

# Долговременные тренды подпочвенного радона на Камчатке как индикаторы подготовки землетрясений с $M > 7.5$ в северо-западном обрамлении Тихого океана

©2020 П. П. Фирстов<sup>\*1</sup>, Е. О. Макаров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>2</sup>Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия

\*E-mail: firstov@emsd.ru

**Резюме.** В работе приведены результаты мониторинга объемной активности подпочвенного радона в тензочувствительной точке опорного пункта «Паратунка» (PRTR) за 2000–2020 гг. Эманационные наблюдения в данной точке ведутся с целью поиска предвестников сильных землетрясений в вариациях подпочвенного радона. Подготовка землетрясений северо-западного обрамления Тихого океана с глубиной очага  $H < 200$  км и  $M_w > 7.5$ , а в некоторых случаях и меньшей магнитуды, произошедших на расстояниях до 1000 км от PRTR, находит отражение в динамике объемной активности радона (OA Rn) в виде трендов длительностью от 8 мес. до 3 лет. Поведение динамики OA Rn в последние 5 лет указывает на возможное землетрясение с  $M_w > 7.5$  в акватории Тихого океана вблизи восточного побережья п-ова Камчатка, которое может произойти до 01.02.2021 г. Этот вывод согласуется с долгосрочным сейсмическим прогнозом для Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, сделанный в работах С.А. Федотова с А.В. Соломатиным [2017, 2019], согласно которому наиболее высокая вероятность землетрясения с  $M_w \geq 7.7$  приходится на Авачинский залив и южную Камчатку.

**Ключевые слова:** полуостров Камчатка, подпочвенный радон, зона влагонасыщения, долговременные тренды, предвестник, землетрясение

**Для цитирования:** Фирстов П.П., Макаров Е.О. Долговременные тренды подпочвенного радона на Камчатке как индикаторы подготовки землетрясений с  $M > 7.5$  в северо-западном обрамлении Тихого океана. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 3, с. 270–287. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.270-278.279-287>

**For citation:** Firstov P.P., Makarov E.O. Long-term trends of subsoil radon in Kamchatka as indicators for the preparation of earthquakes with  $M > 7.5$  at the northwestern framing of the Pacific Ocean. *Geosistemy pereходnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 270–287. (Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.270-278.279-287>

# Long-term trends of subsoil radon in Kamchatka as indicators for the preparation of earthquakes with $M > 7.5$ at the northwestern framing of the Pacific Ocean

Pavel P. Firstov<sup>\*1</sup>, Evgeniy O. Makarov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kamchatka Branch of the FRC “United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

<sup>2</sup>Kamchatka State University named after Vitus Bering, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

\*E-mail: firstov@emsd.ru

**Abstract.** The paper presents the results of the volume activity monitoring of subsoil radon at the strain-sensitive point of the Paratunka control station (PRTR) for 2000–2020. Emanation observations are carried out at this point in order to search for precursors of strong earthquakes in subsoil radon variations. The preparation of earthquakes at the northwestern framing of the Pacific Ocean with a source depth  $H < 200$  km and  $M_w > 7.5$ , and of a lower magnitude in some cases, which have occurred at the distances up to 1000 km from PRTR, is reflected in the dynamics of radon volume activity (RVA) in the form of trends

lasting from 8 months to 3 years. The behavior of RVA dynamics in the last 5 years points to a possible earthquake with  $M_w > 7.5$  in the Pacific Ocean in the vicinity of the eastern coast of the Kamchatka Peninsula, which may occur before February 1, 2021. This conclusion is consistent with a long-term seismic forecast for the Kuril-Kamchatka seismogenic zone, made in the works of S.A. Fedotov and A.V. Solomatin [2017, 2019], according to which the highest probability of an earthquake with  $M_w \geq 7.7$  falls on the Avacha Bay and Southern Kamchatka.

**Keywords:** Kamchatka Peninsula, subsoil radon, moisture saturation zone, long-term trends, precursor, earthquake

### Финансирование

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-05-00493).*

### Введение

Радон ( $^{222}\text{Rn}$ ), образующийся в результате распада радия и доступный для непрерывной регистрации в воздухе подпочв, очень чувствителен к изменениям геодинамического состояния среды. Это позволяет рассматривать его в качестве индикатора изменений структуры исследуемого участка земной коры, пористости, проницаемости каналов миграции газа, а также как отклик геосреды на внешние воздействия [Адушкин, Спивак, 2014; Рудаков, 2009].

Аномалии в поле радона, как вестник приближающегося землетрясения, широко исследовались в последние десятилетия. С целью поиска предвестников сильных землетрясений во многих сейсмоактивных регионах мира с 1980-х годов велась регистрация объемной активности радона (OA Rn), растворенного в воде и в воздухе подпочв. Сведения об информативности радонового метода для поиска предвестников землетрясений можно найти в обзорных работах [Cicerone et al., 2009; Petraki et al., 2015; Giuseppina, Morelli, 2012; Фирстов, Макаров, 2015].

Краткосрочные предвестники землетрясений с магнитудой  $M > 4.5$  в поле подпочвенного радона с временем упреждения до 15 сут были зарегистрированы во многих районах мира [Inan et al., 2008; Baykara et al., 2009; Фирстов, Макаров, 2018; Бирюлин и др., 2019]. В динамику поля подпочвенного радона существенный вклад вносят метеорологические величины (температура воздуха, атмосферное давление, осадки). Они обуславливают значительную зашумленность (the noise component) исходных данных, затрудняющую выделение предвестниковых

аномалий. Это заставляет применять специальные методы выделения предвестниковых аномалий [Giuseppina, Morelli, 2012; Piersanti et al., 2016; Фирстов и др., 2018; Iwata et al., 2018; Паровик, 2014].

В литературе сравнительно редко встречаются описания среднесрочных и долгосрочных предвестников сильных землетрясений в поле подпочвенного радона. Аномалии в виде длительных трендов перед сильными землетрясениями отмечены для некоторых сильных землетрясений Японии. Перед разрушительным землетрясением Идзу-Осима (Izu Oshima) 14.01.1978 г. с  $M_w = 7.0$  на расстоянии 30 км от эпицентра в течение 2.5 мес. наблюдалась аномалия концентрации подпочвенного Rn, синхронная с вертикальными деформациями земной поверхности [Wakita, 1981; Majumdar, 2004]. Перед мегаземлетрясением Тохоку (Япония) 11.03.2011 г. с  $M_w = 9.0$  в воде артезианской скважины за 4.5 мес. до события начался рост OA Rn, который продолжался и после землетрясения. Общая длительность аномалии составила 8 мес. [Tsunomori et al., 2011].

Наблюдения за поведением OA Rn в течение длительного периода на Петропавловско-Камчатском геодинамическом полигоне позволяют утверждать о наличии определенной связи между OA Rn и сильными землетрясениями с магнитудой  $M_w > 7.5$  северо-западного обрамления Тихого океана [Фирстов, 2014; Фирстов, Макаров, 2018; Фирстов и др., 2018]. Под северо-западным обрамлением Тихого океана подразумевается область, где происходит взаимодействие трех крупнейших на земном шаре плит: Евразийской (EUR), Тихоокеанской (PAC) и Североамериканской

(NAM) (рис. 1). Взаимодействие этих плит сопровождается интенсивными горизонтальными движениями до 9 мм/год, в результате которых возникают сильные землетрясения с  $M_w = 7.5$ –9 на глубинах от нескольких до сотен километров. Рассматриваемый район включает Алеутскую и Курило-Камчатскую сейсмогенные зоны, а также северную часть Японской зоны (рис. 1).

В данной работе подведены итоги двадцатилетних наблюдений за поведением ОА Rn в информативной точке в опорном пункте «Паратунка». По мнению авторов, динамика ОА Rn в этой точке отражает напряженно-деформированное состояние района зоны субдукции, в которой расположен пункт регистрации.

### Аппаратура и методика наблюдений

Сеть мониторинга подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (ПКГП) включает в себя пять пунктов, оснащенных комплексами регистрации подпочвенных газов [Макаров и др., 2012]. В условиях необходимости обеспечивать мониторинг ОА Rn длительное время наиболее надежным и метрологически простым оказался метод ее регистрации в воздухе подпочв по  $\beta$ -излучению продуктов распада RaC и RaB с помощью газоразрядных счетчиков. Многолетняя регистрация Rn в подпочвенном воздухе на сети пунктов ПКГП показала высокую эксплуатационную надежность применяемого оборудования.

