

Сейсмический процесс на п-ове Крильон (о-в Сахалин) после землетрясения 23 апреля 2017 г.

А. С. Закупин¹, Н. В. Богинская¹, Д. В. Костылев^{1,2}

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16, e-mail: a.zakupin@imgg.ru

²Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”, 693010, г. Южно-Сахалинск, ул. Тихоокеанская, 2а

Поступила в редакцию 26.04.2021 г., принята к печати 18.06.2021 г.

Объект и методы исследований. Изучалась сейсмичность на п-ове Крильон (о-в Сахалин) после землетрясения 23 апреля 2017 г. ($M = 5$) за период 2018–2021 гг. методом саморазвивающихся процессов (СРП). **Результаты.** Сейсмическая активность имеет затухающий тренд после землетрясения (и последовавших за ним нескольких афтершоковых процессов), на котором в двух случаях наблюдается активизация сейсмичности типа СРП. Установлено, что в исследуемой области (в радиусе 40 км от эпицентра Крильонского землетрясения) и ее ближайшей окрестности (до 80 км) через 74 и 26 дней после сейсмических активизаций происходили землетрясения с магнитудой $M = 3.9$ и 4.3 соответственно. В изучаемой области это одни из самых сильных землетрясений за рассматриваемый период. Результаты исследования сопоставлены с данными мониторинга Камчатского филиала Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” (КФ ФИЦ ЕГС РАН) объемной активности подпочвенного радона (ОА Рн). Установлено, что аномалии ОА Рн, обнаруженные в ноябре 2018 г. и январе 2020 г., возникают через несколько недель после выявленных СРП. Аномалии зарегистрированы на пунктах наблюдений, удаленных от исследуемой области (так же как и от вышеуказанных землетрясений) не более чем на 50 км. Землетрясения в 2018 г. ($M = 3.9$) и 2020 г. ($M = 4.3$) произошли через 19 и 32 дня после появления аномалий ОА Рн. В целом обстановка оценивается как спокойная, так как сейсмическая активность на текущий момент не имеет предпосылок, по данным анализа, для перехода из затухающей стадии в стадию стабилизации. Как показано в работе, это является одним из признаков подготовки землетрясения с $M > 5$. Тем не менее на затухающем тренде возможны активизации и (как результат) землетрясения умеренной силы ($M < 5$). **Заключение.** Предложено в дальнейшем учитывать саморазвивающиеся процессы активизации как первичный признак для изменения геодинамического состояния среды, при котором возможно появление аномалий ОА Рн, имеющих связь с прогнозом умеренной сейсмичности при форшоковых или афтершоковых активизациях.

Ключевые слова: сейсмичность, сейсмические события, метод СРП, каталог землетрясений, разлом

Seismic process on the Krillon Peninsula (Sakhalin Island) after the earthquake on April 23, 2017

Aleksander S. Zakupin¹, Natalya V. Boginskaya¹, Dmitry V. Kostylev^{1,2}

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, 16 Nauki st., Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia, e-mail: a.zakupin@imgg.ru

²Sakhalin Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 2a Tikhookeanskaya st., Yuzhno-Sakhalinsk 693010, Russia

Received 26.04.2021, accepted 18.06.2021

Research subject and methods. The seismicity of the Krillon Peninsula (Sakhalin Island) after the earthquake on April 23, 2017 ($M = 5.0$) during the 2018–2021 period was investigated by the method of self-developing processes (SDP). **Results.** The seismic activity showed a damping trend after the earthquake (and several following aftershocks), with the activation of SDP seismicity observed in two cases. In the study area (40 km within the radius from the epicenter of the Krillon earthquake) and its immediate vicinity (up to 80 km), earthquakes with $M = 3.9$ and $M = 4.3$ were observed 74 and 26 days after seismic activations. These earthquakes are considered to be the strongest events occurred in the study area in the period under consideration. The results of the study were compared with the monitoring data of the Kamchatka branch of the Geophysical Survey Russian Academy of Sciences (KB GS RAS) on the volumetric

Для цитирования: Закупин А.С., Богинская Н.В., Костылев Д.В. (2021) Сейсмический процесс на п-ове Крильон (о-в Сахалин) после землетрясения 23 апреля 2017 г. *Литосфера*, 21(5), 734–742. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-734-742>

For citation: Zakupin A.S., Boginskaya N.V., Kostylev D.V. (2021) Seismic process on the Krillon Peninsula (Sakhalin Island) after the earthquake on April 23, 2017. *Lithosphere (Russia)*, 21(5), 734–742. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-5-734-742>

activity of subsoil radon (OA Rn). It was revealed that the OA Rn anomalies detected in November 2018 and January 2020 had appeared several weeks after the identified SDP. The anomalies were registered at observation points remote from the study area (as well as from the above-mentioned earthquakes) by no more than 50 km. Earthquakes in 2018 ($M = 3.9$) and 2020 ($M = 4.3$) occurred 19 and 32 days after the appearance of OA Rn anomalies. In general, the current situation can be assessed as calm, since, according to the analysis data, the seismic activity has no prerequisites for the transition from the decaying stage to the stage of stabilization. As shown in the work, this is a sign for preparing an earthquake with a magnitude higher than 5. Nevertheless, activation and (as a result) earthquakes of moderate strength ($M < 5$) are possible on a damping trend. *Conclusion.* It is proposed to take into account the self-developing processes of activation as a primary sign for a change in the geodynamic state of the environment, under which the appearance of OA Rn anomalies is possible. These anomalies are associated with the forecast of moderate seismicity during foreshock or aftershock activations.

