.3	$RTL_4, Z_{II}, dS_1, \gamma_4$
14	24.12.2018	164.46	55.25	51	6.6	6.1	
15	25.06.2019	164.41	56.18	57	6.4	6.4	$RTL_{1 \text{ и } 4}, Z_{2012, 2015, 2019}, dS_3, \gamma_{1 \text{ и } 3}$
16	26.06.2019	164.36	56.16	52.5	6.5	6.4	

Примечание. Положение эпицентров землетрясений приведены на рис. 1–5, характеристики аномалий – в табл. 2. ML – определение КФ ФИЦ ЕГС РАН (<https://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>); M_w – определение Global CMT catalog (<http://www.globalcmt.org/>); для землетрясений № 4 и № 13 – USGS National Earthquake Information Centre (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>).

С 2017 г. сейсмическая активность на Камчатке резко возросла (рис. 1). Основной энергетический вклад внесли сильные землетрясения $M \geq 6.0$, приуроченные к зоне сочленения Тихоокеанской литосферной плиты, Охотской и Берингии, среди которых два землетрясения с магнитудой выше 7.0: Ближне-Алеутское землетрясение (БАЗ) 17.07.2017 г. с ML 7.3 ($M_w = 7.8$) – сильнейшее в регионе задуговое землетрясение на трансформном разломе Беринга [Чебров и др., 2019] и землетрясение Угловое Поднятия (ЗУП) 20.12.2018 г. ML 7.3 ($M_w = 7.3$) – сильнейшее событие района южнее зоны сочленения Камчатского и Алеутского желобов [Чебров и др., 2020]. Оба землетрясения (БАЗ 2017 г. и ЗУП 2018 г.) сопровождалось большим числом афтершоков в течение первого года после главного толчка ~600 и 800 событий с энергетическим классом выше представительного для региона и размером длины очаговой зоны ~500 км и 95 км соответственно. До этих событий (в марте 2017 г.) произошли два последовательных сильных землетрясения на юго-восточной (ЮВ) и у северо-западной (СЗ) оконечности Командорского микроблока с интервалом ~2 сут (табл. 1) – удаленный форшок БАЗ 27.03.2017 г. ML 6.3 ($M_w = 6.2$) и Южно-Озерновское землетрясение (ЮОЗ)

29.03.2017 г. ML 6.8 ($M_w = 6.6$) [Чебров и др., 2017]. Позднее, в акватории Камчатского пролива, пространственно расположенного между очагами землетрясений ЮОЗ, БАЗ 2017 г. и ЗУП 2018 г., произошел дуплет землетрясений 25.06.2019 г. ML 6.4 ($M_w = 6.4$) и 26.06.2019 г. ML 6.5 ($M_w = 6.4$).

При детальном ретроспективном анализе вариаций фоновой сейсмичности, предшествующей серии сильных событий 2016–2019 гг. в данном районе (см. табл. 1), отмечены аномальные вариации параметров, рассматриваемые в качестве предвестников (локальных пространственно-временных зон затишья и активизаций) по среднесрочным прогностическим методикам, используемым в КФ ФИЦ ЕГС РАН [Салтыков и др., 2013]. Целью представляемой работы является демонстрация динамики развития сейсмических предвестников по прогностическим методикам: RTL , Z -функция, вариации наклона графика повторяемости γ и площади сейсмогенных разрывов dS .

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Исходный региональный Каталог КФ ФИЦ ЕГС РАН 1962–2019 гг. (<http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>) [Чебров и др.,

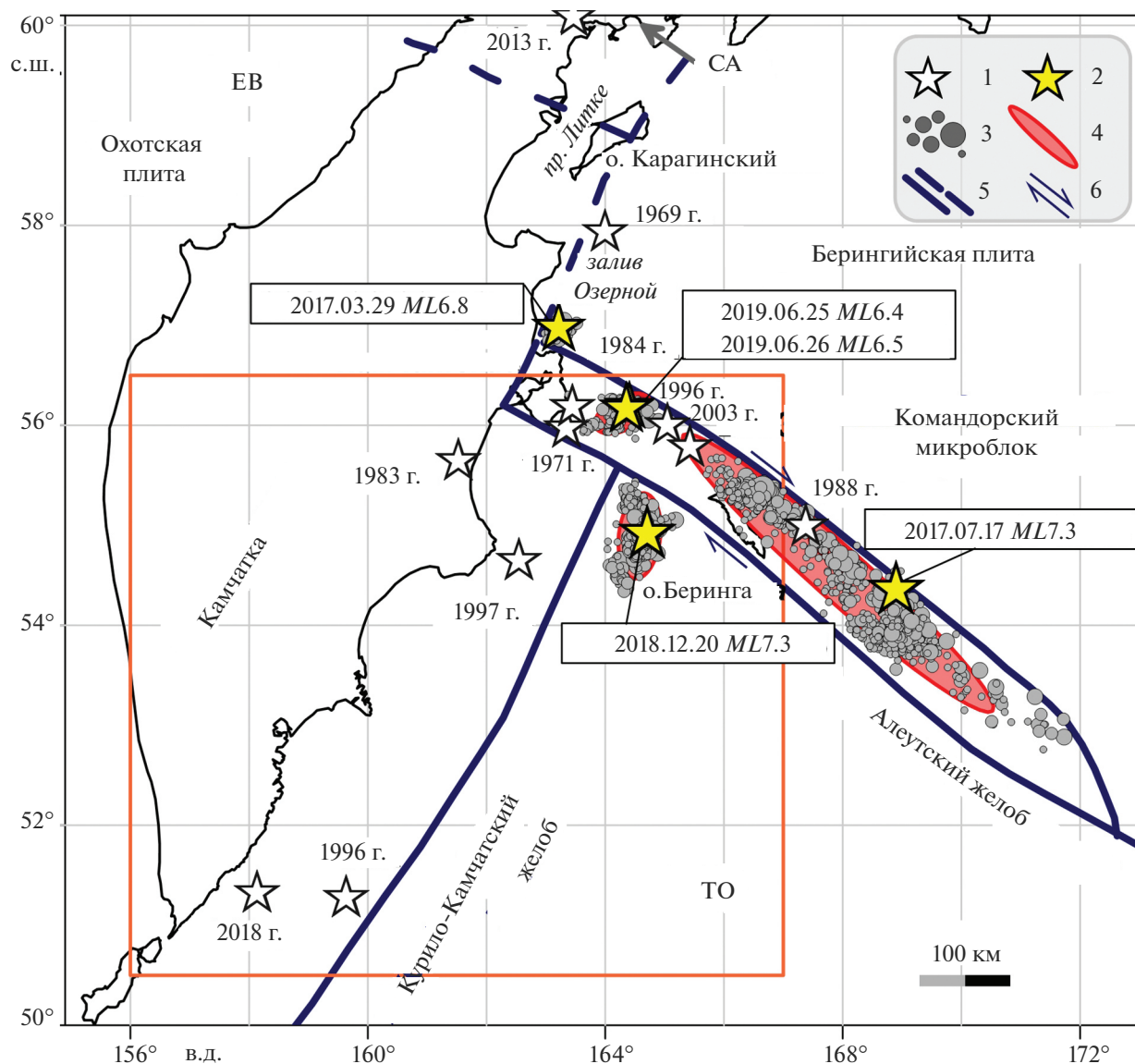


Рис. 1. Сильнейшие землетрясения за период 1962–2019 гг. в зоне сочленения Тихоокеанской (ТО), Северо-Американской (СА) и Евразийской (ЕВ) литосферных плит.

1 – сильные землетрясения $K \geq 14.0$ за инструментальный период, упоминаемые в тексте; 2, 3 – основные землетрясения активизации 2017–2019 гг. и афтершоковые последовательности; 4 – их очаговые зоны (2σ -эллипс рассеяния афтершоков); 5 – границы литосферных плит (по [Пинегина и др., 2012]) достоверные (сплошная линия) и предполагаемые (пунктирная); 6 – ориентация сдвигов. Камчатская сейсмоактивная область (КСО) выделена прямоугольником.

2013; Чеброва и др., 2020] предварительно очищен от группированных событий с помощью программы В.Б. Смирнова (МГУ им. М.В. Ломоносова) [Смирнов, 2009], реализующей алгоритм Молчана–Дмитриевой [Молчан, Дмитриева, 1991]. Нижний порог $K = 8.5$ ограничивает каталог по представительному энергетическому классу для Камчатки согласно классификации С.А. Федотова [Федотов, 1972] и $H = 100$ км по глубине. В режиме мониторинга с целью оценки сейсмической обстановки в регионе рассматривается район, ограниченный координатами 50.5° – 57° с.ш. и 155.5° – 167° в.д.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вариации наклона графика повторяемости γ

Наклон графика повторяемости γ является параметром, характеризующим распределение землетрясений по магнитуде M (или энергетическому классу K) согласно закону Гутенберга–Рихтера. Использование этого параметра вызвано интересом к мониторингу изменений сейсмичности с целью прогноза сильных землетрясений, в частности, перед некоторыми сильными землетрясениями наблюдалось уменьшение величины γ [Завьялов, 2006; Моги, 1988 и др.]. Наклон графика

ка повторяемости рассчитывается по методу максимального правдоподобия [Aki, 1965]:

$$\gamma = \log_{10} e \frac{1}{\sum_i^n K_i / N - K_0},$$

здесь K_0 — минимальный энергетический класс используемых землетрясений, соответствующий уровню представительной регистрации землетрясений; K_i — энергетический класс i -го из N ($N \geq 100$) зарегистрированных землетрясений.

Для выявления статистически значимых изменений γ применен Z -тест. Параметр Z рассчитывается как нормированная вариация γ :

$$Z_\gamma = (\gamma^{dT} - \gamma^T) / (\sigma_{\gamma^{dT}}^2 + \sigma_{\gamma^T}^2)^{1/2}.$$

Сравниваются средние значения γ во временных интервалах dT со средними значениями (фоновыми) за период наблюдений $T > dT$. Карты площадного распределения значений Z_γ строятся при сканировании исследуемой области цилиндрическими элементарными объемами заданной высоты и радиуса. В качестве предвестников рассматриваются вариации наклона графика повторяемости при значениях $Z_\gamma \geq 3$ либо $Z_\gamma \leq -3$, когда нулевая гипотеза о равенстве сравниваемых величин параметра γ (γ^{dT} и γ^T) отклоняется с достоверностью 0.99.