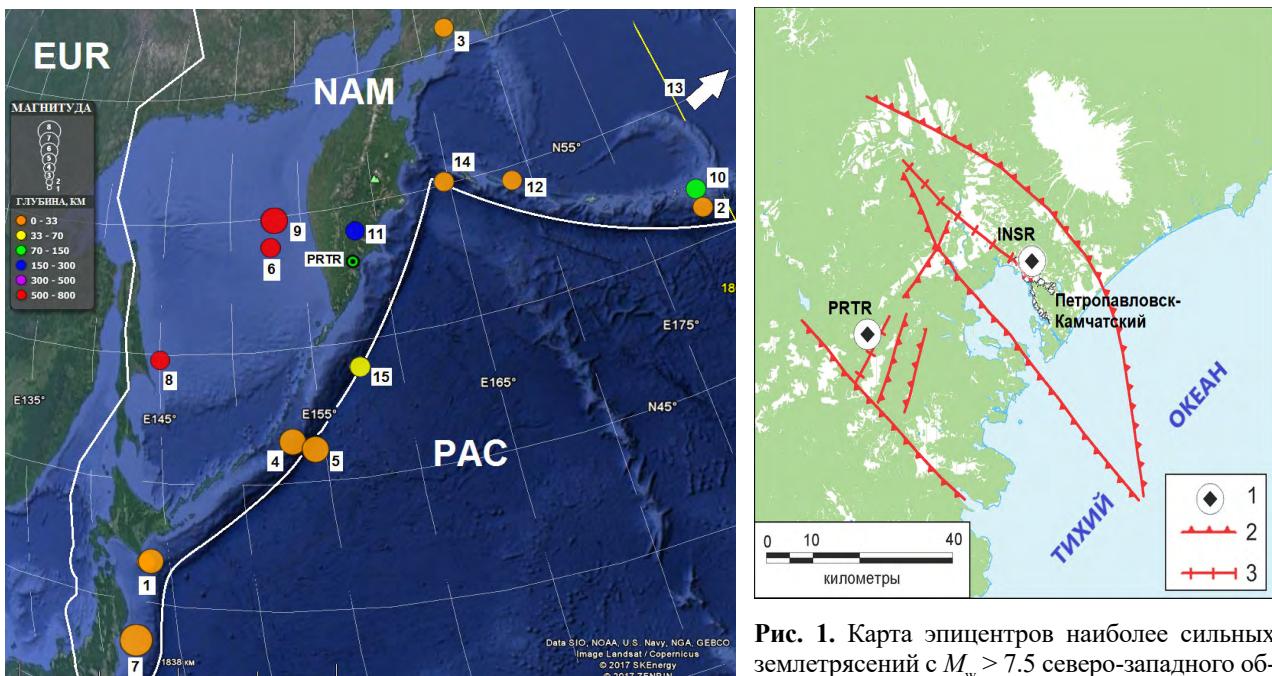
В опорном пункте «Паратунка» (PRTR) (рис. 1) один из датчиков был удачно установлен в зоне влагонасыщения с повышенной тензочувствительностью к изменениям напряженно-деформированного состояния геосреды. Механизм реакций различных геофизических полей, проявляющийся при разнообразных возмущениях напряженно-деформированного состояния среды, определяет тензочувствительность той или иной точки регистрации. Как правило, структурное положение тензочувствительных зон свидетельствует об их принадлежности к подвижным контактам крупных блоков [Киссин, 2011].

Пункт PRTR расположен на речной террасе ручья Коркина, трассирующего субширотный разлом в пределах Паратунского грабена с приуроченной к нему одноименной геотермальной системой, и находится в зоне динамического влияния этого разлома. На расстоянии ~700 м от пункта PRTR ниже по течению ручья наблюдаются естественные выходы термальных вод с содержанием растворенного Rn до 1.5 кБк/м<sup>3</sup>. По данным георадарного профилирования, непосредственно под датчиком находится участок разуплотнения [Фирстов, Макаров, 2018]. На взгляд авторов, наличие зоны динамического влияния разлома, а также участка разуплотнения обеспечивает тензочувствительность данной точки.

В работе использованы данные ОА Rn, полученные с дискретизацией 30 мин с датчика на глубине ~3.5 м в зоне влагонасыщения пункта PRTR. Для минимизации влияния вариаций атмосферного давления исходный временной ряд ОА Rn подвергался барокомпенсации. Затем выполнялась децимация в полусяточном интервале. С целью фильтрации высокочастотной составляющей последним этапом обработки данных было сглаживание скользящим средним в пятисекундном окне [Фирстов, 2014; Фирстов, Макаров, 2018]. Из полученного временного ряда ОА Rn с помощью аддитивной модели [Бокс, Джекинс, 1974] вычиталась сезонная годовая составляющая, обусловленная сезонной вариацией температуры воздуха. Ход полученной кривой сопоставлялся с последовательностью землетрясений с  $M_w > 7.5$  северо-западной окраины Тихого океана.

### Сильные землетрясения северо-западного обрамления Тихого океана в 2000–2020 гг.

В выборку наиболее сильных землетрясений северо-западного обрамления Тихого океана за период с 01.11.2000 по 01.04.2020 г. были включены 13 землетрясений с  $M_w > 7.5$  и два с  $M_w < 7.5$ . Параметры выбранных землетрясений брались из каталога NEIC (National Earthquake Information Center, США, <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/national-earthquake-information-center-neic>).



**Рис. 1.** Карта эпицентров наиболее сильных землетрясений с  $M_w > 7.5$  северо-западного обрамления Тихого океана за 2000–2020 гг. с добавлением Жупановского ( $M_w = 7.2$ ) и землетрясения Углового поднятия ( $M_w = 7.3$ ). Справа схема расположения пунктов регистрации подпочвенного радиона на п-ове Камчатка: 1 – пункты регистрации OA Rn (пункт INSR расположен в другом структурном элементе побережья Авачинского залива и в данной статье не рассматривается); 2 – наиболее крупные разломы; 3 – разломы второго порядка [Попруженко, Зубин, 1997]. Номера землетрясений соответствуют таблице.

**Таблица. Наиболее сильные землетрясения северо-западного обрамления Тихого океана за период 01.11.2000–01.04.2020 гг.**

№	Дата	Время, чч:мм:сс	Координаты		$H$ , км	$M_w$	$R$ , км	Область эпицентра землетрясения
			$\phi^\circ$ с.ш.	$\lambda^\circ$ в.д.				
1	25.09.2003	19:50:27	41.81	143.91	27	8.3	1640	Япония, о. Хокайдо
2	17.11.2003	06:43:06	51.15	178.65	33	7.8	1420	Алеуты, Крысы острова
3	20.04.2006	23:52:02	60.94	167.14	22	7.6	1035	Олюторское, север п-ова Камчатка
4	15.11.2006	11:14:13	46.58	153.27	10	8.3	800	Средние Курилы, вблизи о. Симушир
5	13.01.2007	04:23:21	46.23	154.55	10	8.1	800	
6	05.07.2008	02:12:04	53.88	152.89	632	7.7	370	Охотское море
7	11.03.2011	05:46:24	38.10	142.85	24	9.0	2050	Тохоку мегаземлетрясение
8	14.08.2012	02:59:38	49.80	145.06	583	7.7	980	Охотское море
9	24.05.2013	05:44:48	54.89	153.22	609	8.3	390	Охотоморское землетрясение
10	23.06.2014	20:53:09	51.85	178.74	109	7.9	1400	Алеуты, Крысы острова
11	30.01.2016	03:25:12	54.01	158.01	177	7.2	110	Жупановское землетрясение
12	17.07.2017	23:34:13	54.17	168.82	82	7.7	710	Ближне-Алеутское землетрясение
13	23.01.2018	9:31:40	56.01	149.17	14	7.9	3350	Район Аляски
14	20.12.2018	17:01:55	55.10	164.70	17	7.3	490	Землетрясение Углового поднятия
15	25.03.2020	2:49:21	48.99	157.69	57	7.5	440	Северные Курилы, напротив о-ва Парамушир

Примечание.  $H$  – глубина очага,  $M_w$  – магнитуда,  $R$  – расстояние от эпицентра до PRTR. Выделены землетрясения Курило-Камчатской сейсмогенной зоны.

Дополнительно в выборку из-за близости очага к пункту PRTR (110 км) было включено Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с  $M_w = 7.2$  и  $H = 177$  км [Чебров и др., 2016], а также землетрясение Углового поднятия 20.12.2018 г. с  $M_w = 7.3$  и  $H = 17$  км в зоне сочленения Камчатского и Алеутского океанических желобов [Чебров и др., 2020]. Параметры выбранных землетрясений приведены в таблице, а на рис. 1 показана карта их эпицентров. Карта подготовлена на основе данных GoogleMaps, полученных из открытых источников, с использованием программы MapInfo и цифровой топоосновы масштаба 1 : 1 000 000.