Keywords: seismicity, seismic events, SDP method, earthquake catalog, fault

ВВЕДЕНИЕ

Сахалинская область – уникальный географический объект, в котором проявляются различные сильнейшие природных катастрофы. Землетрясения стоят на первом месте среди стихийных бедствий по масштабу ущерба и числу уносимых человеческих жизней. Особенно важно изучение сейсмичности южной части о-ва Сахалин, где плотность населения самая высокая, а населенные пункты, в том числе областной центр г. Южно-Сахалинск, расположены вблизи активных разломов. За последние десятилетия здесь организована плотная локальная сеть автоматизированных цифровых сейсмических станций Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” (СФ ФИЦ ЕГС РАН). На основе данных мониторинга этой локальной сети создан и регулярно пополняется детальный каталог землетрясений с $M \geq 2.0$. С 2017 г. на базе трех пунктов развернут мониторинг объемной активности подпочвенного радона (OA Rn) (Макаров и др., 2018), а на полигоне в с. Петропавловское Анивского района Сахалинской области проводятся испытания новейшего сейсмического и гидрофизического оборудования (Каменев и др., 2019). Немаловажную роль в активном развитии геофизических наблюдений имеет опыт успешных прогнозов землетрясений по методу LURR (Load/Unload Response Ratio) (Yin et al., 2006), с помощью которого удалось сделать прогноз Крильонского землетрясения 23 апреля 2017 г. ($M = 5.0$) (Закупин, Семенова, 2018), причем не в ретроспективном, а в оперативном режиме. За месяц до землетрясения прогноз рассматривался на заседании Сахалинского филиала Российского экспертного совета по чрезвычайным ситуациям (протокол № 2 от 16.03.2017 г.). Этим же ме-

тодом в 2018 г. была выявлена серия аномалий в ряде южных зон (Закупин, Богинская, 2021), в результате чего интерес к сейсмичности в этом районе значительно возрос. Озабоченность у населения вызвала серия землетрясений 29–30 марта 2021 г., произошедших в районе эпицентра Крильонского землетрясения (29.03.2021: 17-43 UTC, $M = 3.4$; 18-01 UTC, $M = 2.8$; 18-15 UTC, $M = 3.3$; 30.03.2021: 05-04 UTC, $M = 4.1$). В работе (Закупин и др., 2020) на примере пяти сильнейших землетрясений Сахалина (Пильтунское, 12.06.2005 г., $M = 5.6$; Невельское, 02.08.2007 г., $M = 6.2$; Уангское, 16.03.2010 г., $M = 5.7$; Онорское, 14.08.2016 г., $M = 5.8$; Крильонское, 23.04.2017 г., $M = 5.0$) продемонстрирован двухстадийный подход к их прогнозу. На базе выявленных аномалий параметра LURR в зоне прогноза проводится поиск сейсмических активизаций методом СРП (Тихонов и др., 2017). В работе (Закупин и др., 2020) отмечено, что, несмотря на весьма частую встречаемость таких активизаций в потоке сейсмических событий (Закупин и др., 2019), после появления прогнозных аномалий LURR и вплоть до реализации сильного землетрясения их бывает не более двух (и не менее одной). При этом активизация сейсмического процесса (установленная по решению уравнения СРП) происходит в период от 11 до 77 сут до прогнозного события. В работе (Закупин, Семенова, 2018) показано, что после основного толчка (23.04.2017) в 2017 г. было зарегистрировано 178 афтершоков. При этом восемь из них имели магнитуду $M \geq 4.0$. Весь афтершоковый процесс землетрясения 23 апреля 2017 г. длился 250 дней и представлял собой четыре последовательности, каждая из которых возникала после очередного афтершока. Распределение афтершоков Крильонского землетрясения 2017 г. имело северо-восточную направленность вдоль юго-восточного побережья п-ова Крильон, что соответ-

ствует положению сейсмических событий, произошедших 29–30 марта 2021 г.

В данной работе мы ставим цель изучить состояние очага Крильонского землетрясения спустя четыре года после него и дать оценку дальнейшему развитию сейсмического процесса. С учетом того, что с 2018 г. в исследуемом нами районе функционирует сеть КФ ФИЦ ЕГС РАН из трех станций по измерению ОА Rn (г. Южно-Сахалинск, с. Ожидаетово, с. Петропавловск) (Макаров и др., 2018, 2020), мы проводим соответствующий сравнительный анализ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Сейсмический процесс как таковой можно разграничить на главные толчки, форшоки и афтершоки, роевую и фоновую сейсмичность. Кроме того, сейсмический процесс подразделяется на стадии активизации, затухания и стационарного развития. В качестве уровня активности сейсмического процесса взят некий параметр x , который характеризует развитие процесса во времени, и его первая производная во времени – dx/dt . Таким образом, последовательности стадии активизации – это такие последовательности, для которых вторая производная будет положительной: $d^2x/dt^2 > 0$. Математическим эквивалентом процесса затухания будет неравенство $d^2x/dt^2 < 0$, а эквивалентом стационарного развития будет соотношение $d^2x/dt^2 \approx 0$ (Малышев, 1991).

Но использовать данный критерий невозможно из-за разницы продолжительности непосредственно землетрясения и временных промежутков между землетрясениями. При этом изменение любого параметра, который характеризует развитие сейсмического процесса, при равномерной временной шкале будет дискретно во времени. Процессы, при протекании которых изменение уровня активности зависит от текущего состояния, можно описать зависимостью $d^2x/dt^2 = F(dx/dt)$. В дальнейшем уравнение было модифицировано (Малышев, 2000) и приведено к такому виду:

$$d^2x/dt^2 = k[(dx/dt)^\lambda - (dx/dt)_0^\lambda]^{\alpha/\lambda}, \quad (1)$$

где параметр x – любая неубывающая количественная характеристика, естественным образом отражающая развитие процесса; k – коэффициент пропорциональности, а показатели степени λ и α определяют нелинейность развития процесса. Для исследования динамики отклонений процесса от стационарного состояния в значительных пределах уравнение СРП принимает следующий вид:

$$d^2x/dt^2 = k[(dx/dt)^\alpha. \quad (2)$$

Решения уравнения (2) представляют собой либо линейную зависимость либо сводятся к линейным зависимостям при логарифмировании (Малышев, Тихонов, 2007; Малышев, Малышева, 2018).

В качестве параметра x может использоваться кумулятивная сумма числа сейсмических событий N , либо такая же сумма энергии E , либо сумма для условной высвобожденной деформации D .