Расчет и построение карт площадного распределения величины Z_γ согласно методике [Коновалова, Салтыков, 2010] проводятся при фиксированном числе землетрясений N ($8.5 \leq K \leq 13.0$), попавших в элементарный объем переменного радиуса R . По данным ретроспективного анализа ожидается, что сильное землетрясение с магнитудой $M \geq 6.0$ произойдет в пределах проявления значимых вариаций или на периферии аномальных областей. Среднеквадратичная ошибка наклона графика повторяемости определяется по формуле [Кулльдорф, 1966]:

$$\sigma_\gamma = \frac{\gamma}{\sqrt{N}}.$$

Аномальную область на картах оконтуривает сплошная линия, проведенная как огибающая расчетных элементарных объемов, в которых сравниваемые временные интервалы дают значимые различия γ .

Временной ход $\gamma(t)$ строится для единичных областей с максимальными значениями Z_γ .

Сейсмические затишья по параметру RTL и “ Z -функция”

Методика расчета прогностического параметра RTL основана на предположении, что в районе готовящегося землетрясения последовательно

сменяют друг друга стадии сейсмического затишья и форшоковой активизации, при этом аномальные свойства сильнее выражены вблизи будущего сильного землетрясения как в пространстве, так и во времени. Аномалиям, свидетельствующим о подготовке сильного землетрясения [Соболев, Пономарев, 2003; Соболев, Тюпкин, 1996], соответствуют области с отрицательными значениями комплексного параметра RTL — произведения эпицентральной R , временной T и энергетической L функций, нормированных на их стандартные отклонения:

$$R(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) \right] - R_s,$$

$$T(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{t-t_i}{t_0}\right) \right] - T_s,$$

$$L(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{r_0}\right)^p \right] - L_s,$$

где x, y, z, t — координаты и время точки расчета; r_i, t_i — эпицентральные расстояния ($r < 100$ км) и времена ($t < 2$ лет) сейсмических событий (с энергетическим классом $K < 13.0$); $r_0 = 50$ км и $t_0 = 1$ год — коэффициенты, характеризующие степень убывания влияния более удаленных землетрясений; p — коэффициент, характеризующий величину вклада каждого последующего события, при $p = 1$ вклад функции L возрастает пропорционально размеру разрыва в очагах землетрясений; l_i — длина разрыва в очаге i -го землетрясения.

Размер сейсмогенного разрыва оценивается по формуле [Ризниченко, 1976]:

$$\lg(l_i) = 0.244K_i - 2.266.$$

Узлы сетки, в которых значения параметра $RTL < -3$ объединяются по принципу пространственно-временного соседства и определяют область сейсмического затишья. Количественно аномалия сейсмического затишья характеризуется минимальным значением RTL за все время ее развития в одной из расчетных точек, именуемой реперной, а также длительностью, определяемой как интервал времени, в течение которого в этой точке параметр $RTL < -3$.

Методика Z -функция, так же как и методика RTL , ориентирована на выявление сейсмических затиший в сейсмическом режиме отдельных пространственных областей и опирается на работы М. Висса и Р. Хабермана [Habermann, 1988; Wyss, Habermann, 1988]. Для локализации в пространстве аномальной зоны район исследования покрывается сеткой с фиксированным шагом. Для каждого узла сетки в заданный момент времени вычисляется функция Z :

$$Z = (R_{\text{all}} - R_{dT}) / (\sigma_{\text{all}}^2 + \sigma_{dT}^2)^{1/2},$$

где R_{dT} и R_{all} — средние величины скорости потока землетрясений (количество землетрясений в единицу времени) на двух временных интервалах (один — длительностью не менее года и привязанный к расчетной дате, другой включает в себя все остальное время), σ — стандартные отклонения R на этих интервалах.

Рассматриваются события в элементарной цилиндрической области переменного радиуса (от 30 до 55 км) глубиной 70 км при количестве землетрясений 300.

Положительное значение этой функции означает уменьшение скорости сейсмического потока R , т.е. формирование сейсмического затишья. Для всех точек с $Z > 3$ (что соответствует не менее 99% надежности выделения сейсмического затишья), попадающих в интервал 1–5 лет до конца каталога, вычисляется величина уменьшения скорости сейсмического потока $SRD(t)$ [Салтыков, Кугаенко, 2000]:

$$SRD(t) = 1 - R_{dT} / R_{\text{all}}.$$

Далее определяется наибольшее значение $SRD = \max(SRD(t))$ и время его наблюдения dT (длительность затишья).

Строятся карты, на которых отмечаются узлы сетки, соответствующие изменению скорости сейсмического потока в 2 раза ($SRD = 0.5$), в 4 раза ($SRD = 0.75$), в 8 раз ($SRD = 0.875$), полному исчезновению сейсмичности ($SRD = 1$). Выделенные объемы с заданным уменьшением сейсмичности объединяются по принципу пространственно-временного соседства и рассматриваются далее как единая область сейсмического затишья. Оконтурируется лишь та часть объединенного блока, где для каждого элементарного объема существует временной интервал не менее 1 года с полным отсутствием сейсмичности (заданный порог $SRD = 1$ определяет зону абсолютного сейсмического затишья — сейсмическое молчание) или уменьшением сейсмичности не менее чем в 8 раз ($SRD \geq 0.875$) относительно фоновой сейсмичности исследуемого района.

Количественно аномалия сейсмического затишья характеризуется значениями Z и SRD , рассчитанными для выделенной области, и длительностью.

Вариации площади сейсмогенных разрывов

В следующем за затишьем этапе подготовки сильного землетрясения в окрестности RTL -аномалии должна проявиться форшоковая активизация согласно методике [Соболев, 1999]. Выявление сейсмической активизации построено на основе анализа площадей сейсмогенных разрывов.

Вычисляется dS — разница между накопленной площадью сейсмогенных разрывов в пределах круговой области радиусом $R = 50$ км за последний год ($T = 1$ год) и среднемноголетним значением (T — длина каталога), нормированная на ее среднеквадратичное отклонение. Площади разрывов оцениваются по формуле:

$$S = \frac{1}{T} \frac{1}{S_R} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{2}{3}(K_i - K_0)},$$

где K_i — энергетический класс текущих событий, $K_0 = 8.5$, $S_R = \pi R^2$.

В качестве исходных данных используется полный (не очищенный от афтершоков) каталог.

Отслеживаются повышенные значения dS , проявившиеся в окрестности аномалий сейсмического затишья, которые могут быть проинтерпретированы как форшоковая активизация. Рассматриваются аномалии с $dS \geq 3$ (или 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предвестниковые вариации параметра γ

Эпицентр Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 ML 6.8 (рис. 2а) расположен в пределах аномальной области γ_2 (см. рис. 2г), землетрясения которой сформировали аномальные значения Z_γ . Значительное уменьшение величины наклона графика повторяемости γ отмечено в интервале времени $dT = 6$ лет с 2010 по 2015 гг. (указан на картах) относительно предшествующего временного интервала, равного удвоенному расчетному интервалу $2dT = 12$ лет (1998–2009 гг.), и долговременных фоновых значений $T = 53$ года (1962–2015 гг.) (см. рис. 2в). Минимальные значения параметра $\gamma 0.33 \pm 0.06$ отмечены за 15 мес. до события в декабре 2015 г. (табл. 2).

Динамику развития аномалии Z_γ перед землетрясением Угловое Поднятия 20.12.2018 г. ML 7.3 демонстрируют карты (см. рис. 2д, 2е). Пониженные значения γ за 3 года до события были сосредоточены преимущественно севернее очаговой области ЗУП (см. рис. 2г), минимум 0.36 ± 0.04 аномалии γ_4 отмечен за 1.5 года (см. рис. 2д) до главного события и последующего за ним сильнейшего афтершока 24.12.2018 ML 6.6 на северо-западной периферии очага, эпицентр которого пространственно совпадает с центральной частью аномалии, достигшей к концу 2017 г. размеров, сопоставимых с очагом (см. рис. 2е). За год до события аномалия приобрела и схожую с очагом форму, вытянутую в субмеридиональном направлении. Значимые аномалии наклона графика повторяемости в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, относящиеся к землетрясению Угловое Поднятия, выявлены при рассмотрении значений γ за расчетные интервалы (2010–2015, 2011–2016 и 2010–2017 гг.) в

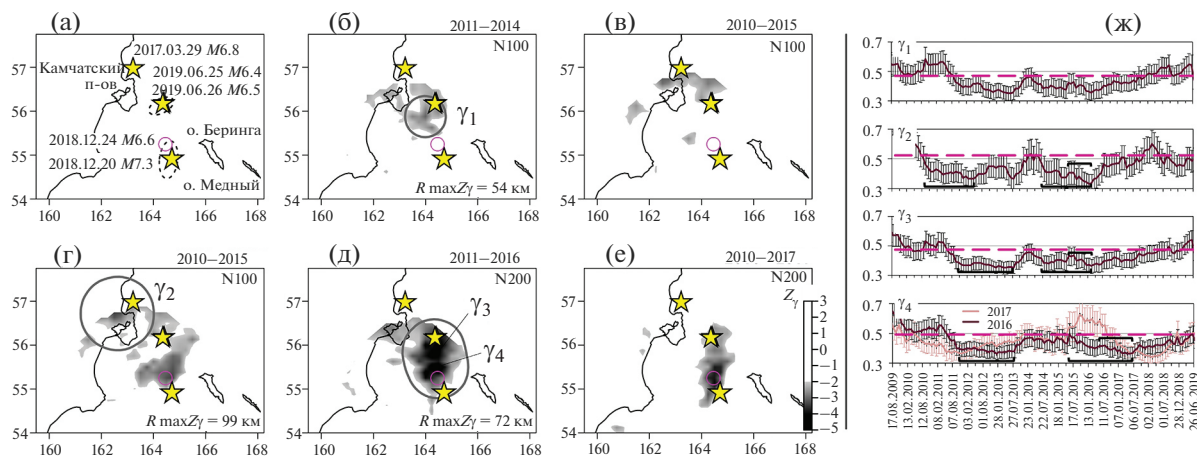


Рис. 2. Эпицентры землетрясений (а): главные события (звезды), афтершок (не закрашенный кружок) и области их афтершоковых последовательностей (пунктирная линия); б–е – карты аномальных вариаций γ перед сильными землетрясениями 2017–2019 гг. за указанные интервалы: б – в течение $dT = 4$ лет, в – 6 лет относительно фонового уровня (T с 1962 г.), г, д – в течение $dT = 6$ лет, е – 8 лет относительно значений интервала $T = 2dT$, предшествующего расчетному, аномалии Z_γ околнурены сплошной линией; ж – кривые $\gamma(t)$, полученные в скользящем временном окне 2 года (шаг 30 сут). Средний многолетний уровень γ отмечен пунктирной линией.

сравнении с предшествовавшими им удвоенными временными интервалами.