В нашей выборке 9 землетрясений Курило-Камчатской сейсмогенной зоны: 6 с глубинами  $H < 180$  км и 3 чисто субдукционных землетрясения с  $H > 500$  км (выделены красным цветом на карте рис. 1), 4 события в Алеутской сейсмогенной зоне и 2 в районе Японских островов, в том числе мегаземлетрясение Тохоку с  $M_w = 9.0$ .

### Динамика подпочвенного радона в зоне влагонасыщения пункта PRTR

Рассмотрим особенности динамики подпочвенного радона относительно землетрясений нашей выборки (рис. 2). Для всего периода наблюдений среднее значение OA Rn составило  $8.21 \pm 1.07$  кБк/м<sup>3</sup>. На этом фоне в поведении OA Rn можно выделить несколько трендов, когда значение OA Rn плавно возрастало на ~33 % с последующим резким падением на 30 % и более (рис. 2). Длительность таких периодов составила от 8 мес. до 3 лет.

С июля 2003 по декабрь 2005 г. на криевой наблюдался тренд I увеличения значений OA Rn до 20 % с последующим резким бухтообразным падением значений на 30 % ниже начальных величин. Длительность бухты составила почти 1.5 года. Сразу после падения значений OA Rn в районе Курило-Камчатской сейсмогенной зоны начался период сейсмической активизации, включающий цепочку из 3 землетрясений с магнитудами  $M_w = 7.6\text{--}8.3$ . На севере Камчатки в Корякском нагорье 20.04.2006 г. произошло Олюторское землетрясение (№ 3, см. таблицу) с  $M_w = 7.6$ , а затем 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. на средних Курилах возник дуплет Симуширских

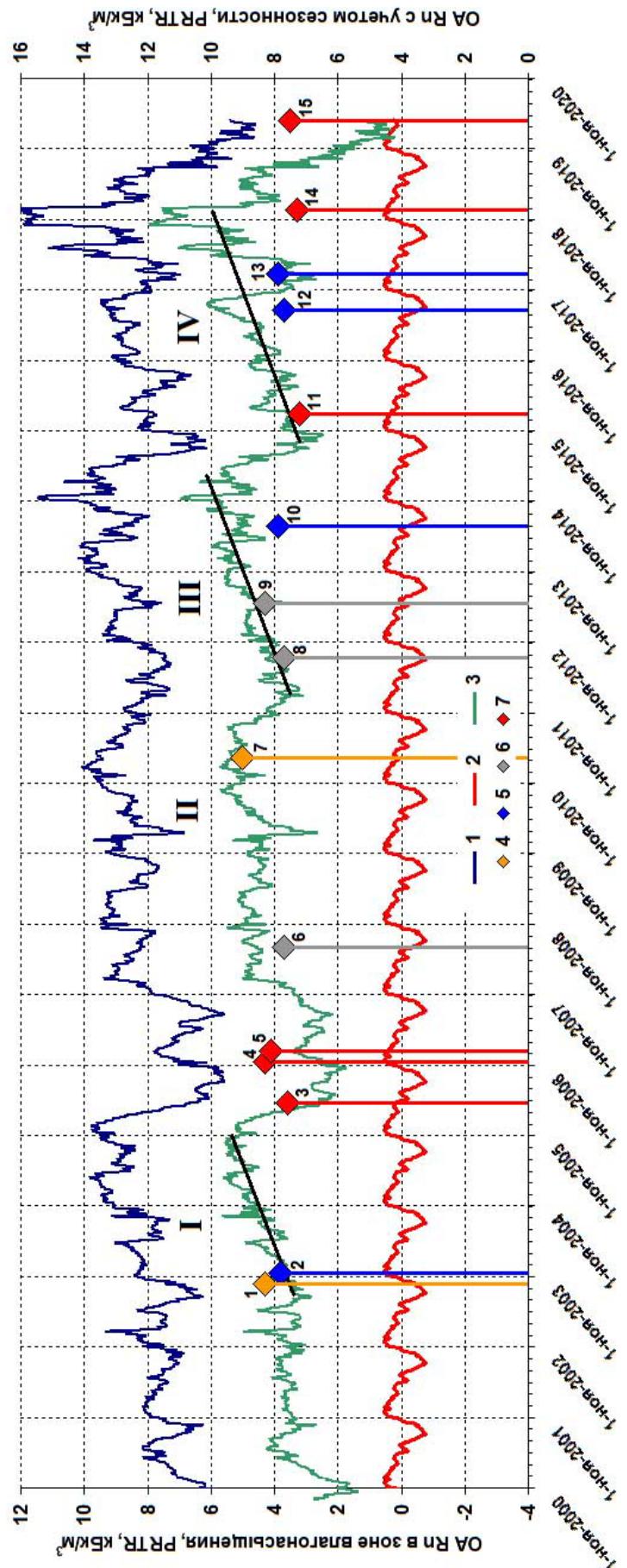
землетрясений с  $M_w = 8.3$  и с  $M_w = 8.1$  (№ 4, 5, см. таблицу) соответственно (рис. 1 и 2).

Подготовка землетрясения 25.09.2003 г. с  $M_w = 8.1$  вблизи о. Хоккайдо не нашла отражение в OA Rn, однако перед мегаземлетрясением Тохоку  $M_w = 9.0$ , произошедшим в Японии 11.03.2011 г. на расстоянии 2100 км от пункта регистрации (№ 7 из таблицы), наблюдался слабо выраженный тренд II роста значений OA Rn, который начался в марте 2010 г. и продолжался 8 мес. до ноября 2010 г. (рис. 2).

Почти три года с января 2012 г. по февраль 2015 г. наблюдался тренд III, когда OA Rn возросла на 33 % с 7.5 до 10 кБк/м<sup>3</sup> (рис. 2). В течение этого периода произошли три землетрясения (№ 8, 9, 10, см. таблицу), отклика на которые в динамике OA Rn не отмечалось. На взгляд авторов, это объясняется тем, что землетрясения № 8, 9 – глубокие землетрясения с  $H > 500$  км, а землетрясение № 10 произошло в Алеутской сейсмогенной зоне на значительном расстоянии от пункта наблюдений (1400 км).

Исходя из поведения тренда III OA Rn, аналогичного тренду I, был сделан среднесрочный прогноз возникновения в ближайшие годы одного или серии сильных землетрясений на глубинах до 70 км в северо-западной окраине Тихого океана, включая его акваторию, примыкающую к п-ову Камчатка. Данный прогноз был опубликован в работах [Фирстов, 2014; Фирстов, Макаров, 2015], а также передан в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений и оценке сейсмической опасности и риска. Произошедшее 30 января 2016 г. Жупановское землетрясение с  $M_w = 7.2$  и глубиной очага  $H = 177$  км (№ 11 из таблицы) рассматривается авторами как частичная реализация этого прогноза [Фирстов и др., 2017].

С октября 2016 г. начался тренд IV, прерывистый и осложненный кратковременным падением OA Rn (рис. 2). После двухлетнего возрастаания OA Rn с 7 до 10 кБк/м<sup>3</sup> в течение 2 мес. (сентябрь–ноябрь 2017 г.) наблюдалось резкое падение OA Rn до начальных значений. В окрестности этого падения произошло Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с  $M_w = 7.7$  (№ 12), которое относится к сильнейшим задуговым мелкофокусным землетрясениям под Беринговым морем. Его эпицентральная зона афтершоков



**Рис. 2.** Динамика OA Rn в зоне влагонасыщения (глубина ~3,5 м) в опорном пункте PRTR за период 01.11.2000–01.04.2020 г. 1 – осредненные исходные данные OA Rn, 2 – аддитивная сезонная модель, 3 – кривая OA Rn за вычетом сезонной составляющей, 4 – землетрясения в районе японских островов, 5 – землетрясения Алеутской дуги, 6 – глубокие землетрясения в районе Охотского моря, 7 – Курило-Камчатские землетрясения с глубиной до 100 км и Жупановское землетрясение с  $H = 177$  км [Фирстов, Макаров, 2018, с добавлениями]. Римскими цифрами обозначены номера трендов.

оценивается в ~500 км, что в 3–5 раз превышает линейные размеры очага для землетрясений с магнитудой 7.7–7.8 [Чебров и др., 2017]. Землетрясение № 13 с  $M_w = 7.9$ , произошедшее на расстоянии 3350 км, не нашло отклика в динамике подпочвенного радона. После этого рост значений ОА Rn продолжился. К декабрю 2018 г. значение ОА Rn достигло максимальных значений за весь период наблюдений – 12 кБк/м<sup>3</sup>, после чего начался резкий спад. В окрестности этого времени произошло землетрясение Углового поднятия с  $M_w = 7.3$  [Чебров и др., 2020]. После пятимесячного перерыва ОА Rn начала вновь падать, и в настоящее время значение ОА Rn минимальное за весь период наблюдений – 5 кБк/м<sup>3</sup>.