Метод саморазвивающихся процессов реализован в программном комплексе “SeisDynamicsView”, который разработал А.И. Малышев (ИГГ УрО РАН) и предоставил ИМГиГ ДВО РАН для проведения исследований.

Наиболее интересным типом саморазвивающегося процесса является активизация сейсмичности, предшествующая сильному событию (относительно фонового процесса). Такие форшоковые активизации всегда интересно сопоставлять с измерениями других геофизических полей. В нашей работе были использованы данные по мониторингу вариаций объемной активности подпочвенного радона (ОА Rn). Этот метод анализа состояния геосреды в последние годы получил активное распространение на Дальнем Востоке (Макаров и др., 2018; Фирстов и др., 2018; Фирстов, Макаров, 2020). Методика наблюдений за вариациями объемной активности подпочвенного радона (ОА Rn) сетью радонового мониторинга на юге о-ва Сахалин подробно описана в работе (Макаров и др., 2018). Регистрация уровня подпочвенного радона проводится на трех пунктах: Южно-Сахалинск (YSSR), Петропавловское (PETR), Ожидаетово (OJDR) (рис. 1), и осуществляется радиометром RADEX MR107 российской фирмы “КВАРТА-РАД”. Измерения Rn в базовом варианте радиометра осуществляются диффузионным методом путем регистрации эквивалентной равновесной объемной активности Rn и дочерних продуктов его изотопов по величине ОА Rn в воздухе жилых и общественных помещений. При регистрации уровня на пунктах сети на юге о-ва Сахалин применен метод принудительной конвекции с помощью откачки подпочвенного воздуха из измерительного шпура компрессором в накопительную камеру, где устанавливался прибор (Уткин, Юрков, 2010). Данная методика измерений позволяет значительно снизить уровень влияния вариаций метеорологических величин, являющихся основными помехами при измерении объемной активности подпочвенного радона (Козлова, Юрков, 2005).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования сейсмичности методом СРП в выбранной области использовался локальный каталог полевых станций юга Сахалина, например (Southern-Sakhalin, 2020). Ранее для южной части о-ва Сахалин, кроме исследований, проведенных в работе (Закупин и др., 2019), метод СРП ретроспективно применялся также в работе (Тихонов и др., 2017) в целях выявления краткосрочного прогноза

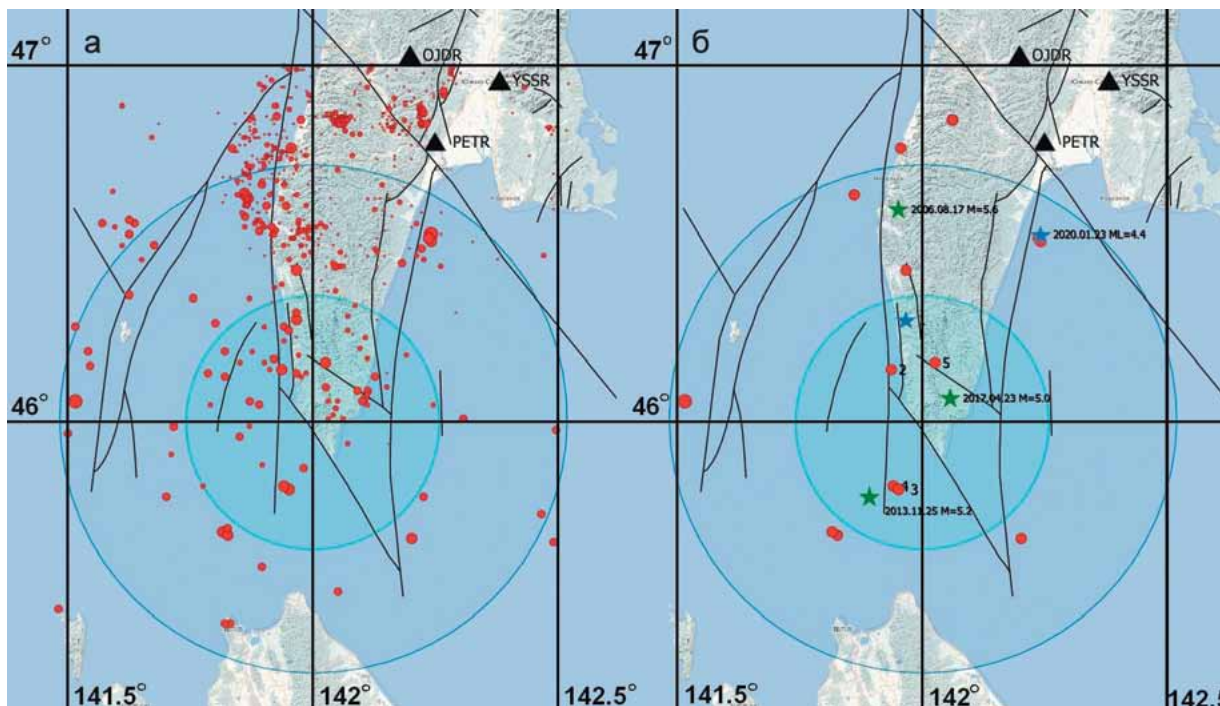


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений в районе п-ова Крильон за период 2018–2021 гг. а – все землетрясения, б – землетрясения с $M \geq 3.5$.

Красные кружки – землетрясения с $M \geq 3.5$; зеленые звездочки – самые сильные землетрясения, произошедшие в исследуемом районе; синие звездочки – землетрясения, на которые была получена аномалия подпочвенного радона (ОА Рн); малый круг – область с радиусом $R = 40$ км; большой круг – область с $R = 80$ км; геологические структуры (разломы) нанесены на карту согласно (Петров и др., 2016). Черные треугольники – пункты сети мониторинга подпочвенного радона.

Fig. 1. Map of earthquake epicenters in the area of the Krillon Peninsula for the period under study 2018–2021. а – all earthquakes, б – earthquakes with $M \geq 3.5$.