Перед дуплетом землетрясений 25.06.2019 г. ML 6.4 и 26.06.2019 г. ML 6.5 на западной границе Командорского блока аномальные значения наклона графика повторяемости относительно фоновых значений отмечались за 6 лет до событий (см. рис. 2б). Их эпицентры расположены на периферии области γ_1 , землетрясения которой сформировали аномалию на начальном этапе ее проявления. Временной интервал, на который приходится максимальное понижение параметра γ перед июньским дуплетом (γ_3) совпадает с отрицательной динамикой наклона графика повторяемости, соотнесенной к ЗУП – γ_4 (см. рис. 2д). Спустя ~ 3.5 года после значений γ 0.36 ± 0.05 (февраль 2016 г.), наименьших за все время развития аномалии с разницей в ~ 17 ч, в пределах аномальной области произошли оба землетрясения дуплета. Очаговая область локализована вблизи пространства интенсивного проявления предвестника, где значения $Z_\gamma < -4$. Нижнее пороговое значение времени ожидания возможного сильного землетрясения в случае аномалии Z_γ , предвещающей дуплет 2019 г., можно оценить в 6 лет. На примере Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. ML 7.0 ($M_w = 7.8$) [Коновалова, Салтыков, 2010] ранее отмечался временной интервал проявления аномалии пониженных значений равный ~ 10 годам.

Заблаговременное (~ 1.5 – 3.5 года) аномальное уменьшение наклона графика повторяемости (γ_3 и γ_4) между двух сейсмоактивных очагов (землетрясения Углового Поднятия 2018 г. и июньского дуплета 2019 г.) на площади, сопоставимой с их совокупной площадью, при интенсивности $Z_\gamma < -4$

может свидетельствовать о наличии единого процесса подготовки в сейсмическом объеме среды, предвещающего эти землетрясения.

Сейсмические затишья: RTL - и Z -аномалии

Динамика развития зон сейсмических затиший, проявившихся с 2012 по 2016 гг., показана в виде карт распределения параметров RTL и SRD (рис. 3). Маркировка значений анализируемых параметров (глубина цвета) изменяется в соответствии с диапазоном значений (< -12 , -9 , -6 , -3) для RTL -аномалий и параметра уменьшения скорости сейсмического потока SRD ($=1$; > 0.875 , 0.75 , 0.5) для Z -аномалий.

RTL - и Z -аномалии схожи по расположению и развитию во времени. Аномалии проявлялись практически вдоль всего Командорского блока поэтапно: первоначально в СЗ секторе в 2012 г. (см. рис. 3б, 3в, 3г), затем в ЮВ области I в 2014 г. (см. рис. 3д, 3к), спустя 8 мес. стало вновь развиваться северо-западное затишье II (см. рис. 3е, 3ж, 3л). В сентябре 2015 г. сейсмическое затишье III (см. рис. 3з, 3и, 3м) проявилось между I и II аномалиями, и было прервано 05.09.2016 г. форшоком БАЗ (см. рис. 3а). Длительность аномалий составляет 1–2 года (см. рис. 3н). Землетрясения произошли в пределах, либо в ближайших (не более 30 км для дуплета землетрясений 25.06.2019 г. и 26.06.2019 г.) окрестностях аномалий в интервале времени для большей части событий до 3 лет после окончания затишья, что соответствует периоду ожидания реализации предвестника. Землетрясение Углового Поднятия 20.12.2018 г. произошло спустя ~ 8 мес. после снятия тревоги (достигшей порога 3 лет). В свою очередь, связываемая с этим событием форшоковая активизация 2016 г.

Таблица 2. Характеристика аномалий, обнаруженных различными методами среднесрочного прогноза

Название аномалий	Экстремальные значения	dT , мес.	Координаты аномальной области	Дата (месяц, год)		№	Время ожидания, мес.
				max	end		
Z_I							
γ_1	−3.07	18	55.88° с.ш., 164.00° в.д., $R = 54$ км	07.2013 г.	07.2013 г.	15–16	72
γ_2	−3.43	18	56.75° с.ш., 162.50° в.д., $R = 99$ км	12.2015 г.	02.2016 г.	7	15
γ_3	−4.36	18	55.75° с.ш., 164.25° в.д., $R = 67$ км	02.2016 г.	02.2016 г.	15–16	40
γ_4	2016	18	55.5° с.ш., 164.5° в.д., $R = 72$ км	04.2017 г.	06.2017 г.	11, 13, 14	9, 20
	2017	16	55.1° с.ш., 164.5° в.д., $R = 65$ км	02.2018 г.	04.2018 г.		—, 10
RTL							
1	−13.1	7	55.42°–56.91° с.ш.	04.2012 г.	08.2012 г.	12, 15–16	69, 86
	−9.9	13	164.81°–168.16° в.д.	11.2014 г.	08.2015 г.		38, 55
2	−11.6	26	57.42°–57.97° с.ш. 162.88°–165.35° в.д.	09.2012 г.	07.2014 г.	7	54
	−18.5	14	53.04°–54.72° с.ш. 167.81°–171.35° в.д.	07.2014 г.	02.2015 г.	1, 8, 9–10	23, 35, 36
4	−12.0	12	54.60°–56.59° с.ш. 164.59°–167.95° в.д.	05.2015 г.	08.2015 г.	3, 5, 11, 12, 13–14, 15–16	15, 18, 32, 32, 44, 49
	−16.1	12	54.54°–56.58° с.ш. 165.84°–168.68° в.д.	07.2016 г.	08.2016 г.	4, 9–10	2, 12
6	−9.1	12	57.90°–58.96° с.ш. 162.00°–165.64° в.д.	06.2016 г.	09.2016 г.	7*	9
“Z-функция”							
2012	$Z = 14.6, SRD = 1$	18	54.52°–55.71° с.ш. 160.13°–162.18° в.д.	04.2012 г.	04.2012 г.	15–16	86
I	2014	13	53.12°–54.73° с.ш. 167.46°–170.32° в.д.	07.2014 г.	10.2014 г.	1, 8, 9–10	23, 35, 36
	II	2015	17	55.77°–57.22° с.ш. 160.88°–163.86° в.д.	08.2015 г.	10.2015 г.	7
			15	55.08°–56.43° с.ш. 163.76°–167.48° в.д.	05.2015 г.	05.2015 г.	3, 5, 11, 12, 13–14, 15–16
III	2016	14	53.88°–56.10° с.ш. 166.20°–169.35° в.д.	08.2016 г.	08.2016 г.	4, 9–10, 12	1, 11, 17
	2019	12	56.06°–57.13° с.ш. 162.35°–165.12° в.д.	04.2019 г.	04.2019 г.	15–16	2
dS							
1	6.3	13	54.15°–54.83° с.ш. 164.84°–165.64° в.д.	04.2015 г.	05.2015 г.	3, 5, 11, 13–14	16, 19, 33, 45
	3.6	12	54.55°–55.50° с.ш. 164.03°–165.46° в.д.	04.2017 г.	06.2017 г.	11, 13–14	9, 20
2	5.9	12	53.40°–54.27° с.ш. 170.30°–171.74° в.д.	10.2014 г.	09.2015 г.	1	9
3	4.8	12	56.75°–57.27° с.ш. 163.76°–164.50° в.д.	01.2016 г.	02.2016 г.	7, 15–16	14, 41

Таблица 2. Окончание

Название аномалий	Экстремальные значения	dT , мес.	Координаты аномальной области	Дата (месяц, год)		№	Время ожидания, мес.
				max	end		
4	7.6	12	52.62°–53.50° с.ш. 171.57°–173.00° в.д.	01.2016 г.	06.2016 г.	2	6
5	3.3	25	53.17°–54.37° с.ш. 171.72°–169.67° в.д.	06.2016 г.	07.2018 г.	8	12
6	4.3	24	52.26°–53.12° с.ш. 171.25°–172.72° в.д.	07.2016 г.	07.2018 г.	6	8
7	5.2	12	53.87°–54.76° с.ш. 168.01°–169.50° в.д.	09.2016 г.	08.2018 г.	9–10	10
	7.0			07.2017 г.			–

Примечание. dT – длительность аномалий, определяемая интервалом времени, в течение которого параметры принимали следующие значения: $Z\gamma \leq -3$ в пределах круговой области радиусом R (км); $RTL < -3$; $\max SRD(t)$; $dS > 3$. В графе end указаны даты завершения аномалий, для сейсмического затишья $SRD > 0.875$; № – номера землетрясений из табл. 1, сопоставленных аномалиям (* – ошибка по пространственному признаку). Время ожидания – интервалы времени между датами, на которые приходится экстремальные значения параметров (max) и моментами землетрясений.

[Чебров и др., 2020] отмечена спустя ~7 мес. после завершения сейсмического затишья.

Проанализировав совокупность аномалий, выделенных ретроспективно методами RTL и Z -функция, предвещающих Ближне-Алеутское землетрясение [Кравченко, Коновалова, 2019], учитывая их взаимное расположение и развитие во времени, можно выделить следующие особенности. Развитие сейсмического затишья перед БАЗ можно рассматривать как три последовательно развивающихся аномалии (рис. 4): I – юго-восточную, II – северо-западную и III – аномалию, проявившуюся между первыми двумя после их завершения.

Пространственное расположение сейсмических затиший согласуется с моделью БАЗ – С, предполагающей составной очаг из двух субочагов CI и CII [Чебров и др., 2019]. Согласно данной модели, юго-восточная аномалия охватывает большую часть основного очага CI, а северо-западная аномалия пространственно совпадает с субочагом CII. Пространственную область, в пределах которой в первые часы после главного толчка афтершоки отсутствовали, закрывает третья аномалия.

Кроме того, в течение 12 мес., с мая 2014 г. по май 2015 г., сейсмические затишья ЮВ и СЗ аномалий развивались одновременно и завершились за ~2.5 года до БАЗ. Наиболее сильный форшок 02.06.2017 г. ML 6.6, предшествующий БАЗ, и сильнейший афтершок 25.01.2018 г. ML 6.3 произошли на периферии I и II аномалии соответственно.

В области III аномалии (см. рис. 4а) сейсмическое молчание проявилось за 3 месяца до начала форшоковой активизации (см. рис. 4б), развивавшейся с сентября 2016 г. В пределах зоны пересечения двух аномалий I и III выделяется участок, где дважды отмечается снижение скорости сейсмического потока более чем в 8 раз ($SRD > 0.875$), с мая

по октябрь 2014 г. и с января по август 2016 г. Форшоки ближайших к эпицентру БАЗ расположены в пределах этого участка. Инструментальные эпицентры БАЗ и его сильнейшего афтершока находятся на пересечении аномалий сейсмических затиший, разнесенных во времени.