Методом наименьших квадратов для I, III и IV трендов вычислялась линейная зависимость ОА Rn (Бк/м<sup>3</sup>) =  $f(t)$  (сут). Все три зависимости (1)–(3), аппроксимирующие тренды, очень близки между собой:

$$\text{I } \text{OA Rn (Бк/м}^3\text{)} = 0.0026 \cdot t \text{ (сут)} - 100.11, \quad (1)$$

$$\text{III } \text{OA Rn (Бк/м}^3\text{)} = 0.0027 \cdot t \text{ (сут)} - 100.64, \quad (2)$$

$$\text{IV } \text{OA Rn (Бк/м}^3\text{)} = 0.0022 \cdot t \text{ (сут)} - 86.79. \quad (3)$$

Схожесть линейных зависимостей (1)–(3) свидетельствует о едином процессе, происходящем в зоне Паратунского грабена перед сильными землетрясениями северо-западного обрамления Тихого океана с эпицентрами на расстоянии до 1000 км от пункта регистрации PRTR.

Рассмотрим зависимость проявления предвестников в поле подпочвенного радона от эпицентрального расстояния для землетрясений с  $M_w > 7.5$  согласно таблице. На рис. 3 выделено поле, ограниченное землетрясениями № 11, 4, 3, 14, в которое попадают все землетрясения, произошедшие после выделенных трендов (см. рис. 2). На основании рис. 3 можно сделать следующие выводы.

1. Подготовка землетрясений с  $M_w > 7.5$ , а в некоторых случаях и меньшей магнитуды, произошедших на расстояниях до 1000 км от пункта регистрации PRTR, с глубиной очага  $H < 200$  км (№ 3, 4, 5, 11, 12, 14, 15), находит отражение в динамике подпочвенного радона в зоне полного влагонасыщения.

2. Подготовка сильных глубоких ( $M_w > 7.7$ ,  $H > 500$  км) субдукционных землетрясений (№ 6, 8, 9) в динамике подпочвенного радона явного проявления не имеет.



Рис. 3. Соотношение между магнитудой и расстоянием от пункта наблюдений до эпицентра рассмотренной выборки землетрясений с  $M_w > 7.5$  с добавлениями Жупановского землетрясения и землетрясения Углового поднятия. Красными кружками отмечены землетрясения, подготовка которых нашла отражение в поле подпочвенного радона, желтым цветом выделено поле (в координатах  $M_w$  и  $R$ ) действия отклика подпочвенного радона на сильные землетрясения региона. Номера соответствуют номерам землетрясений в таблице.

3. Для сильных событий, произошедших на расстояниях более 1000 км от пункта регистрации PRTR, также не наблюдается предвестниковых трендов. Даже подготовка мегаземлетрясения Тохоку с  $M_w = 9.0$  (№ 7) очень слабо отразилась в поле подпочвенного радона.

## Заключение

Результаты мониторинга ОА Rn в течение 2000–2020 гг. на п-ове Камчатка в опорном пункте «Паратунка» (PRTR), полученные методом пассивной регистрации в накопительной камере, показали следующее. Подготовка землетрясений северо-западного обрамления Тихого океана с глубиной очага  $H < 200$  км и  $M_w > 7.5$ , а в некоторых случаях и меньшей магнитуды, произошедших на расстояниях до 1000 км от PRTR, находит отражение в динамике ОА Rn. Выделено 4 периода длительностью от 8 мес. до 3 лет, когда значение ОА Rn плавно возрастало на ~33 % с последующим резким падением на 30 % и более. Тренды I и III периодов предшествовали землетрясениям с  $M_w = 7.2$ –8.1 на расстоянии до 1000 км от PRTR в районе, приуроченном к северо-западному обрамлению Тихого океана. Тренд IV длительностью ~3 года (2016–2018)

в максимуме имел самые большие значения ОА Rn, а в последние два года отмечено падение значений ОА Rn до минимальных за весь период наблюдений. Следует добавить, что подобное поведение динамики ОА Rn наблюдалось и в пункте INSR (рис. 1), расположенному в другом структурном элементе побережья Авачинского залива.

На основании наблюдаемой корреляции трендов динамики ОА Rn и сильных землетрясений можно с большой долей вероятности прогнозировать возможное сильное землетрясение в районе п-ова Камчатка. Следует отметить, что после падения значений ОА Rn по окончании тренда IV уже произошло два события: землетрясение Углового поднятия с  $M_w = 7.3$  (№ 14 в таблице и на рис. 1 и 3)

и внутриплитовое землетрясение с  $M_w = 7.5$  (№ 15). Однако особенности динамики ОА Rn указывают на большую вероятность землетрясения с  $M_w > 7.5$  в районе п-ова Камчатка. Исходя из предшествующих наблюдений, прогнозируемое землетрясение следует ожидать до 1 февраля 2021 г. Эти данные согласуются с долгосрочным сейсмическим прогнозом для Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, сделанным в работах С.А. Федотова с А.В. Соломатиным [2017, 2019], согласно которому наиболее высокая вероятность землетрясения с  $M_w \geq 7.7$  приходится на Авачинский залив и южную Камчатку. Интенсивность такого землетрясения в г. Петропавловск-Камчатский может быть более 7 баллов.

## Список литературы

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. **2014.** *Физические поля в приповерхностной геофизике.* М.: ГЕОС, 349 с.
2. Бокс Дж., Дженкинс Г. **1974.** *Анализ временных рядов. Прогноз и управление.* М.: Мир, 406 с.
3. Бирюлин С.В., Козлова И.А., Юрков А.К. **2019.** Исследование информативности объемной активности почвенного радона при подготовке и реализации тектонических землетрясений на примере Южно-Курильского региона. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 4(44): 73–83.  
doi:10.31431/1816-5524-2019-4-44-73-83
4. Киссин И.Г. **2011.** Тензочувствительность флюидонасыщенных сред. *Вулканология и сейсмология*, 3: 34–45. doi:10.1134/S0742046311030055.
5. Паровик Р.И. **2014.** *Математические модели классической теории эманационного метода.* Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 128 с.
6. Попруженко С.В., Зубин М.И. **1997.** Тектоника и некоторые особенности сейсмичности шельфовой зоны Авачинского залива и прилегающих районов. *Вулканология и сейсмология*, 2: 74–82.
7. Рудаков В.П. **2009.** *Эманационный мониторинг геосред и процессов.* М.: Научный мир, 175 с.
8. Федотов С.А., Соломатин А.В. **2017.** Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV. 2016 – III. 2021 гг., его развитие и применение; особенности сейсмичности Курило-Камчатской дуги до и после глубокого Охотоморского землетрясения 24.V.2013 г.,  $M = 8.3$ . *Вулканология и сейсмология*, 3: 3–17. <https://doi.org/10.7868/S0203030617030014>
9. Федотов С.А., Соломатин А.В. **2019.** Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019–V 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017–V 2019 гг. Развитие и практическое применение метода ДССП. *Вулканология и сейсмология*, 6: 6–22. <https://doi.org/10.31857/s0203-0306201966-22>
10. Фирстов П.П. **2014.** Возможности прогноза сильных землетрясений по данным радонового мониторинга на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 2(1): 232–245.
11. Фирстов П.П., Макаров Е.О. **2015.** Реакция подпочвенного и растворенного в подземных водах радона на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры. *Сейсмические приборы*, 51(4): 58–80.
12. Фирстов П.П., Макаров Е.О. **2018.** *Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения.* Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 148 с.
13. Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухова И.П. **2017.** Особенности динамики подпочвенных газов перед Жупановским землетрясением 30.01.2016 г. с  $M = 7.2$  (Камчатка). *Доклады Академии наук*, 472(4): 462–465. doi:10.7868/s0869565217040144
14. Фирстов П.П., Макаров Е.О. Глухова И.П., Будилов 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

15. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Дроздина С.Я., Иванова Е.И., Матвеенко Е.А., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Раевская А.А. и др. **2016.** Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с  $K_s = 15.7$ ,  $M_w = 7.2$ , I = 6 (Камчатка). *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(29): 5–16.
16. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Ландер А.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Титиков Н.Н. **2017.** Ближнее Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с  $M_w = 7.8$  на границе Командорской бреши. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 3(35): 22–25.
17. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др. **2020.** Землетрясение Углового поднятия 20 декабря 2018 г.  $M_w = 7.3$  в зоне сочленения Камчатского и Алеутского океанических желобов. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(45): 100–117. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-1-45-100-117>
18. Baykara O., İnceöz M., Doğru M., Aksoy E., Külahçı F. **2009.** Soil radon monitoring and anomalies in East Anatolian Fault System (Turkey). *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1(279): 159–164. <https://doi.org/10.1007/s10967-007-7211-2>
19. Cicerone R.D., Ebel J.E., Beittor J.A. **2009.** Systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 476: 371–396. <https://doi:10.1016/j.tecto.2009.06.008>.
20. Immè G., Morelli D. **2012.** Radon as earthquake precursor. In: D'Amico S. (ed.) *Earthquake research and analysis – statistical studies, observations and planning*, 143–160. <https://doi.org/10.5772/29917>
21. Iwata D., Nagahama H., Muto J., Yasuoka Y. **2018.** Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes. *Scientific Reports*, 8(13028). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31341-5>
22. İnan S., Akgu T., Cemil S. **2008.** Geochemical monitoring in the Marmara region (NW Turkey): A search for precursors of seismic activity. *J. of Geophysical Research*, 113: B03401. <https://doi.org/10.1029/2007JB005206>
23. Majumdar K. **2004.** A study of fluctuation in radon concentration behaviour as an earthquake precursor. *Current science*, 9(86): 1288–1292.
24. Petraki E., Nikolopoulos D., Panagiotaras D., Cantzos D., Yannakopoulos P., Nomicos C., Stonham J. **2015.** Radon-222: A potential short-term earthquake precursor. *J. of Earth Science and Climatic Change*, 6(6): 000282. doi:10.4172/2157-7617.1000282
25. Piersanti A., Cannelli V., Galli G. **2016.** The Pollino 2012 seismic sequence: clues from continuous radon monitoring. *Solid Earth*, 7: 1303–1316. <https://doi.org/10.5194/se-7-1303-2016>
26. Tsunomori F., Tanaka H., Murakami M., Tasaka S. **2011.** Seismic response of dissolved gas in groundwater. In: *Proceedings of the 10th Taiwan-Japan Intern: Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, October 25, Taiwan, National Cheng Kung University*. Tainan, 29–35.
27. Wakita H. **1981.** Precursory changes in ground water prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake. *Earthquake Prediction: An Intern. Review*, 4: 527–532. <https://doi.org/10.1029/ME004p0527>

## Об авторах

**ФИРСТОВ** Павел Павлович (ORCID: 0000-0003-1658-5165, ResearcherID: AAC-5308-2020), доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией акустического и радонового мониторинга, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Петропавловск-Камчатский, firstov@emsd.ru

**МАКАРОВ** Евгений Олегович (ORCID: 0000-0002-0462-3657, ResearcherID: AAL-1711-2020), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, лаборатория акустического и радонового мониторинга, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН); заведующий лабораторией, Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга (КамГУ им. Витуса Беринга), г. Петропавловск-Камчатский, ice@emsd.ru

# Long-term trends of subsoil radon in Kamchatka as indicators for the preparation of earthquakes with $M > 7.5$ at the northwestern framing of the Pacific Ocean

©2020 Pavel P. Firstov<sup>\*1</sup>, Evgeniy O. Makarov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kamchatka Branch of the FRC “United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

<sup>2</sup>Kamchatka State University named after Vitus Bering, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

\*E-mail: firstov@emsd.ru

**Abstract.** The paper presents the results of the volume activity monitoring of subsoil radon at the strain-sensitive point of the Paratunka control station (PRTR) for 2000–2020. Emanation observations are carried out at this point in order to search for precursors of strong earthquakes in subsoil radon variations. The preparation of earthquakes at the northwestern framing of the Pacific Ocean with a source depth  $H < 200$  km and  $M_w > 7.5$ , and of a lower magnitude in some cases, which have occurred at the distances up to 1000 km from PRTR, is reflected in the dynamics of radon volume activity (RVA) in the form of trends lasting from 8 months to 3 years. The behavior of RVA dynamics in the last 5 years points to a possible earthquake with  $M_w > 7.5$  in the Pacific Ocean in the vicinity of the eastern coast of the Kamchatka Peninsula, which may occur before February 1, 2021. This conclusion is consistent with a long-term seismic forecast for the Kuril-Kamchatka seismogenic zone, made in the works of S.A. Fedotov and A.V. Solomatin [2017, 2019], according to which the highest probability of an earthquake with  $M_w \geq 7.7$  falls on the Avacha Bay and Southern Kamchatka.

**Keywords:** Kamchatka Peninsula, subsoil radon, moisture saturation zone, long-term trends, precursor, earthquake

**For citation:** Firstov P.P., Makarov E.O. Long-term trends of subsoil radon in Kamchatka as indicators for the preparation of earthquakes with  $M > 7.5$  at the northwestern framing of the Pacific Ocean. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 270–287. (Russ. & Engl.).  
<https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.3.270-278.279-287>

**Funding.** This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 20-05-00493).

## Introduction

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ), which is formed as a result of radium decay and available for continuous registration in the air of subsoils, is very sensitive to the changes in geodynamics state of the environment. This allows us to consider it as an indicator of changes in the structure of the studied area of the earth crust, porosity, permeability of gas migration channels, as well as the geo-

logical medium response to external influence [Adushkin, Spivak, 2014; Rudakov, 2009].

The radon field anomalies have been extensively studied during the last decades. To search for precursors of strong earthquakes in many seismically active regions all over the world, the radon volume activity (RVA) dissolved in water and in the air of subsoils has been recorded since the 1980s. Data on informative

---

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Фирстов П.П., Макаров Е.О. Долговременные тренды подпочвенного радона на Камчатке как индикаторы подготовки землетрясений с  $M > 7.5$  в северо-западном обрамлении Тихого океана. *Translation by G.S. Kachesova.*

value of the radon method for the earthquakes' precursors searching can be found in the review works [Cicerone et al., 2009; Petraki et al., 2015; Giuseppina, Morelli, 2012; Firstov, Makarov, 2015].

Short-term precursors of earthquakes with a magnitude  $M > 4.5$  in the field of subsoil radon with the lead time up to 15 days have been recorded in many regions around the world [inan et al., 2008; Baykara et al., 2009; Firstov, Makarov, 2018; Biryulin et al., 2019]. The meteorological parameters (air temperature, atmospheric pressure, precipitation) make a significant contribution to the dynamics of the field of subsoil radon. They condition the significant noise component of the initial data, which makes it difficult to distinguish the precursor anomalies. This forces to use special methods for precursor anomalies identifying [Giuseppina, Morelli, 2012; Piersanti et al., 2016; Firstov et al., 2018; Iwata et al., 2018; Parovik, 2014].

There are not many descriptions of mid- and long-term precursors of strong earthquakes in the field of subsoil radon in the literature. Anomalies in the form of long-term trends prior to strong earthquakes have been noted for some powerful events in Japan. The anomaly in the concentration of subsoil Rn synchronous with vertical deformations of the earth's crust was being observed for 2.5 months before the Izu Oshima destructive earthquake on January 1, 1978 with  $M_w = 7.0$  at a distance of 30 km from the epicenter [Wakita, 1981; Majumdar, 2004]. The RVA began to increase in the water of the artesian well for 4.5 months before the Tohoku (Japan) mega-earthquake on March 11, 2011 with  $M_w = 9.0$  and continued to grow after it. The total duration of the anomaly amounted for eight months [Tsunomori et al., 2011].

Observations of the RVA behavior during a long period at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic polygon allow to say about the presence of a defined relation between the RVA and strong earthquakes with a magnitude  $M_w > 7.5$  in the northwestern framing of the Pacific Ocean [Firstov, 2014; Firstov, Makarov, 2018; Firstov et al., 2018]. The northwestern framing of the Pacific Ocean refers to the area where the interac-

tion of the Eurasian (EUR), Pacific (PAC), and North American (NAM) three largest plates occurs (Fig. 1). These plates interaction is accompanied with intensive horizontal movements up to 9 mm/year, which result in strong earthquakes with  $M_w = 7.5\text{--}9$  at depths from several to hundreds of kilometers. The studied area includes the Aleutian and Kuril-Kamchatka seismogenic zones, as well as the northern part of the Japan zone (Fig. 1).

This work summarizes the results of twenty years of observations of the RVA behavior in the informative point at the "Paratunka" control station. The authors believe the dynamics of the RVA in this point to reflect the stress-strain state of the key-block of the subduction zone region where the registration point is located.

## Equipment and observational methods

Subsoil radon monitoring network at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic polygon (PKG) involves five stations equipped with the subsoil gases registration complexes [Makarov et al., 2012]. Under the conditions of necessity to ensure continuous monitoring for a long time, the method of its registration in the subsoil air by the  $\beta$ -radiation of RaC and RaB decay products using gas-discharge counter appeared to be the most metrologically simple and reliable. Long-term registration of Rn in the subsoil air in the PKGP stations network has shown high functional reliability of applied equipment.