Red circles – earthquakes from $M \geq 3.5$; green stars – the strongest earthquakes that occurred in the study area; blue stars – earthquakes for which the subsoil radon anomaly (OA Rn) was received; small circle – an area with a radius of $R = 40$ km; great circle – area with $R = 80$ km; geological structures (faults) are mapped according to (Petrov et al., 2016). Black triangles are points of the subsoil radon monitoring network.

сильных событий в сейсмическом потоке. При настройке алгоритма на данные детального каталога южной части о-ва Сахалин авторы исследования использовали выборку слабых событий с $M \geq 2.0$, предваряющих землетрясения с $M = 4.6–6.2$ в зоне с $R = 166$ км, которая, по мнению авторов, покрывает всю сейсмоактивную зону юга острова. Однако, несмотря на ретроспективные оценки ожидаемого события с точностью до минут, присутствовали проблемы в реализации метода на практике. Одна из них – “залипание” прогнозной оценки времени сильнейшего толчка к концу обрабатываемой активизации в случае ее резкого ступенчатого нарастания. Вторая проблема, по нашему мнению, заключается в том, что размер очаговой области не может быть настолько большим, поскольку, с позиций сейсмотектонической модели Сахалина, такие размеры на юге острова перекрывают сразу несколько сейсмогенерирующих областей (Левин и др., 2012). В данном исследовании мы будем при-

держиваться условий, которые применяли в предыдущей работе (каталог, не ограниченный диапазоном магнитуд и радиусом области исследования $R = 40$ км) (Закупин и др., 2019).

С учетом того, что аномалия LURR в исследуемом районе зафиксирована 31.07.2018 г. (Закупин, Богинская, 2021), для исследования мы выбрали период с 2018 г. по февраль 2021 г. Центром круговой области радиусом 40 км для расчетов выберем координаты 46.0N, 142.0E (рядом с эпицентром Крильонского землетрясения). На рис. 1 представлена карта южной части о-ва Сахалин, на которой слева нанесены все эпицентры землетрясений, произошедших за исследуемый период, а справа – землетрясения с $M \geq 3.5$ за период с 2018 г. по февраль 2021 г. Порог магнитуды 3.5 выбран условно для выделения группы сильных событий в потоке.

В табл. 1 указаны события с $M \geq 3.5$, попавшие в 40-километровую зону (их 5), а в табл. 2 – землетрясения, которые захватываются дополнительно,

Таблица 1. Землетрясения в малом круге (расчетная зона, см. рис. 1б)**Table 1.** Earthquakes in a small circle (design area, see Fig. 1b)

№	Дата землетрясения			Время возникновения			Координаты		Глубина, км	Магнитуда, ML
	Год	Месяц	День	ч	мин	с	с.ш.	в.д.		
1	2018	12	7	2	40	5.15	46.29	141.93	11.9	3.9
2	2019	12	12	9	2	31.12	45.81	141.90	12.2	3.8
3	2020	11	13	8	27	48.91	46.17	142.05	7.2	3.7
4	2019	10	22	10	36	46.04	46.15	141.87	9.1	3.5
5	2019	12	12	12	22	13.45	45.82	141.88	12.3	3.5

Таблица 2. Землетрясения вне расчетной зоны в пределах большого круга (см. рис. 1б)**Table 2.** Earthquakes outside the design area within the great circle (see. Fig. 1b)

№	Дата землетрясения			Время возникновения			Координаты		Глубина, км	Магнитуда, ML
	Год	Месяц	День	ч	мин	с	с.ш.	в.д.		
1	2020	1	23	6	22	37.63	46.53	142.48	4.7	4.4
2	2021	1	29	15	53	33.38	46.06	141.03	7.0	4.3
3	2018	12	19	19	11	48.62	46.64	141.72	5.2	3.9
4	2019	8	14	20	24	4.67	45.69	141.63	7.9	3.9
5	2020	9	7	22	30	29.26	45.67	142.40	10.5	3.7
6	2019	1	13	13	59	43.7	46.43	141.93	9.9	3.6
7	2020	1	29	4	21	7.66	46.51	142.48	10.5	3.6
8	2019	8	14	23	29	56.07	45.68	141.65	7.6	3.5
9	2020	1	29	10	0	33.98	46.52	142.47	9.2	3.5

если увеличить исследуемую область в 2 раза. Как мы видим, в ближней (расчетной) зоне, самое сильное землетрясение произошло 7 декабря 2018 г. (№1 – отмечено синей звездочкой на рис. 1). Позднее, через 12 дней, севернее его эпицентра произошло землетрясение такой же силы (см. табл. 2). Смещение эпицентральной зоны и энергия события не дают оснований считать его афтершоком, однако есть уверенность, что события зависимы, так как находятся в пределах одной разломной зоны.

В большем круге самым сильным событием стало землетрясение 23 января 2020 г. с $M = 4.4$ (также отмечено синей звездочкой). У этого землетрясения было зафиксировано два афтершока с $M \geq 3.5$ (см. табл. 2). Отметим, что второе сильнейшее землетрясение (№2 в табл. 2) с $M > 4$ зарегистрировано в западной части острова и находится вне пределов системы разломов (Центрально-Сахалинский разлом и его оперения), которые наполняют зону исследования.

Прежде чем рассмотреть результаты моделирования СРП для исследуемого периода, обратимся к результату нашей работы (Закупин и др., 2020), в которой для этой зоны проанализирован период с

2005 по 2017 г. На график расчета СРП (рис. 2) дополнительно нанесем все аномалии LURR для нашей области согласно (Закупин, Богинская, 2021). Аномалии здесь в этот период фиксировались в ноябре 2011 г. и августе 2015 г.