RTL -аномалия в заливе Карагинский развивалась с 2012 г. одновременно с аномалиями затишья вдоль трансформного разлома Беринга, предвещающих Ближне-Алеутское землетрясение 2017 г. (см. рис. 3). И если аномалию 2012 г. (RTL_2) можно рассматривать как ранний предвестник Южно-Озерновского землетрясения 2017 г., то выделенное в 2016 г. затишье (RTL_6) близ населенного пункта Ивашка (см. рис. 3з) располагается на большем удалении от его эпицентра. По этой причине авторы рассматривают данную RTL -аномалию в районе о. Карагинский как нереализованный предвестник. Кроме того RTL -аномалия в этом районе сменялась эпизодом повышенных значений параметра dS в 2018 г. В настоящее время затишье по параметру RTL продолжает развиваться вновь одновременно с аномалиями затишья и активизации в районе о. Беринга и п-ова Камчатский, в континентальной части Камчатского залива [Салтыков и др., 2021, 2022], а также аномалиями наклона графика повторяемости [Коновалова, Салтыков, 2021]. Сейсмическая обстановка (на конец 2022 г.) представлена ниже по данным комплексных аномалий.

Форшоковая активизация (параметр dS)

Аномалии вариаций площади сейсмогенных разрывов (рис. 5) предшествовали всем рассматриваемым в работе землетрясениям 2016–2019 гг. (см. табл. 1) за исключением сильнейшего афтершока БАЗ 25.01.2018 г. ML 6.3. Его эпицентр расположен на краю сейсмических затиший, выделенных одновременно двумя методами RTL и Z -функция

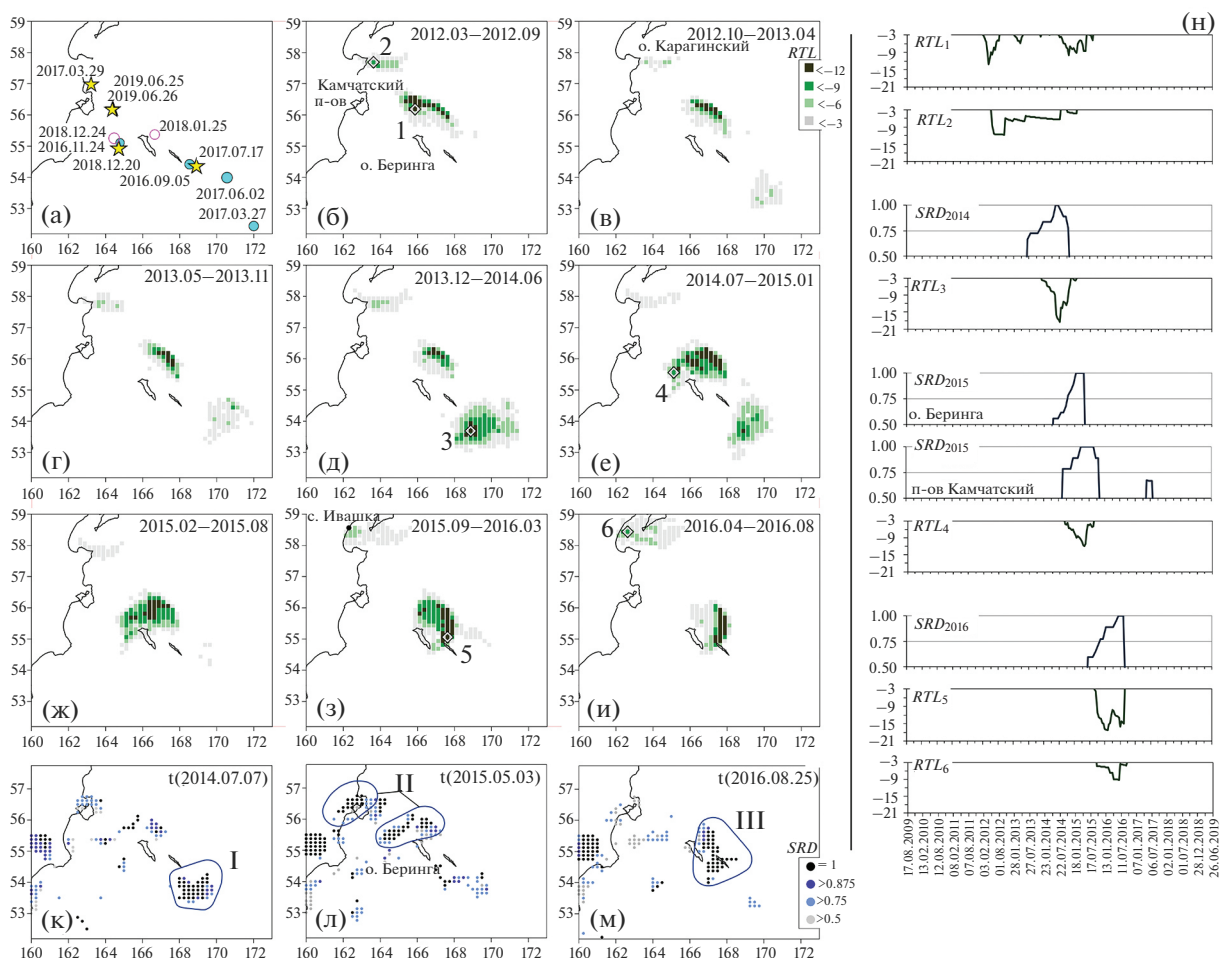


Рис. 3. Динамика сейсмических затиший по методу *RTL* и *Z*-функция.

а — положение эпицентров главных событий (звезды), форшоков и афтершоков (закрашенные и пустые кружки соответственно); б–и — карты минимальных значений параметра *RTL* на последовательных временных интервалах; к–м — карты максимальных значений параметра *SRD* на указанные расчетные даты, области сейсмического молчания (*SRD* = 1) оконтурены; н — графики *SRD(t)* и *RTL(t)* для областей *Z*-аномалий (оконтурены синей линией) и реперных точек *RTL*-аномалий (отмечены ромбами на картах).

дважды в 2015 и 2016 гг. (см. рис. 4), пространственно расположенных между выделенными аномалиями активизаций.

Активизация по параметру *dS* (см. рис. 5а, реперная точка 3) появилась за ~2 года до ЮОЗ 29.03.2017 г. *ML* 6.8 на восточной периферии его будущего очага (см. рис. 5б, 5д) и завершилась за 13 мес. до события. На протяжении 4 мес. (февраль–май 2015 г.) одновременно с *dS*₃ развивались аномалии, связанные с БАЗ и ЗУП (см. рис. 5ж).

Перед БАЗ и его сильнейшими форшоками, т.е. до начала форшоковых активизаций, выделяются локальные зоны повышенных значений параметра *dS*. Увеличение *dS* началось на юго-восточной границе очага Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. *ML* 7.3 (см. рис. 5е) — *dS*₂ (см. рис. 5а), где впоследствии произошел сильнейший форшок 02.06.2017 г. *ML* 6.6 (см. рис. 5д). Примечательно, что сильным форшокам БАЗ *M* ≥

≥ 6.0 предшествовали более слабые землетрясения: 03.06.2016 г. *ML* 5.5 в районе сильнейшего форшока (см. рис. 5б, 5д) и 04.07.2016 г. *ML* 5.4 в районе удаленного форшока 27.03.2017 г. *ML* 6.3 (см. рис. 5в, 5д), а эпицентр форшока 05.09.2016 г. *ML* 6.3 (см. рис. 5в) расположен непосредственно рядом с эпицентром БАЗ.

Перед ЗУП 20.12.2018 г. *ML* 7.3 проявление предвестника развивалось по схожему сценарию с аномалиями, предвещающими форшоки БАЗ. Аномалия *dS*₁ (см. рис. 5а) прервалась до землетрясения 22.08.2016 г. *ML* 5.4 (см. рис. 5в) перед форшоковой активизацией, начавшейся за ~2 года до события с наиболее сильным форшоком 24.11.2016 г. *ML* 5.9 (см. рис. 5г). Основная часть афтершоков ЗУП, относящихся к наибольшему кластеру, выделенного в работе [Чебров и др., 2020], примыкает к аномалии пониженных значений наклона графика повторяемости *Z_γ* (см. рис. 2а, 2д)

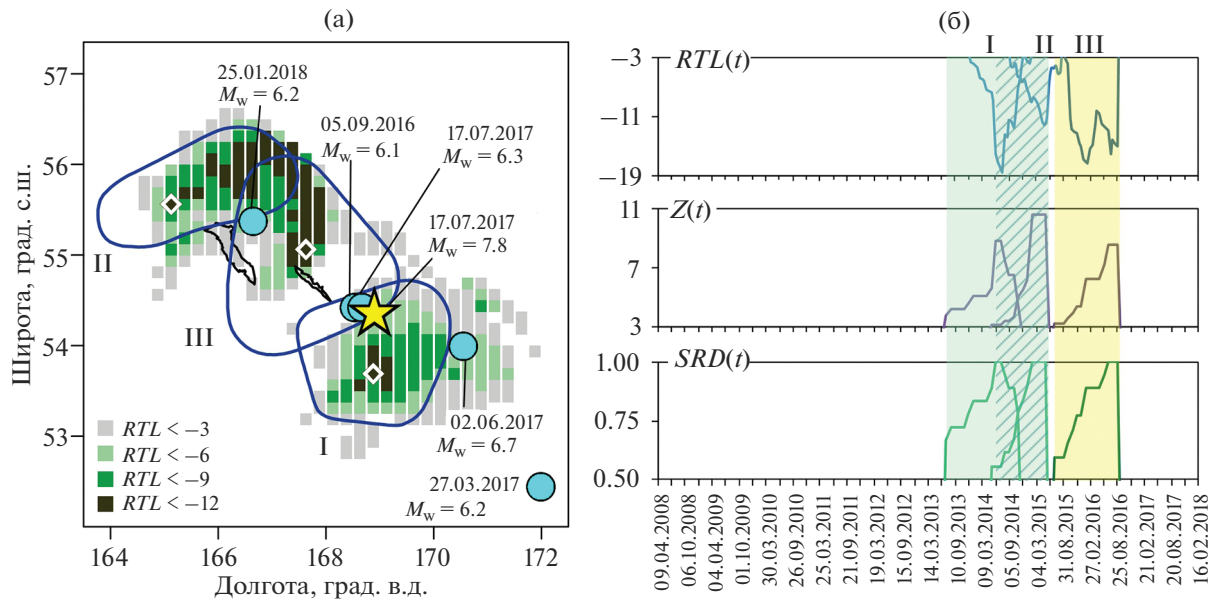


Рис. 4. Сейсмическое затишье перед Ближне-Алеутским землетрясением.