At the "Paratunka" control station (PRTR) (Fig. 1 b), one of the sensors was successfully installed in the moisture saturation zone with a heightened strain sensitivity to changes in the stress-strain state of the geological medium. The mechanism of reactions of the various geophysical fields, manifested under different disturbances of the stress-strain state of the medium, determines the strain sensitivity of a particular registration point. As usual, the structure position of strain-sensitive zones indicates their belonging to the mobile contacts of the large blocks [Kissin, 2011].

The PRTR station is located on the river terrace of the Korkin stream, which traces the sub-

latitudinal fault within the Paratunka graben with the associated geothermal system of the same name and situates in a zone of dynamic influence of this fault. Natural outcrops of geothermal waters with the dissolved Rn content up to  $1.5 \text{ kBq/m}^3$  are observed down the stream at a distance of  $\sim 700 \text{ m}$  from the PRTR station. According to the data of GPR profiling, there is decompactification area immediately under the sensor [Firstov, Makarov, 2018]. The authors suppose, that the presence of a zone of dynamic influence of the fault as well as the decompactification area provides strain sensitivity of this point.

In this work, we used the RVA data obtained with the 30 min discretization from the sensor at a depth of  $\sim 3.5 \text{ m}$  in the moisture saturation zone of the PRTR station. The RVA time series was barometrically compensated in order to minimize the influence of atmospheric pressure variations. Then a decimation was performed within a semidiurnal interval. In order to filter the high-frequency component, the last step of the data treatment was a moving average smoothing in a five-day window [Firstov, 2014; Firstov, Ma-

karov, 2018]. The seasonal annual component conditioned by the seasonal variation in air temperature was being subtracted from the obtained RVA time series using the additive model [Box, Jenkins, 1974]. The course of the obtained curve was compared with the sequence of earthquakes with  $M_w > 7.5$  in the northwestern margin of the Pacific Ocean.

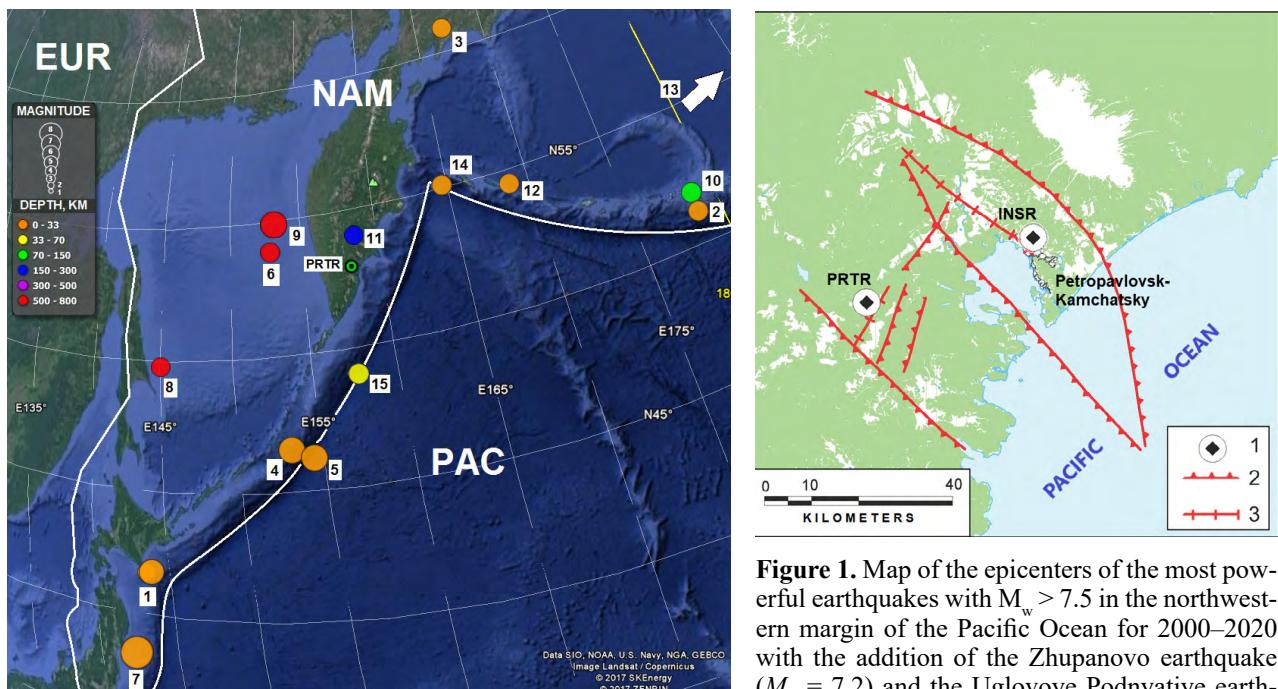
### Strong earthquakes in the northwestern framing of the Pacific Ocean in 2000–2020

The sampling of the most powerful earthquakes in the northwestern framing of the Pacific Ocean in the period from 01.11.2000 to 01.04.2020 included 13 earthquakes with  $M_w > 7.5$  and two with  $M_w < 7.5$ . The parameters of the selected earthquakes were taken from the NEIC (National Earthquake Information Center, USA, <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/national-earthquake-information-center-neic>) catalogue. The Zhupanovo earthquake on January 30, 2016 with  $M_w = 7.2$  and  $H = 177 \text{ km}$  [Chebrov et

**Table. The most powerful earthquakes in the northwestern framing of the Pacific Ocean for the period of 1.11.2000 – 01.04.2020**

№	Date	Time, hh:mm:ss	Coordinates		$H, \text{ km}$	$M_w$	$R, \text{ km}$	Area of the earthquake epicenter
			$\varphi^\circ \text{ N}$	$\lambda^\circ \text{ E}$				
1	25.09.2003	19:50:27	41.81	143.91	27	8.3	1640	Japan, Hokkaido Island
2	17.11.2003	06:43:06	51.15	178.65	33	7.8	1420	Aleuts, Rat islands
3	20.04.2006	23:52:02	60.94	167.14	22	7.6	1035	Olutorsk, north of the Kamchatka Peninsula
4	15.11.2006	11:14:13	46.58	153.27	10	8.3	800	Middle Kurils, in the vicinity of
5	13.01.2007	04:23:21	46.23	154.55	10	8.1	800	Simushir Island
6	05.07.2008	02:12:04	53.88	152.89	632	7.7	370	The Sea of Okhotsk
7	11.03.2011	05:46:24	38.10	142.85	24	9.0	2050	Tohoku mega-earthquake
8	14.08.2012	02:59:38	49.80	145.06	583	7.7	980	The Sea of Okhotsk
9	24.05.2013	05:44:48	54.89	153.22	609	8.3	390	Okhotomorsk earthquake
10	23.06.2014	20:53:09	51.85	178.74	109	7.9	1400	Aleuts, Rat islands
11	30.01.2016	03:25:12	54.01	158.01	177	7.2	110	Zhupanovo earthquake
12	17.07.2017	23:34:13	54.17	168.82	82	7.7	710	Near Islands Aleutian earthquake
13	23.01.2018	9:31:40	56.01	149.17	14	7.9	3350	Alaska area
14	20.12.2018	17:01:55	55.10	164.70	17	7.3	490	Uglovoye Podnyatiye earthquake
15	25.03.2020	2:49:21	48.99	157.69	57	7.5	440	North Kurils, opposite to Paramushir Island

*Note.  $H$  – focal depth,  $M_w$  – magnitude,  $R$  – distance from epicenter to the PRTR. The earthquakes of the Kuril-Kamchatka seismogenic zone are highlighted in grey.*



**Figure 1.** Map of the epicenters of the most powerful earthquakes with  $M_w > 7.5$  in the northwest margin of the Pacific Ocean for 2000–2020 with the addition of the Zhupanova earthquake ( $M_w = 7.2$ ) and the Uglovoye Podnyatiye earthquake ( $M_w = 7.3$ ). On the right is a location scheme of subsoil radon control stations on the Kamchatka Peninsula: 1 – RVA control stations (the INSR station is located in the other structure element of the coast of the Avacha Bay and not considered in this work); 2 – the largest faults; 3 – faults of the second order [Popruzhenko, Zubin, 1997]. The numbers of earthquakes correspond to the Table.

al., 2016], as well as the Uglovoye Podnyatiye earthquake on December 20, 2018 with  $M_w = 7.3$  and  $H = 17$  km in the junction zone of Kamchatka and Aleutian oceanic trenches [Chebrov et al., 2020] were added in the sampling due to the focus proximity to the PRTR station (110 km). The parameters of the selected earthquakes are given in the table, and their epicenters map is shown in Figure 1. The map has been prepared based on the GoogleMaps data from the open sources using the MapInfo software and the digital topographic base on a scale of 1 : 1 000 000.