Как видно на графике, сейсмический процесс между тремя сильнейшими землетрясениями этой зоны (17.08.2006 г., 25.11.2013 г., 23.04.2017 г.) можно определить поэтапно как релаксация (R), стационарный режим (S) и процесс роста сейсмической активности. Последний определяется как СРП и происходит за несколько недель до очередного главного толчка. На рис. 2б показано решение для СРП перед Крильонским землетрясением (на рис. 2а этот период выделен эллипсом). В стационарном режиме наблюдаются аномалии среднесрочного предвестника LURR (показаны стрелками). Для землетрясений с $M \geq 5.0$ (Закупин и др., 2020) все три процесса могут занимать порядка 4–6 лет. Теперь перейдем к результатам этой работы по современному периоду. На рис. 3 показаны итоги моделирования сейсмических последовательностей методом СРП. Всего в расчетной выборке оказалось 54 землетрясения.

На фоне общего тренда (см. рис. 3а), который

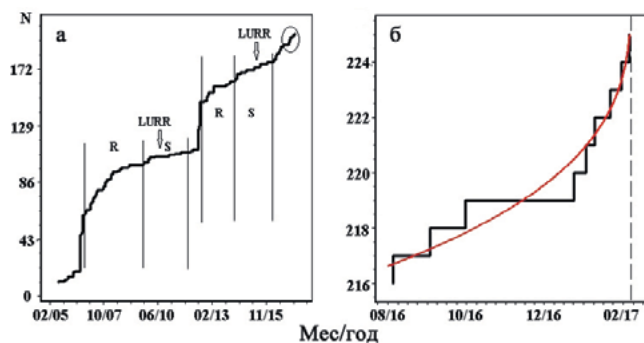


Рис. 2. Графики сейсмической активности для эпицентральной области Крильонского землетрясения с 2005 по 2017 г. а, б – пояснения см. в тексте.

Красной линией показано решение уравнения для СРП для периода с августа 2016 г. по февраль 2017 г. N – число сейсмических событий, R – процесс затухания сейсмической активности (релаксация), S – процесс стационарной активности, стрелка – аномалия параметра LURR.

Fig. 2. Seismic activity plots for the epicentral area of the Krillon earthquake from 2005 to 2017. а, б – see text for explanations.

The red line shows the solution of the equation for the SDP for the period from August 2016 to February 2017. N is the number of seismic events, R is the process of attenuation of seismic activity (relaxation), S is the process of stationary activity, the arrow is the anomaly of the LURR parameter.

свидетельствует о том, что в очаге продолжается процесс релаксации, за рассмотренный период два раза наблюдается саморазвивающийся процесс с ускорением (см. рис. 3б). Если разбить временной промежуток на два графика, то каждый из них будет иметь релаксационный тип, но внутри содержать период с ускорением (СРП). Затухающий (релаксационный) тренд, как мы видим, до сих пор не перешел в стационарный режим, а следовательно, в этой зоне спустя четыре года после Крильонского землетрясения подготовка сильного землетрясения маловероятна. Впрочем, в работе (Закупин, Богинская, 2021) аномалии LURR в 2018 г. лишь немного захватывают рассматриваемую нами область, поэтому отсутствие в этой зоне признаков подготовки вполне ожидаемо (области с аномалиями наблюдаются выше 47° с. ш.). Рассмотрим выделенные нами на рис. 3 два саморазвивающихся процесса активизации. В развернутом виде эти процессы показаны на рис. 3в, г. Первый из них (см. рис. 3б) был определен 25 сентября 2018 г. Во втором случае именно так и случилось (см. рис. 3в), решение, которое было первым раз получено 28 декабря 2019 г., обновлялось вплоть до 23 января 2020 г. Ближайшим землетрясением по времени для первого СРП является землетрясение №1 в расчетной зоне в 2018 г. При этом с момента обнаружения СРП до землетрясе-

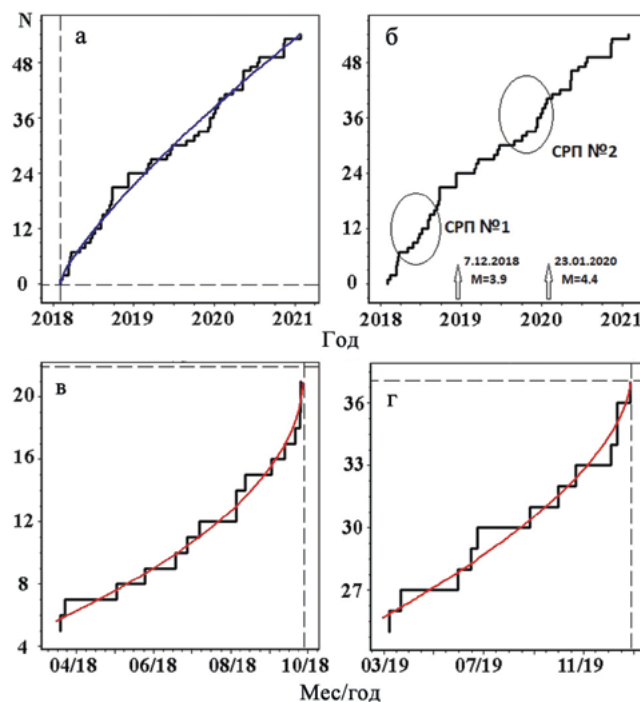


Рис. 3. Графики сейсмической активности для эпицентральной области Крильонского землетрясения с 2018 по 2021 г. а-г – пояснения см. в тексте.

Красной линией на “в” показано решение уравнения для СРП №1 для периода с апреля по октябрь 2018 г., а на “г” – решение уравнения для СРП №2 для периода с марта 2019 г. по январь 2020 г. N – число сейсмических событий.

Fig. 3. Seismic activity plots for the epicentral area of the Krillon earthquake from 2018 to 2021. а-г – see text for explanations.

The red line on the “в” is showed the solution to the equation SDP No. 1 for the period from April to October 2018 and in the “г” – to SDP No. 2 for the period from March 2019 to January 2020 (г). N is the number of seismic events.