а — карта минимальных значений RTL за время развития аномалий, отмечены области сейсмического молчания по методу Z -функции (нумерованные контуры), эпицентры основного события (звезда), сильнейших форшоков и афтершока (кружки); б — временной ход параметров сейсмического режима: $RTL(t)$ соответствуют реперным точкам аномалий (ромбы на карте) по мере их проявления I–III, $SRD(t)$ и $Z(t)$ рассчитаны в годовом временном окне, штриховкой выделен интервал одновременного проявления затиший I и II.

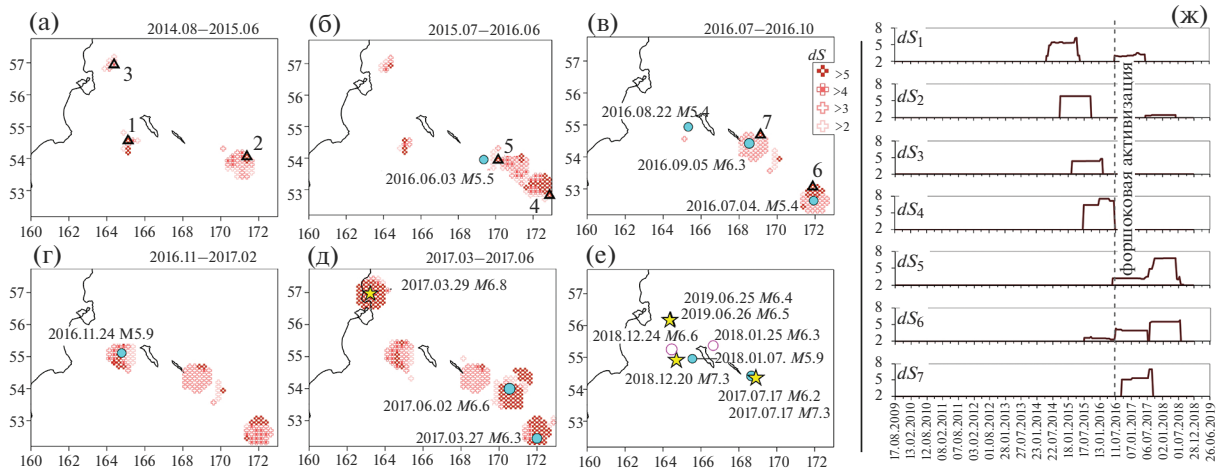
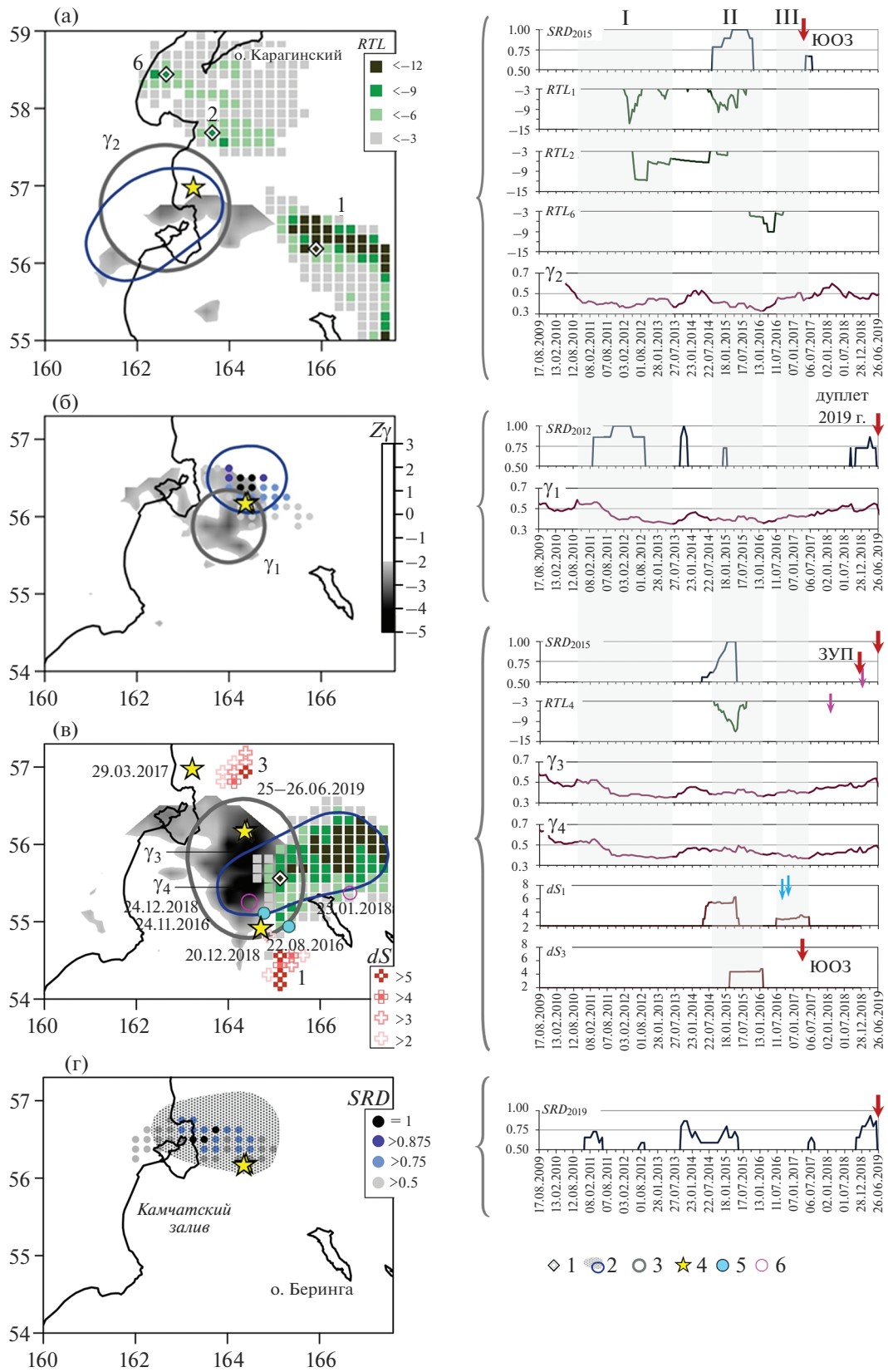


Рис. 5. Аномалии dS перед сильными землетрясениями 2016–2019 гг. за указанные временные интервалы (а–д); кривые $dS(t)$, рассчитанные для реперных точек (треугольники на картах) (ж); эпицентры землетрясений соответствуют описанию к рис. 3 (е).

Рис. 6. Взаимное расположение аномалий по комплексу среднесрочных прогностических признаков. Кривые $RTL(t)$, $SRD(t)$, $\gamma(t)$ и $dS(t)$ сгруппированы согласно соотношенным землетрясениям аномалий: ЮОЗ 29.03.2017 г. ML 6.8 (а), дуплету 25 и 26.06.2019 г. ML 6.4 и 6.5 (б, г); ЮОЗ, ЗУП 20.12.2018 г. ML 7.3 и дуплету землетрясений 2019 г. (в), три временных этапа, объединяющие проявление предвестников по времени, выделены серой заливкой, стрелки указывают моменты землетрясений. Карты пониженных значений γ : $dT = 4$ года (2011–2014 гг.) относительно интервала $T = 2dT$, предшествующего расчетному при $N = 100$, 200 соответственно, графики $\gamma(t)$ в 2-летнем временном окне с шагом 30 сут (а, в). 1 — реперная точка RTL -аномалий; 2 — области уменьшения сейсмического потока $SRD \geq 0.875$ и $SRD = 1$; 3 — аномальная область Z_γ ; 4–6 — эпицентры главных событий, форшоков и афтершоков соответственно. Интенсивность цвета аномалий меняется в соответствии с градацией значений анализируемых параметров.



(рис. 6в) с юго-востока, при этом пространственно закрывает область проявления максимальных значений параметра dS на стадии форшоковой активизации [Салтыков, Кравченко, 2019].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В изменениях сейсмического режима перед сильными событиями неоднократно отмечалась последовательная смена аномалий сейсмического затишья и форшоковой активизации [Соболев, 1999]. Такая смена режима является классическим примером развития предвестников сильных землетрясений согласно представлениям авторских методик [Соболев, Пономарев, 1999; Соболев, 2003]. В этих работах также отмечалось, что во время развития в области будущего очага стадии активизации в соседних областях проявляется затишье. Локальные изменения сейсмического режима в местах подготовки сильных землетрясений прослеживаются и в вариациях наклона графика повторяемости γ [Завьялов, 2006 и др.]. Похожую картину реализации предвестников перед сильными камчатскими землетрясениями 2016–2019 гг. показаны на рис. 2–5. При детальном рассмотрении аномалий, предшествующих землетрясениям в области сочленения Тихоокеанской, Охотской и Берингской плит, обращают на себя внимание следующие особенности.

Наиболее ранние предвестники низкой сейсмической активности — аномалии сейсмического затишья 2012 г. и пониженных значений наклона графика повторяемости Z_γ — сменяются увеличением площади сейсмогенных разрывов dS на участках, примыкающих к границам аномальных областей. Подобное расположение аномальных зон с противофазной активностью отмечается как последовательно во времени, так и одновременно (см. рис. 6). В частности, аномалия dS_1 с юга примыкает к аномалиям пониженных значений γ и сейсмического затишья по параметрам RTL , “ Z -функция” в 2015 г. (см. рис. 6в). Аномалия dS_3 расположена на периферии области аномального уменьшения скорости сейсмического потока 2012–2015 гг. и наклона графика повторяемости, заполняя пространство между участками с низкой сейсмической активностью по параметру RTL 2012 г. (см. рис. 6а, 6в).

Рассмотрим выделенные вариации фоновой сейсмичности в комплексе параметров сейсмического режима подробнее. Предвестники можно объединить по времени их проявления и развития, разделив на три этапа (серая заливка, см. рис. 6). На I этапе на фоне общего уменьшения наклона графика повторяемости γ в аномальной области γ_2 (район Камчатского п-ова) устойчивые низкие значения γ сменяются эпизодом временного повышения параметра γ , в то время как в акватории у Камчатского пролива происходило падение — γ_3 и γ_4 (см. рис. 2ж). Максимальные отклонения γ согласно значениям Z_γ в пределах этих аномалий

(γ_3 и γ_4) соответствуют одному временному интервалу, а их локальные объемы образуют единую аномальную область. Повышенные значения γ в области γ_2 (см. рис. 2ж, 6а) соответствует повышению величины параметра RTL (точка 2) после локального минимума (затишья) в пределах участка севернее γ_2 .