Our sampling contains 9 earthquakes of the Kuril-Kamchatka seismogenic zone: 6 with  $H < 180$  km and 3 purely subduction earthquakes with  $H > 500$  km (highlighted in red on the map in Figure 1), 4 events in the Aleutian seismogenic zone, and 2 in the area of the Japanese Archipelago including the Tohoku mega-earthquake with  $M_w = 9.0$ .

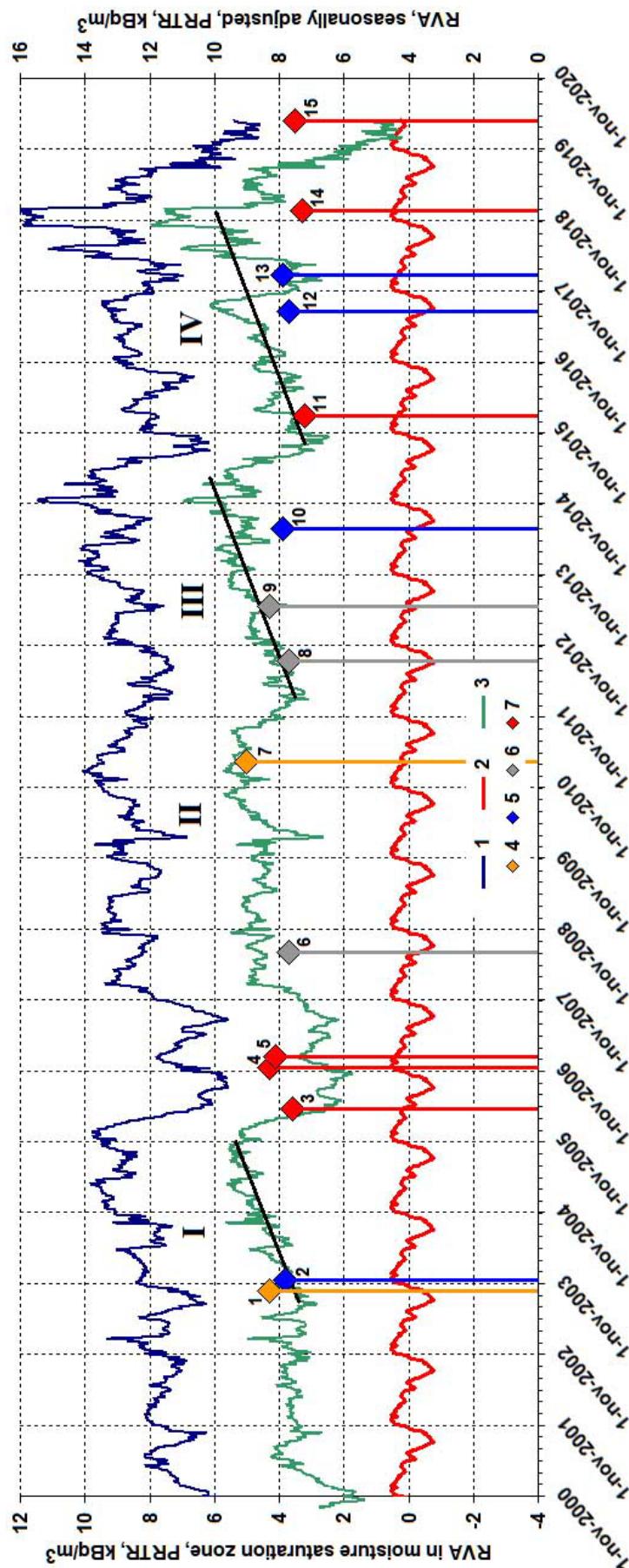
### Subsoil radon dynamics in the moisture saturation zone of the PRTR station

Let us consider the features of the subsoil radon dynamics with respect to the earthquakes from our sampling (Fig. 2). The average

value of the RVA was  $8.21 \pm 1.07$  kBq/m<sup>3</sup> for the whole observation period. Against this background, some trends can be distinguished in the RVA behavior, when the RVA value has smoothly increased by ~ 33 % followed by a sharp decrease by 30 % or more (Fig. 2). Such periods duration ranged from 8 months to 3 years.

From July 2003 to December 2005, the curve showed the trend I of the RVA increase up to 20 %, followed by a sharp bay drop of the values by 30 % lower than the initial values. The bay duration amounted for almost 1.5 years. Just after the drop of the RVA values, the seismic activation period including the chain of 3 earthquakes with magnitudes  $M_w = 7.6$ –8.3 has begun in the area of Kuril-Kamchatka seismogenic zone. In the Koryak Highlands on the north of Kamchatka, the Olutorsk earthquake (no. 3, see the Table) with  $M_w = 7.6$  occurred on April 20, 2006, and then the duplet of Simushir earthquakes with  $M_w = 8.3$  and  $M_w = 8.1$  (no. 4 and 5, see the Table) occurred in the Middle Kurils on November 15, 2006 and January 13, 2007, respectively (Fig. 1 and 2).

The preparation of the earthquake on September 25, 2003 with  $M_w = 8.1$  in the vicinity



**Figure 2.** Dynamics of radon volume activity in the moisture saturation zone (depth of ~3.5 m) in the PRTR control station for the period from November 1, 2000 to April 1, 2020. 1 – initial data of the RVA, 2 – additive seasonal model, 3 – curve of the RVA data except for the seasonal component, 4 – earthquakes in the region of the Japanese Archipelago, 5 – earthquakes of the Aleutian arc, 6 – deep earthquakes in the region of the Sea of Okhotsk, 7 – Kuril-Kamchatka earthquakes with a depth up to 100 km and Zhupanovo earthquake with  $H = 177$  km [Firstov, Makarov, 2018, with additions]. Trends numbers are marked with the Roman numerals.

of Hokkaido Island was not reflected in the RVA data, however, prior to the Tohoku mega-earthquake with  $M_w = 9.0$ , which occurred in Japan on March 11, 2011 at a distance of 2100 km from the registration point (no. 7 from the Table), the weak trend **II** of the RVA values increase was being observed, which had begun in March 2010 and lasted for 8 months until November 2010 (Fig. 2).

For almost three years, from January 2012 to February 2015, the trend **III**, when the RVA increased by 33 % from 7.5 up to 10 kBq/m<sup>3</sup>, was being observed (Fig. 2). During this period, three earthquakes (no. 8, 9, 10, see the Table) occurred, the response to which was not observed in the RVA dynamics. The authors believe it to be explained by the fact that no. 8, 9 earthquakes are deep with  $H > 500$  km, and no. 10 earthquake has occurred in the Aleutian seismogenic zone at a considerable distance from the observation point (1400 km).

Based upon the behavior of the trend **III** of the RVA, similar to the trend **I**, the mid-term forecast was made for the occurrence in the coming years of one or a series of strong earthquakes at depths up to 70 km in the northwestern margin of the Pacific Ocean, including its water area adjacent to the Kamchatka Peninsula. This forecast was published in the works [Firstov, 2014; Firstov, Makarov, 2015], and was also reported to the Kamchatka Branch of Russian Expert Council on earthquake prediction and assessment of seismic hazard. The authors consider the Zhupanova earthquake (no. 11 from the Table) with  $M_w = 7.2$  and focal depth  $H = 177$  km, which occurred on January 30, 2016, as a partial forecast realization [Firstov et al., 2017].

Since October 2016, the trend **IV** intermittent and complicated with short duration decrease of the RVA (Fig. 2) has begun. After two-year increasing of the RVA from 7 to 10 kBq/m<sup>3</sup>, the sharp drop of the RVA down to the initial values was being observed for 2 months (September–November 2017). In the vicinity of this drop, the Near Aleutian earthquake with  $M_w = 7.7$  (no. 12) occurred on July 17, 2017, which was one of the most powerful back-arc shallow-focus earthquakes under the Bering Sea. Its epicentral aftershocks zone is estimated

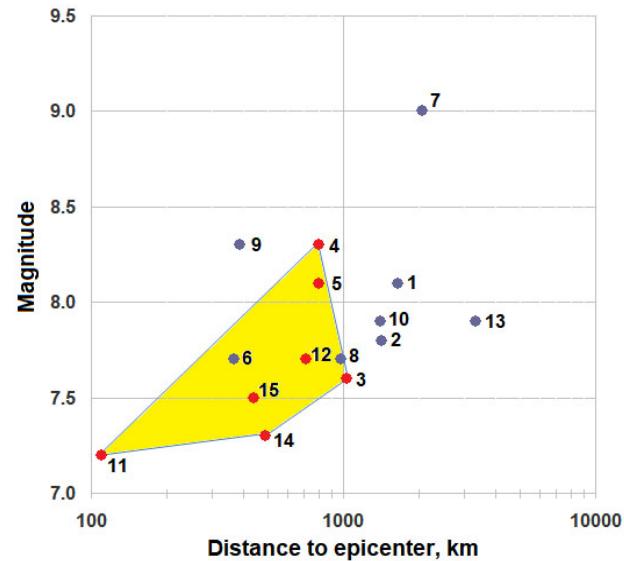
of ~500 km, that 3–5 times greater than the linear dimensions of the source of the earthquakes with a magnitude of 7.7–7.8 [Chebrov et al., 2017]. The no. 13 earthquake with  $M_w = 7.9$ , which had occurred at a distance of 3350 km, did not elicit a response in the dynamics of subsoil radon. The RVA values continued to grow after that. The RVA reached its maximum value of 12 kBq/m<sup>3</sup> for the entire observation period to December 2018, after which the sharp decrease had begun. The Uglovoye Podnyatiye earthquake with  $M_w = 7.3$  occurred close to this time [Chebrov et al., 2020]. After a five-months break, the RVA has begun to decrease again, and at present time it has a minimum value of 5 kBq/m<sup>3</sup> for the entire observation period.