ния проходит 74 дня. А вот для второго СРП в расчетной зоне ближайшее землетрясение происходит 13 ноября 2020 г. (№5), т. е. практически через год. Но если рассмотреть события в зоне не 40 км, а 80 км (большой круг, см. табл. 2), то самое сильное землетрясение из этого списка (23.01.2020 г., $M = 4.4$) практически идеально становится результатом реализации второго СРП. Время с момента первого определения – 26 дней, а с эффектом “залипания” – день в день. В списках землетрясений в табл. 1, 2 есть афтершоки данных событий, но есть и другие (хоть и в небольшом количестве) землетрясения, перед которыми СРП не появились.

Полученные решения по методу СРП сопоставимы с результатами исследований активности подпочвенного радона по данным сети из трех станций (г. Южно-Сахалинск, с. Ожидаево, с. Пе-

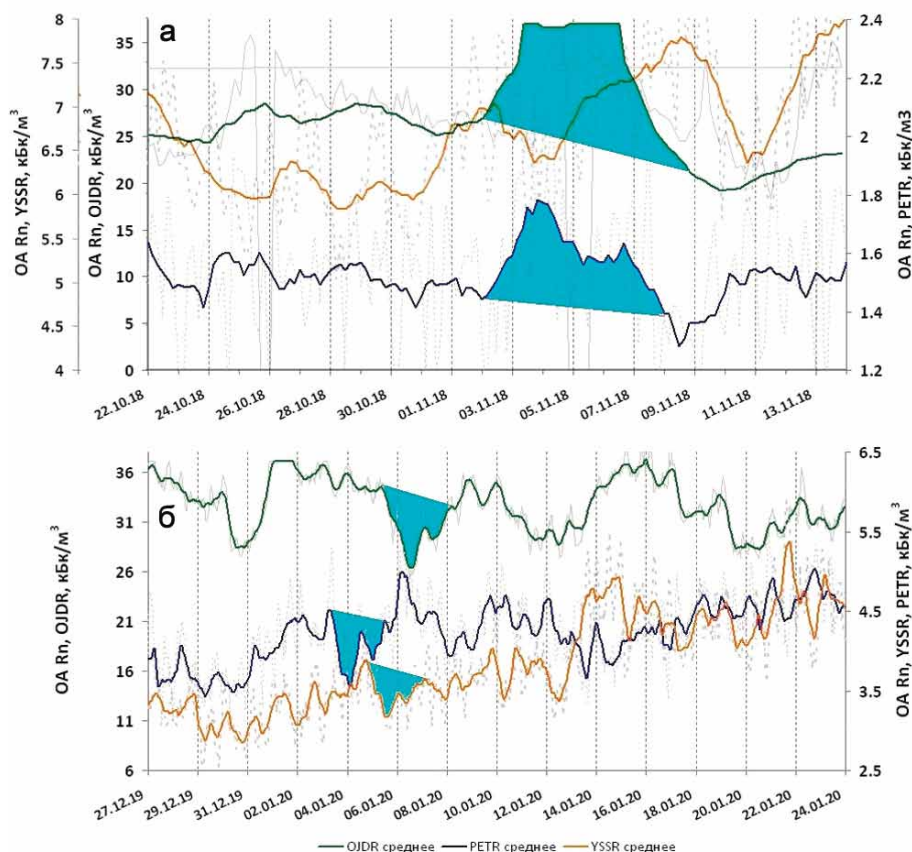


Рис. 4. Аномалии подпочвенного радона, выявленные 2–7 ноября 2018 г. (а), 5–6 января 2020 г. (б) (Макаров и др., 2018, 2020).

Fig. 4. Subsoil radon anomalies detected November 2–7, 2018 (a), January 5–6, 2020 (б) (Makarov et al., 2018, 2020).

тропавловское) (Макаров и др., 2018, 2020). Эта сеть, представляющая собой треугольник в пространстве, находится в непосредственной близости (см. рис. 1) от зоны исследований и захватывает те же самые разломные структуры, что мы видим в расчетной области. Впервые по данным этой сети авторы работы (Макаров и др., 2018) обнаружили аномалии со 2 по 7 ноября 2018 г. (рис. 4а) и связали их с подготовкой трех землетрясений на островах Хоккайдо и Кунашир. В последующие два дня эпицентры были удалены от пунктов регистрации на 300–700 км. Магнитуды землетрясений составили от 4.4 до 4.7.

Еще один результат (Макаров и др., 2020) с помощью данной сети станций по измерению OA Rn был получен в 2020 г. (рис. 4б). Аномалии OA Rn, выявленные 5–6 января 2020 г., ученые связали с землетрясением, которое произошло недалеко от района, где расположена сеть пунктов измерения. Это землетрясение 23 января 2020 г. с $M = 4.4$ в Анивском заливе неподалеку от с. Таранай Анивского района Сахалинской области.

Как отмечают Е.О. Макаров с соавторами (2020), перед землетрясением в поле подпочвенного радо-

на были зафиксированы синфазные бухтообразные аномалии отрицательной полярности длительностью около 2 сут, не связанные с резкими изменениями атмосферного давления. При этом время упреждения, принятое как время между моментом возникновения аномалии и событием, составило 17–19 сут. Проанализируем полученные нами результаты совместно с данными по радону. За время работы сети станций OA Rn на юге Сахалина, судя по приведенным публикациям, аномалии отмечались в двух случаях. Однако удивительным образом они появлялись через 38 и 7 дней после формирования двух саморазвивающихся процессов в исследуемой нами области и это в течение нескольких лет. Несмотря на то что область нашего исследования расположена немного южнее, вероятность простого совпадения в обоих случаях ничтожна. Можем предположить, что быстрый отклик в виде землетрясений на о-ве Хоккайдо 8 и 9 ноября, где также отмечается продолжение Центрально-Сахалинского разлома, авторы предпочли землетрясению 7 декабря 2018 г. из-за относительно большой задержки (1 месяц). Второе землетрясение (23.01.2020 г.) хорошо подходит под прогноз

ную цель для саморазвивающегося процесса и аномалию ОА Rn со всех точек зрения.