На II и III этапе на побережье и в акватории отмечается похожее изменение кривых $\gamma(t)$ за исключением тенденции к понижению параметра γ на III этапе в южной части аномалии (γ_4) во время увеличения его значений на севере — γ_3 (см. рис. 6в). В данном случае уменьшение γ в течение года до июля 2017 г. связывается с увеличением числа относительно сильных событий с $M > 5.0$, отнесенных к форшоковой активизации землетрясения Угловое Поднятия (см. рис. 5г). II этап объединяет все рассматриваемые аномалии Z_γ схожим поведением наклона графика повторяемости в течение 1.5 лет по февраль 2016 г. За последние 8 мес. понижение величины параметра γ происходило одновременно. За последние полгода одновременно наблюдались и повышенные значения параметра dS (см. рис. 5ж) на ЮВ (реперная точка 4) и СЗ (реперная точка 3) окраинах рассматриваемой в работе территории. Сильные землетрясения 2017–2019 гг. в пределах данной территории вызвали повышение сейсмической активности до высокого и экстремально высокого уровня на Камчатке [Салтыков, Кравченко, 2019; Салтыков и др., 2020] согласно формализованной шкале “СОУС’09”, позволяющей интенсивность сейсмического процесса оценивать в качественных определениях [Салтыков, 2011]. Данные аномалии увеличения площади сейсмогенных разрывов за ~1 год предвещали землетрясения, произошедшие с разницей в 2 суток: отдаленный форшок БАЗ 27.03.2017 г. ML 6.3 и ЮОЗ 29.03.2017 г. ML 6.8. А сейсмические затишья в районе Камчатского п-ова и о. Беринга, относящиеся также ко II временному интервалу, сопоставлены ЮОЗ, форшоковой активизации ЗУП и удаленному афтершоку БАЗ 25.01.2018 г. ML 6.3. Такое единовременное проявление аномалий, выявленных по независимым прогностическим методикам, в удаленных друг от друга районах, свидетельствуют о сложном геодинамическом процессе, объединяющем столь протяженную зону.

Предвестники, выявленные перед ЗУП 2018 г. и июньским дуплетом 2019 г. (см. рис. 6в), являются примером согласованного проявления аномалий по комплексу среднесрочных прогностических методик: RTL , Z -функции, вариаций наклона графика повторяемости Z_γ и площади сейсмогенных разрывов dS . За ~7 лет до землетрясений 25 и 26 июня 2019 г. отмечалось сейсмическое затишье, за 6 лет значимое понижение величины наклона графика повторяемости (см. рис. 6б), за ~4.5 года на северной границе аномалий увеличение площади сейсмогенных разрывов (dS_3). Кроме того, перед дуплетом выделена аномальная

область сейсмического затишья по параметру “ Z -функция”, в пределах которой уменьшение скорости сейсмического потока в 14 раз ($SRD = 0.93$) наблюдалось в течение года и завершилось за 2 месяца до событий (см. рис. 6г).

Аномалии dS_1-dS_4 (см. рис. 5) развивались в течение года последовательно, со сдвигом 4 месяца. Их расположение обрамляет область, в пределах которой на протяжении последующих трех лет происходила серия сильных землетрясений, предваряемая форшоками и сопровождавшаяся афтершоковыми процессами $M \geq 6.0$. В области, не затронутой увеличением площади сейсмогенных разрывов, развивались сейсмические затишья.

Следующий эпизод увеличения площади сейсмогенных разрывов прослеживается с середины 2016 г. — III этап, относящийся к началу форшоковых активизаций двух сильнейших землетрясений из рассматриваемых в работе. Эпицентры форшоков 05.09.2016 г. ML 6.3 и 24.11.2016 г. ML 5.9 являются ближайшими (~25–30 км) к эпицентрам их главных событий БАЗ и ЗУП, соответственно.

Сильным форшокам предшествовали более слабые события с $ML > 5.0$, соответствующие аномальным областям по параметру dS . В течение 3 месяцев перед началом проявления очевидной форшоковой активизации произошли 3 события (см. рис. 5) с близкими величинами по энергии: 03.06.2016 г. ML 5.5 (см. табл. 1, № 1), 04.07.2016 г. ML 5.4 (№ 2), 22.08.2016 г. ML 5.4 (№ 3). Рассмотрим их подробнее.

1. До землетрясения в июне 2016 г. (см. рис. 5б) выделялась аномальная зона с реперной точкой 2 — dS_2 , после землетрясения аномалия продолжила развиваться (точка 5) до форшока в ЮВ части очага БАЗ 02.06.2017 г. ML 6.6 (см. рис. 5д), сопровождалась серией афтершоков БАЗ и завершилась в июле 2018 г.

2. Развитие аномалии dS_4 было прервано землетрясением в июле 2016 г. (см. рис. 5в), тем не менее, в точке 6 продолжалось еще 2 года, в течение этого времени на периферии аномальной зоны произошел удаленный форшок БАЗ 27.03.2017 г. ML 6.3 (см. рис. 5д).

3. Следующее событие в августе 2016 г. ML 5.4 (см. рис. 5в) произошло южнее о. Беринга, располагалось между будущими очагами БАЗ (его СЗ окончечностью) и ЗУП, а на расстоянии ~15 км от него 07.01.2018 г. произошло еще одно землетрясение с ML 5.9 (см. рис. 5е).

Протяженность комплексной аномальной области в зоне сочленения трех литосферных плит: Тихоокеанской, Охотской и Берингийской, включающей последовательные стадии затиший и форшоковых активизаций перед серией сильных землетрясений с 2017 г., составляет ~900 км, что допускает возможность согласно [Bowman et al., 1998] сильнейшего землетрясения с магнитудой $M > 8.0$, превышающей все ранее зарегистрированные в данном районе.

Ряд особенностей формирования комплексных аномалий сейсмичности отмечался ранее в работе [Соболев, 2008]. В частности, в работе [Салтыков и др., 1998] эпицентр Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. $M_w = 7.8$ и его трех наиболее мощных афтершоков ($M_w = 6.7, 6.3, 6.1$) попадают в зоны пересечений независимых аномалий, где сначала наблюдалось затишье, а затем сменившая его активизация. Очерчивающее очаговую зону Кроноцкого землетрясения облако афтершоков протяженностью ~200 км перекрывало тогда выделенные зоны аномалий сейсмического процесса. В работе [Салтыков, Куаенко, 2000] районы затиший пересекались с очаговыми зонами сильных землетрясений 21 июня и 16 июля 1996 года $M_w = 7.0$ и 6.6 в Южной части Камчатки и на северо-восточном склоне Командорского блока лишь частично. Непосредственно в зонах афтершоков обоих землетрясений 1996 г. рассматриваемые процессы уменьшения сейсмической активности протекали менее выражено и на несколько месяцев позднее, чем в предварительно выявленных аномальных зонах. Затишье прекращалось перед обоими землетрясениями за несколько месяцев (~7 и 10 соответственно). Это предполагает, что затишье захватывает большую территорию, чем очаг готовящегося землетрясения. Миграция зон аномально низкой сейсмичности в направлении будущего очага отмечалась и перед другим камчатским землетрясением в 2018 г. [Коновалова, 2019] наряду с еще одним интересным фактом — скоплением смежных аномальных зон затишья вокруг эпицентра за 6 лет до события 06.07.2018 г. ML 6.7. Вероятно, подобные зоны ранних проявлений предвестников следует рассматривать как локальные объемы среды, приуроченные к будущим местам основного сброса накопленных напряжений. Этот и другие примеры, упомянутые выше, можно использовать как маркер нижнего уровня времени ожидания возможного сильного землетрясения: ~6 лет для сейсмического затишья как предвестника; ~10 лет для вариаций наклона графика повторяемости [Коновалова, Салтыков, 2010].

Из вышесказанного можно сделать следующий вывод: общий объем напряженной среды зачастую превышает размеры очага землетрясения, состояние сейсмического режима находит отклик в изменениях параметров, которые можно оценивать количественными и качественными методами на этапе подготовки будущего землетрясения заблаговременно, в том числе и в режиме реального времени. Для уточнения вероятного местоположения очаговой зоны с большей точностью требуется более детальный подход. Возможно, систематическое отслеживание динамики развития выделяемых аномалий в режиме мониторинга при комплексном анализе рассматриваемых параметров и подобным им, применяемых для оценок сейсмической обстановки, позволит приблизиться к решению данной задачи.

Несмотря на то, что в очаге БАЗ общей протяженностью по размерам облака афтершоков ~500 км произошла разгрузка накопленных напряжений, “Командорская брешь” по-прежнему остается не закрытой [Чебров и др., 2019]. В работе [Владимирова и др., 2022] отмечено существенное укорочение сейсмических циклов межплитовых землетрясений западного сегмента Алеутской островной дуги на примере событий у Крысыных островов. В очаговой зоне землетрясения 02.04.1965 г. $M = 8.7$ протяженностью ~600 км, а также восточнее, в пределах очага длиной порядка ~800 км Алеутского землетрясения 03.09.1957 г. с $M = 8.6$ — спустя всего 29 лет вместо предполагаемого периода (~60–90 лет), достаточного для накопления упругого сейсмогенного потенциала для реализации землетрясений такой силы, произошло землетрясение 07.05.1986 г. $M_w = 8.0$, а еще через 10 лет — с магнитудой 7.9 в 1996 г. Авторы работы [Яновская, Серватович, 2011] в качестве возможных причин возникновения подобных повторных землетрясений допускают как перераспределение напряжений в зоне главного толчка, так и недостаточное высвобождение деформаций в ходе афтершокового процесса. Учитывая эти результаты, сейсмические затишья в районе Командорских островов, фиксируемые в настоящее время (рис. 7), могут иметь природу, отражающую геодинамическую обстановку, не связанную с “артефактом” [Салтыков и др., 2021, 2022]. Под “артефактом” понимается искусственная природа обнаруженных аномалий затишья в районах очагов БАЗ и ЗУП, предположительно возникших вследствие удаления из каталога продолжительных афтершоковых последовательностей этих землетрясений. Кроме того, данные аномалии можно рассматривать реализовавшимися предвестниками перед землетрясениями 04.04.2020 г. $ML\ 6.0$ ($M_w = 5.5$) и 16.03.2021 г. $ML\ 6.6$ ($M_w = 6.6$) по их временному и пространственному положению.

В работе [Селиверстов, 2009] обозначена тенденция к концентрации сильнейших сейсмических событий к областям сочленения крупнейших сдвиговых зон западного окончания Алеутской дуги с континентальным склоном Восточной Камчатки, в основном, под линейными структурами северо-западного простирания — под разломами Беринга и Стеллера и, в меньшей степени, под глубоко-водным желобом. Данная тенденция, по мнению Н.И. Селиверстова, является временным явлением в подтверждение наличия “Командорской брешы”. Вместе с тем отмечалась возможность сильнейших землетрясений, приуроченных и к более северным структурам северо-западного простирания, в том числе у южной части о. Карагинский. Там же приведены механизмы сильных землетрясений за исторический период детальных инструментальных наблюдений и проанализированы с позиции современной тектоники литосферных плит, предполагающей правостороннее смещение литосферных блоков. Так, землетрясе-

ния 29.02.1988 г. $M_w = 6.9$ и 5.12.2003 г. $M_w = 6.6$ произошли на северо-восточном склоне Командорского блока Алеутской дуги, а эпицентры 15.12.1971 г. $M_w = 7.8$ [Гусев и др., 1975] и 28.12.1984 г. $M_w = 6.7$ у южного окончания п-ова Камчатский и мыса Африка (см. рис. 1) пространственно приурочены к зоне развития субширотных структур, отнесенных к головным чешуйчатым веерам сжатия на западном завершении разломов Беринга и Стеллера. В свою очередь фокальное решение землетрясения 17.08.1983 г. $M_w = 7.1$ [Гордеев и др., 1987; Зобин и др., 1988] на побережье Камчатского залива рассматривалось с позиции современного развития зоны поперечных дислокаций относительно Курило-Камчатского глубоководного желоба в отличие от привычных представлений о процессах субдукции, ориентированных вдоль островной дуги.

В работе [Гордеев и др., 2015] рассматривается вопрос о вероятности катастрофического землетрясения $M \sim 8.5$ –9 на западном окончании Алеутской дуги при подвижке Командорского блока, перемещающегося вдоль Алеутского желоба в сторону Камчатки, по типу цунамигенного разрушительного землетрясения 2004 г. $M_w = 9.0$ ¹ [Гусяков, 2018] у берегов острова Суматра (Индонезия) с длиной очага ~1200 км, возникшего вследствие подвижки Бирманской микроплиты. Обнаруженные отложения заплесков цунами в центральной и северной частях о. Карагинский в сравнении с отложениями от очагов-аналогов Озерновского землетрясения 1969 г. позволили заключить, что наблюдаемые отложения могли быть связаны с сейсмогенерирующими очагами, расположенными либо в самом проливе Литке, либо к северу от о. Карагинский. Кроме того отмечается высокая опасность для населения п. Усть-Камчатск как от возможных заплесков цунами, так и вследствие коровой сейсмичности вблизи поселка [Пинегина и др., 2012].

За время детальных сейсмологических наблюдений (с 1962 г.) в Карагинском районе Камчатского края произошло Ильпирское землетрясение 13.03.2013 г. с $ML\ 6.2$ ($M_w = 5.8$) — сильнейшее в этой зоне мелкофокусное землетрясение, ощущавшееся по макросейсмическим проявлениям на территории Карагинского, Олюторского, Пенжинского и Тигильского районов до 6–7 баллов [Сильные ..., 2014].

Наблюдаемая в настоящее время *RTL*-аномалия южнее о. Карагинский, протянувшаяся до п. Палана через с. Ивашка (см. рис. 7), может свидетельствовать о взаимосвязанном отклике среды с накапливающимися напряжениями в окрестности зоны сочленения трех литосферных плит, а также о возможном положении очага сильного землетрясения непосредственно в заливе Карагинский. Данный район находится в 8–10-баль-

¹ По данным GCMT: The Global CMT Project (www.globalcmt.org).

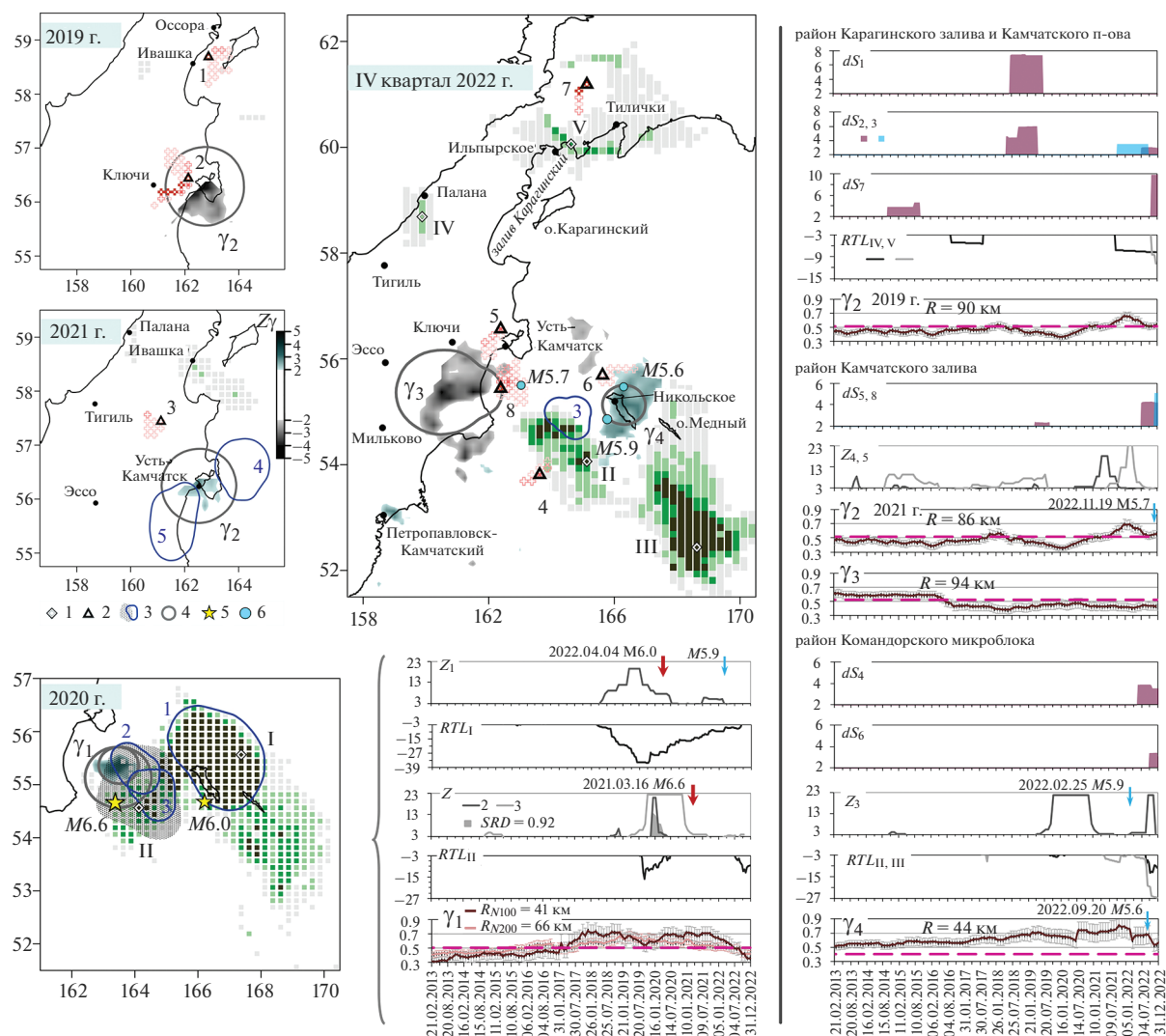


Рис. 7. Комплексные аномалии, рассматриваемые в качестве среднесрочных предвестников, по состоянию на 2019–2022 гг. и реализовавшие их землетрясения 04.04.2020 г. M_L 6.0, 16.03.2021 г. M_L 6.6 (карта комплексирования аномалий за 2020 г.). Параметр Z_i ; 2019 г. – dT (интервал 2018–2019 гг.), T (1962–2019 гг.); 2020 г. – dT (2017–2020 гг.), T (2009–2016 гг.); 2021 г. – dT (2020–2021 гг.), T (2016–2019 гг.); IV квартал 2022 г. – dT (2012–2022 гг.), T (1990–2011 гг.). 1, 2 – реперные точки RTL - и dS -аномалий; 3 – области уменьшения сейсмического потока $SRD \geq 0.875$ и $SRD = 1$; 4 – аномальная область Z_i ; 5, 6 – эпицентры главных событий и землетрясений $M_L > 5.5$ соответственно. Маркировка значений параметров (глубина цвета) соответствует градации, приведенной на рис. 6.

ной зоне по карте общего сейсмического районирования (ОСР) после уточнения в 1997 г. Поводом для пересмотра карты сейсморайонирования в этом районе [Уломов, 2004] явилось Озерновское землетрясение 22.11.1969 г. M_L 6.9 ($M_w = 7.8$) [Федотов и др., 1973], которое вызвало сотрясения 8 баллов на побережье и породило цунами высотой до 15 м. Ранее, по карте ОСР 1978 года, п. Палана находился в 7-бальной зоне. При этом, согласно карте ОСР-97А (период повторяемости сотрясений – один раз в 500 лет), п. Палана продолжает относиться к 7-бальной зоне. Отметим также, что до создания карт ОСР-97 район Олюторского землетрясения 20.04.2006 г. $M_w = 7.6$ (60.98° с.ш., 167.37° в.д.) [Пинегина, Кожурин,

2010] считался не сейсмическим. Статистика каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН в этих районах недостаточна для того, чтобы соответствовать принятым критериям надежности выделения предвестника для Камчатской сейсмоактивной области (КСО, см. рис. 1), оцениваемого в ежегодных публикациях Землетрясения России. Тем не менее, авторы считают необходимым пытаться обнаружить аномалии сейсмического режима и для этих территорий, отмечая при этом более низкую достоверность количественных оценок.

Все приведенные на рис. 7 изменения по параметрам RTL , “ Z -функция”, dS и Z_i отслеживаются в режиме мониторинга в реальном времени, сведения передаются в виде заключений о сей-

смирческой обстановке Камчатскому филиалу Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) с периодичностью 1 раз в квартал для сейсмических затиший, 1 раз в полугодие для вариаций наклона графика повторяемости. По мере обнаружения выявленных особенностей взаимного расположения аномалий затишья и активизаций КФ РЭС передаются заключения, основанные на комплексной оценке анализируемых параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заблаговременное проявление среднесрочных предвестников отмечено перед всеми сильными событиями, рассмотренными в работе. На протяжении 4-х лет (2012–2016 гг.) выделяются несколько временных эпизодов низкой сейсмической активности и активизаций. Неслучайность возникновения выделенных по независимым прогностическим методикам аномалий подтверждается согласованным изменением параметров в пространстве и времени.

Продемонстрирована возможность практического использования параметра dS в качестве предвестника на примере увеличения площади сейсмогенных разрывов до начала очевидных форшоковых активизаций перед сильнейшими землетрясениями: Ближне-Алеутским землетрясением $M_w = 7.8$ (БАЗ) и землетрясением Угловое Поднятия $M_w = 7.3$ (ЗУП).