Полученные нами решения уравнения СРП в области, где расположен эпицентр Крильонского землетрясения 2017 г., находятся в пределах общей затухающей сейсмической активности, однако являются индикаторами (прогнозными признаками) для афтершоков в самом очаге, а также других умеренных землетрясений в ближайших областях. Такие процессы могут сопровождаться активностью подпочвенного радона, аномалии которого установлены (Макаров и др., 2020) после выявленных нами активизаций СРП. В то же время проведенный анализ позволяет заключить, что землетрясение с $M > 5$ в районе эпицентра Крильонского землетрясения 2017 г. в ближайшее время не произойдет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ сейсмичности в районе п-ова Крильон методом СРП за период с 2018 по 2021 г. показал наличие релаксирующего тренда, на котором в двух случаях наблюдались саморазвивающиеся процессы сейсмической активизации. Первый процесс датируется 25.09.2018 г. и через 74 дня реализуется землетрясением 07.12.2018 г. ($M = 3.9$). Второй процесс зафиксирован 28.12.2019 г., а через 26 дней произошло землетрясение 23.01.2020 г. ($M = 4.4$). Обнаруженные процессы хорошо согласуются с аномалиями подпочвенного радона, выявленными в первом случае со 2 по 7 ноября 2018 г., а во втором – 5–6 января 2020 г. Таким образом, можно предположить, что процессы саморазвивающейся активизации могут служить первичным признаком изменения состояния геосреды и сопровождаться активностью подпочвенного радона. Такие проявления в нашем случае наблюдались для сильнейших землетрясений на изученной территории (с $M \approx 4$). Показано, что затухающий (релаксационный) тренд после Крильонского землетрясения 2017 г. до сих пор не перешел в стационарный режим и подготовка сильного землетрясения с $M \geq 5.0$ маловероятна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Закупин А.С., Богинская Н.В. (2021) Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы. *Геосистемы переходных зон*, **5**(1), 27–45. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.027-045>
- Закупин А.С., Богинская Н.В., Андреева М.Ю. (2019) Методические аспекты исследования форшоковых последовательностей методом СРП (саморазвивающиеся процессы) на примере Невельского землетрясения на Сахалине. *Геосистемы переходных зон*, **3**(4), 377–389. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4>
- Закупин А.С., Богомолов Л.М., Богинская Н.В. (2020) Последовательное применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине. *Геофизические процессы и биосфера*, **19**(1), 66–78. DOI: 10.21455/GPB2020.1-4
- Закупин А.С., Семенова Е.П. (2018) Исследование процесса подготовки сильных землетрясений ($M_w > 5$) на Сахалине методом LURR. *Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, **25**(5), 73–88.
- Каменев П.А., Костылев Д.В., Богинская Н.В., Закупин А.С. (2019) Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования. *Геосистемы переходных зон*, **3**(4), 390–402. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4>
- Козлова И.А., Юрков А.К. (2005) Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях. *Уральский геофиз. вестник*, **7**, 31–34.
- Левин Б.В., Ким Ч.У., Соловьев В.Н. (2012) Оценка сейсмической опасности и результаты детального сейсмического районирования для городов о. Сахалин. *Тихоокеан. геология*, **31**(5), 93–103.
- Макаров Е.О., Фирстов П.П., Костылев Д.В., Рылов Е.С., Дудченко И.П. (2018) Первые результаты мониторинга подпочвенного радона сетью пунктов, работающей в тестовом режиме, на юге острова Сахалин. *Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, **25**(5), 99–114.
- Макаров Е.О., Костылев Д.В., Фирстов П.П., Каменев П.А., Богинская Н.В. (2020) Отклик в поле подпочвенного радона на землетрясение 23.01.2020 г. с $M_L = 4.2$ в заливе Анива вблизи острова Сахалин. *Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXIII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 30 марта – 01 апреля 2020 г. Петропавловск-Камчатский: Ин-т вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*, 114–117.
- Малышев А.И. (1991) Динамика саморазвивающихся процессов. *Вулканология и сейсмология*, **4**, 61–72.
- Малышев А.И. (2000) Жизнь вулкана. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 262 с.
- Малышев А.И., Тихонов И.Н. (2007) Нелинейные закономерности развития сейсмического процесса во времени. *Физика Земли*, **6**, 37–51.
- Малышев А.И., Малышева Л.К. (2018) Прогнозируемость потока сейсмической энергии северо-западного обрамления Тихого океана по данным каталога USGS. *Геосистемы переходных зон*, **2**(3), 141–153. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.3.141-153
- Петров О.В., Морозов А.Ф., Чепкасова Т.В., Киселев Е.А., Стрельников С.И., Богданов Ю.Б., Вербицкий В.Р., Вольский А.С., Застрожных А.С., Гусев Н.И., Жданов А.В., Ковригина Е.К., Колесников В.И., Кропачев А.П., Марковский Б.А., Машак М.С., Проскурнин В.Ф., Руденко В.Е., Снежко В.А., Шпикерман В.И., Якобсон К.Э., Каминский В.Д., Гусев Е.А., Лопатин Б.Г. (2016) Геологическая карта России и прилегающих акваторий масштаба 1 : 2 500 000. ФГБУ “ВСЕГЕИ”, Роснедра.
- Тихонов И.Н., Михайлов В.И., Малышев А.И. (2017) Моделирование последовательностей землетрясений юга Сахалина, предвещающих сильные толчки,

- с целью краткосрочного прогноза времени их возникновения. *Тихоокеан. геология*, **36**(1), 5-14.
- Уткин В.И., Юрков А.К. (2010) Радон как индикатор геодинамических процессов. *Геология и геофизика*, **51**(2), 277-286.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О. (2020) Долговременные тренды подпочвенного радона на Камчатке как индикаторы подготовки землетрясений с $M > 7.5$ в северо-западном обрамлении Тихого океана. *Геосистемы переходных зон*, **4**(3), 270-287. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.270-278.279-287>
- Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухова И.П., Будиллов Д.И., Исакевич Д.В. (2018) Поиск предвестниковых аномалий сильных землетрясений по данным мониторинга подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. *Геосистемы переходных зон*, **2**(1), 16-32. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.1.016-032
- Southern-Sakhalin_2018.xls (2020) Землетрясения России в 2018 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, Приложение на CD-ROM.
- Yin X.C., Zhang L.P., Zhang H.H., Yin C., Wang Y., Zhang Y., Peng K., Wang H., Song Z., Yu H., Zhuang J. (2006) LURR's Twenty Years and its Perspective. *Pure Appl. Geophys.*, **163**, 2317-2341. DOI 10.1007/s00024-006-0135-x
- ## REFERENCES
- Firstov P.P., Makarov E.O. (2020) Long-term trends of subsurface radon in Kamchatka as indicators of earthquake preparation with $M > 7.5$ in the north-western frame of the Pacific Ocean. *Geosistemy Perekhodnykh Zon*, **4**(3), 270-287. (In Russ.) <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.270-278.279-287>
- Firstov P.P., Makarov E.O., Glukhova I.P., Budilov D.I., Isakevich D.V. (2018) Search for harbinger anomalies of strong earthquakes based on the monitoring of subsurface gases at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic polygon. *Geosistemy Perekhodnykh Zon*, **2**(1), 16-32. (In Russ.) doi:10.30730/2541-8912.2018.2.1.016-032
- Kamenev P.A., Kostylev D.V., Boginskaya N.V., Zakupin A.S. (2019) Geophysical studies in the southern part of the Central Sakhalin fault using a new set of equipment. *Geosistemy Perekhodnykh Zon*, **3**(4), 390-402. (In Russ.) <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4>
- Kozlova I.A., Yurkov A.K. (2005) Methodological issues of measuring the content of radon-222 in soil air during monitoring observations. *Ural'skii Geofizicheskii Vestn.*, **7**, 31-34. (In Russ.)
- Levin B.V., Kim Ch.U., Solov'ev V.N. (2012) Assessment of seismic hazard and results of detailed seismic zoning for the cities of Sakhalin Island. *Tikhookean. Geol.*, **31**(5), 93-103. (In Russ.)
- Makarov E.O., Firstov P.P., Kostylev D.V., Rylov E.S., Dudchenko I.P. (2018) The first results of monitoring of subsurface radon by a network of points operating in a test mode in the south of Sakhalin Island. *Vestn. KRAUNTs. Fiziko-matematicheskie Nauki*, **25**(5), 99-114. (In Russ.)
- Makarov E.O., Kostylev D.V., Firstov P.P., Kamenev P.A., Boginskaya N.V. (2020) Response in the subsurface radon field to the earthquake of 23.01.2020 with $ML = 4.2$ in the Aniva Bay near Sakhalin Island. *Volcanism and related processes: Materials of the XXIII Annual scientific conference dedicated to the Day of Volcanologist, Petropavlovsk-Kamchatsky*, Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, 114-117. (In Russ.)
- Malyshev A.I. (1991) Dynamics of self-developing processes. *Vulkanol. Seismol.*, **4**, 61-72. (In Russ.)
- Malyshev A.I. (2000) The life of a volcano. Ekaterinburg: Publishing house of the UB of the RAS, 262 p. (In Russ.)
- Malyshev A.I., Malysheva L.K. (2018) Predictability of the seismic energy flow of the northwestern Pacific rim according to the USGS catalog. *Geosistemy Perekhodnykh Zon*, **2**(3), 141-153. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.3.141-153 (In Russ.)
- Malyshev A.I., Tikhonov I.N. (2007) Nonlinear regularities of the development of the seismic process in time. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Fiz. Zemli*, **6**, 37-51. (In Russ.)
- Petrov O.V., Morozov A.F., Chepkasova T.V., Kiselev E.A., Strel'nikov S.I., Bogdanov U.B., Verbitskii V.R., Volkovskii A.S., Zastrozhnov A.S., Gusev N.I., Zhdanov A.V., Kovrigina E.K., Kolesnikov V.I., Kropachev A.P., Markovskii B.A., Mashchak M.S., Proskurnin V.F., Rudenko V.E., Snezhko V.A., Shpikerman V.I., Iakobson K.E., Kaminskii V.D., Gusev E.A., Lopatin B.G. (2016) Geological map of Russia and adjacent water areas on a scale of 1 : 2 500 000. FGBU "VSEGEI", Rosnedra Publ. (In Russ.)
- Southern-Sakhalin_2018.xls. (2020) Earthquakes in Russia in 2018. Obninsk, FITZ EGS RAS, Application on CD-ROM. (In Russ.)
- Utkin V.I., Yurkov A.K. (2010) Radon as an indicator of geodynamic processes. *Geol. Geofiz.*, **51**(2), 277-286. (In Russ.)
- Yin X.C., Zhang L.P., Zhang H.H., Yin C., Wang Y., Zhang Y., Peng K., Wang H., Song Z., Yu H., Zhuang J. (2006) LURR's Twenty Years and its Perspective. *Pure Appl. Geophys.*, **163**, 2317-2341. DOI 10.1007/s00024-006-0135-x
- Zakupin A.S., Boginskaya N.V. (2021) Medium-term forecasts of earthquakes by the LURR method on Sakhalin: generalization of retrospective studies for 1997–2019 and new approaches. *Geosistemy Perekhodnykh Zon*, **5**(1), 27-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.027-045>
- Zakupin A.S., Boginskaya N.V., Andreeva M.Yu. (2019) Methodological aspects of the study of foreshock sequences by the SRP method (self-developing processes) on the example of the Nevel earthquake on Sakhalin. *Geosistemy Perekhodnykh Zon*, **3**(4), 377-389. (In Russ.) <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4>
- Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. (2020) Using the Load/Unload Response Ratio and Self-Developing Processes Methods of Analyzing Seismic Sequences to Predict Earthquakes in Sakhalin. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **56**(7), 693-705. DOI: 10.1134/S0001433820070105
- Zakupin A.S., Semenova E.P. (2018) Study of the process of preparing strong earthquakes ($MW > 5$) on Sakhalin by the LURR method. *Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskie Nauki*, **25**(5), 73-88. (In Russ.)