Линейный размер совокупной площади смежных аномалий, предвещающих серию сильных землетрясений 2016–2019 гг. в области сочленения Тихоокеанской, Северо-Американской и Евразийской литосферных плит, оценивается как ~900 км на ~250 км.

Аномалии в районе Камчатского полуострова, предвещающие Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. ML 6.8 (ЮОЗ), развивались одновременно с аномалиями в окрестности о. Беринга, сопоставленные удаленному афтершоку 25.01.2018 г. ML 6.3 БАЗ и ЗУП с его форшоковой подготовкой. На единство процесса подготовки всех этих событий в зоне стыка трех литосферных плит указывают следующие факторы: 1) одновременное уменьшение скорости сейсмического потока согласно Z -функции на Камчатском полуострове и о. Беринга 2015 г.; 2) в области, заполняющей пространство между аномалиями затишья, выделяется аномалия уменьшения наклона графика повторяемости γ со статистической достоверностью 99%; 3) на прилегающих областях с юго-востока и северо-запада отмечаются зоны активизаций. Уменьшение наклона наблюдалось с 2012 г. с некоторой вариабельностью, выраженной в кратковременном подъеме значений γ , который также не превышал уровень фона. Эпицентры сильных землетрясений ЮОЗ, ЗУП и дуплета 2019 г. расположены на периферии областей низкой сей-

смичности, соседствующих с областями активизаций.

В районе очага БАЗ выделена последовательная смена предвещающих сейсмических аномалий затишья и активизаций вдоль границы малой литосферной плиты Берингии и Командорского блока Алеутской островной дуги.

По данным о наблюдаемых в настоящее время аномалиях сохраняется вероятность возникновения крупного очага в пределах “Командорской бреши”, в континентальной части Камчатского залива и у о-ва Карагинский.

Согласованное поведение параметров (RTL , “ Z -функция”, вариации наклона графика повторяемости γ и площади сейсмогенных разрывов dS) позволяет обоснованно применять комплексный анализ выявленных в режиме реального времени аномалий, рассматривая смежные места проявления низкой сейсмичности и активизаций в качестве возможного места будущего сильного землетрясения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.Д. Завьялову и Н.М. Кравченко за проявленный интерес к работе, конструктивный диалог и полезные комментарии, а также О.Г. Волович за создание программ вычисления параметров сейсмичности.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22) 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” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsr.ru/unu/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Владимирова И.С., Лобковский Л.И., Алексеев Д.А., Габсатаров Ю.В. Особенности сейсмического процесса в западной части Алеутской субдукционной зоны и их возможная связь с климатическими изменениями в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 1. С. 58–67.
- Гордеев Е.И., Мельников Ю.Ю., Чебров В.Н., Шевченко С.А. Форшок-афтершоковый процесс Камчатского землетрясения 17 августа 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1987. № 3. С. 81–96.
- 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.
- Гусев А.А. Схема очаговых зон сильных землетрясений Камчатки за инструментальный период // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования

- Камчатки. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2004. С. 75–80.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34–42.
- Гусев А.А., Зобин В.М., Кондратенко А.М., Шумилина Л.С. Усть-Камчатское землетрясение 15 декабря 1971 г. Землетрясения в СССР в 1971 году. М.: Наука, 1975. С. 172–184.
- Гусяков В.К. Ground Zero: мегаземлетрясения — главная угроза безопасности морских побережий // Наука из первых рук. 2018. № 2/3(78). С. 13–35.
- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
- Зобин В.М., Федотов С.А., Гордеев Е.И. и др. Сильные землетрясения на Камчатке и Командорских островах в 1961–1986 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 3–23.
- Коновалова А.А. Проявление сейсмических аномалий перед сильными землетрясениями Камчатки // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции / Отв. ред. Д.В. Чебров. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 227–281.
- Коновалова А.А., Салтыков В.А. Мониторинг вариаций наклона графика повторяемости землетрясений: методика и примеры // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции. Обнинск: ГС РАН, 2010. С. 235–238.
- Коновалова А.А., Салтыков В.А. Предвестниковые аномалии сейсмичности перед землетрясениями 2020 г. в окрестности Кроноцкого залива // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. 26 сентября–2 октября 2021 г. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 258–263. <https://doi.org/10.35540/903258-451.2021.8.47>
- Кравченко Н.М., Коновалова А.А. Аномалии сейсмического затишья перед Ближне-Алеутским землетрясением 17 июля 2017 г. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Седьмая научно-техническая конференция. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября–5 октября 2019 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 287–289.
- Кулльдорф Г. Вопросы теории оценивания. М.: Наука, 1966. 176 с.
- Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дроздин Д.В., Кирюшин А.В. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 года: существует ли плита Берингия? // Вычислительная сейсмология. Вып. 26. М.: Наука, 1994. С. 103–122.
- Лобковский Л.И., Баранов Б.В., Дозорова К.А. и др. Командорская сейсмическая брешь: прогноз землетрясения и расчет цунами // Океанология. 2014. Т. 54. № 4. С. 561–573.
- Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.
- Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Современные методы обработки сейсмологических данных // Вычислительная сейсмология. М.: Наука, 1991. Вып. 24. С. 19–50.
- Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Гонтовая Л.И., Павленкова Г.А. Глубинное строение и геодинамика Охотоморского региона // Региональная геология и металлогения. 2018. № 76. С. 70–82.
- Пинегина Т.К., Кожурин А.И. Новые данные о сейсмо-разрыве Олюторского землетрясения (M_w 7.6, 21 апреля 2006, Корякия, Россия) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. Вып. 6. № 2. С. 44–54.
- Пинегина Т.К., Кожурин А.И., Пономарева В.В. Оценка сейсмической и цунамиопасности для поселка Усть-Камчатск (Камчатка) по данным палеосейсмологических исследований // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. Вып. 19. № 1. С. 139–159.
- Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.
- Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения России в 2017 году. Обнинск: ГС РАН, 2019. С. 84–92.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М., Воробьев П.В., Коновалова А.А. Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения России в 2018 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. С. 89–97.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М., Коновалова А.А. Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения России в 2019 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 90–95.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М., Коновалова А.А. Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения России в 2020 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. С. 92–98.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Сейсмические затишья перед двумя сильными землетрясениями 1996 г. на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. № 1. С. 57–65.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М. Сейсмические затишья и активизации, предшествовавшие Кроноцкому землетрясению // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года: предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: КГАРФ, 1998. С. 55–67.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Коновалова А.А. Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 65–84.
- Селиверстов Н.И. Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир, 1998. 164 с.
- Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.
- Сильные камчатские землетрясения 2013 года / Под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Холдинговая компания “Новая книга”, 2014. 252 с.
- Смирнов В.Б. Прогностические аномалии сейсмического режима. I. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 7–22.
- Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 63–72.
- Соболев Г.А. Сейсмические свойства внутренней и внешней зоны очага землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2003. № 2. С. 3–12.

- Соболев Г.А. Сейсмологические особенности подготовки двух сильных землетрясений // Физика Земли. 2008. № 11. С. 20–30.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Акустическая эмиссия и стадии подготовки разрушения в лабораторном эксперименте // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 50–62.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 64–74.
- Уломов В.И. Сейсмичность // Большая Российская Энциклопедия (БРЭ). Т. 1. 2004. С. 34–39.
- Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
- Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. Гл. 8. М.: Наука, 1968. С. 121–150.
- Федотов С.А., Гусев А.А., Зобин В.М. и др. Озерновское землетрясение и цунами 22 (23) ноября 1969 г. // Землетрясения в СССР в 1969 г. М.: Наука, 1973. С. 195–208.
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др. Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. с $M_w = 6.6$, $K_s = 15.0$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 3. Вып. 35. С. 7–21.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w = 7.8$. I. Протяженный разрыв вдоль Командорского блока Алеутской островной дуги по данным наблюдений на Камчатке // Физика Земли. 2019. № 4. С. 48–71.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др. Землетрясение Угловое Поднятия 20 декабря 2018 г. $M_w = 7.3$ в зоне сочленения Камчатского и Алеутского океанических желобов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 1. Вып. 45. С. 100–117.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.
- Чеброва А.Ю., Чемарёв 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.
- Яновская Т.Б., Серватович А.С. Особенности сейсмичности перед повторным землетрясением // Вопросы геофизики. Вып. 44. № 444. СПб.: СПбГУ, 2011. С. 27–33.
- Aki K. Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\log N = a - bM$ and its Confidence Limits // Bulletin of the Earthquake Research Institute. V. 43. Tokyo: University of Tokyo, 1965. P. 237–239.
- Bowman D.D., Ouillon G., Sammis C.G. et al. An observational test of the critical earthquake concept. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № B10. P. 24359–24372.
- Habermann R.E. Precursory seismic quiescence: past, present and future // Pure and Applied Geophysics. 1988. V. 126. P. 279–318.
- Sykes L.R. Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquake prediction for Alaska and Aleutians // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. Iss. 32. P. 8021–8041.
- Wyss M., Habermann R.E. Precursory seismic quiescence // Pure and Applied Geophysics. 1988. V. 126. № 2–4. P. 319–332.

The Large ($M \geq 6.0$) Earthquakes Seismic Precursors in the Junction Zone of the Kuril-Kamchatka and Aleutian Island Arcs

A. A. Konovalova¹, * and V. A. Saltykov¹

¹Kamchatka Branch of the Federal Research Center “Geophysical Service of Russian Academy of Sciences”, bul’var Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia

*e-mail: seismo@emsd.ru

The article describes the behavior of the series of seismic precursors before the activation of 2016–2019 in an area with a tectonically complex geodynamic environment at the boundaries of the Pacific, North American, and Eurasian lithospheric plates. In order to clarify the location of possible focal areas of future strong earthquakes, a comprehensive approach to the application of allocated precursors was considered: quiescence by parameters RTL and Z -function, variations of the slope of the recurrence graph γ and areas of seismic ruptures dS . For the first time, in relation to Kamchatka, for anomalies to parameter dS , interpreted as seismic activations, the presence of a predictive component before the onset of foreshock activation is shown by the example of an increase in its values before the events that are the strongest for the areas where their focal areas are located: the Near islands Aleutian earthquake with $M_w = 7.8$ on July 17, 2017 and the Uglovoye Podnyatiye earthquake on December 20, 2018, $M_w = 7.3$, is demonstrated. The total length of the anomalous region, currently existing and including successive stages of quiescences and foreshock activations is ~ 900 km, which allows for the possibility of a new strong earthquake with a magnitude exceeding all previously recorded in this area in the junction zone of three lithospheric plates.

Keywords: seismicity, monitoring, Kamchatka, earthquakes, foreshock, precursors