The linear dependence of RVA (Bq/m<sup>3</sup>) =  $f(t)$  (day), has been computed by the less square method for the **I**, **II**, and **III** trends. All three dependences (1)–(3) approximating the trends are very similar to each other:

$$\text{I RVA (Bq/m}^3\text{)} = 0.0026 \cdot t \text{ (day)} - 100.11, \quad (1)$$

$$\text{III RVA (Bq/m}^3\text{)} = 0.0027 \cdot t \text{ (day)} - 100.64, \quad (2)$$

$$\text{IV RVA (Bq/m}^3\text{)} = 0.0022 \cdot t \text{ (day)} - 86.79. \quad (3)$$



**Figure 3.** The relationship between magnitude and distance from the observation point to the epicenter of the considered sampling of earthquakes with  $M_w > 7.5$  with addition of the Zhupanova and the Uglovoye Podnyatiye earthquakes. The earthquakes, the preparation of which was reflected in the field of subsoil radon, are marked with red circles, the field (in  $M_w$ –R coordinates) of the response of subsoil radon to strong earthquakes in the region is highlighted in yellow. The numbers correspond to the earthquakes in the Table.

Similarity of the linear dependences (1)–(3) testifies to the unified process occurring in a zone of the Paratunka graben prior to the strong earthquakes in the northwestern framing of the Pacific Ocean with the epicenters at a distance up to 1000 km from the PRTR control station.

Let us consider the dependence of precursors manifestation in the field of subsoil radon on epicentral distance for the earthquakes with  $M_w > 7.5$  according to the table. The Figure 3 shows the field bounded with no. 11, 4, 3, 14 earthquakes. This field contains all the earthquakes occurred after the marked trends (see Fig. 2).

Based upon Figure 3, the following conclusions can be made.

1. Preparation of earthquakes with  $M_w > 7.5$ , and, in some cases, of less magnitude, which have occurred at a distance up to 1000 km from the PRTR control station having focal depth  $H < 200$  km (no. 3, 4, 5, 11, 12, 14, 15), reflects in the dynamics of subsoil radon in a zone of complete moisture saturation.

2. Preparation of strong deep ( $M_w > 7.7$ ,  $H > 500$  km) subduction earthquakes (no. 6, 8, 9) has not clear manifestation in the dynamics of subsoil radon.

3. For strong events occurred at distances of more than 1000 km from the PRTR control station, no precursor trends are also observed. Even the Tohoku mega-earthquake preparation with  $M_w = 9.0$  (no. 7) has very weakly reflected in the field of subsoil radon.

## Conclusion

The results of RVA monitoring during 2000–2020 on the Kamchatka Peninsula at the “Paratunka” (PRTR) control station obtained using the method of passive detection in accumulative chamber have shown the following. The preparation of earthquakes at the northwestern framing of the Pacific Ocean with a source depth  $H < 200$  km and  $M_w > 7.5$ , and of a lower magnitude in some cases, which have occurred at the

distances up to 1000 km from the PRTR, is reflected in the dynamics of radon volume activity (RVA). Four periods lasting from 8 months to 3 years, when RVA values had gradually increased by ~33 % followed by sharp drop by ~30 % and more were identified. The trends of the I and III periods have preceded the earthquakes with  $M_w = 7.2$ –8.1 at the distance up to 1000 km from the PRTR in the area, which belongs to the northwestern framing of the Pacific Ocean. The trend IV with a duration of ~3 years (2016–2018) has the largest values of RVA at its maximum, and a decrease in RVA values to the minimum over the entire observation period has been recorded in the last two years. It should be added that similar behavior of RVA dynamics was observed at the INSR station (Fig. 1), which is located in the other structure element of the Avacha Bay.

Based on the observed correlation between the trends in RVA dynamics and strong earthquakes, a possible strong earthquake can be predicted in the area of the Kamchatka Peninsula with great probability. It should be noted that two earthquakes, the Uglovoye Podnyatiye earthquake with  $M_w = 7.3$  (no. 14 in the Table) and the intraplate earthquake with  $M_w = 7.5$  (no. 15), have already occurred after the RVA values drop upon completion of the trend IV. However, the peculiarities of RVA dynamics point to a great probability of an earthquake with  $M_w > 7.5$  in the area of the Kamchatka Peninsula. Based upon the previous observations, the predicted earthquake should be expected until February 1, 2021. These data conform with the long-term prediction for the Kuril-Kamchatka seismogenic zone made in the works by S.A. Fedotov and A.V. Solomatin [2017, 2019]. According to this forecast, the highest probability of an earthquake with  $M_w \geq 7.7$  falls on the Avacha Bay and Southern Kamchatka. The intensity of such an earthquake in Petropavlovsk-Kamchatsky can be more than 7 points.

## References

1. Adushkin V.V., Spivak A.A. 2014. *Fizicheskie polia v pripoverkhnostnoi geofizike* [Physical fields in near-surface geophysics]. Moscow: GEOS, 349 p. (In Russ.).
2. Baykara O., İnceöz M., Doğru M., Aksoy E., Külahci F. 2009. Soil radon monitoring and anomalies in East Anatolian Fault System (Turkey). *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1(279): 159–164. <https://doi.org/10.1007/s10967-007-7211-2>

3. Biryulin S.V., Kozlova I.A., Yurkov A.K. **2019.** Investigation of informative value of radon volume activity in soil during both the stress build-up and tectonic earthquakes in the South Kuril region. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*, 4(44): 73–83.  
<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-73-83> (In Russ.).
4. Box G., Jenkins G. **1974.** *Analiz vremennykh riadov. Prognoz i upravlenie [Time series analysis. Forecasting and control]*. Moscow: Mir, 406 p. (In Russ.).
5. Chebrov V.N., Kugaenko Yu.A., Abubakirov I.R., Droznina S.Ya., Ivanova E.I., Matveenko E.A., Mityushkina S.V., Ototyuk D.A., Pavlov V.M., Raevskaya A.A. et al. **2016.** The January 30, 2016 earthquake with  $K_s = 15.7$ ,  $M_w = 7.2$ ,  $I = 6$  in the Zhupanovsky region (Kamchatka). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*, 1(29): 5–16. (In Russ.).
6. Chebrov D.V., Kugaenko Yu.A., Abubakirov I.R., Lander A.V., Pavlov V.M., Saltykov V.A., Titkov N.N. **2017.** The July 17, 2017 Near-Aleutian earthquake with  $M_w = 7.8$  on the border of the Komandor seismic gap (western part of the Aleutian Arc). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*, 3(35): 22–25. (In Russ.).
7. Chebrov D.V., Kugaenko Yu.A., Lander A.V., Abubakirov I.R., Droznina S.Ya., Mityushkina S.V., Pavlov V.M., Saltykov V.A., Serafimova Yu.K., Titkov N.N. **2020.** The Uglovoye Podnyatiye earthquake on December 20, 2018 ( $M_w = 7.3$ ) in the junction zone between Kamchatka and Aleutian oceanic trenches. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*, 1(45): 100–117. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-1-45-100-117>
8. Cicerone R.D., Ebel J.E., Beittton J.A. **2009.** Systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 476: 371–396. doi:10.1016/j.tecto.2009.06.008
9. Fedotov S.A., Solomatin A.V. **2017.** The long-term earthquake prediction for the Kuril-Kamchatka island arc for the April 2016 through March 2021 period, its modification and application; the Kuril-Kamchatka seismicity before and after the May 24, 2013,  $M 8.3$  deep-focus earthquake in the Sea of Okhotsk. *J. of Volcanology and Seismology*, 11(3): 173–186. <https://doi.org/10.1134/s0742046317030022>
10. Fedotov S.A., Solomatin A.V. **2019.** Long-term earthquake prediction (LTEP) for the Kuril-Kamchatka island arc, June 2019 to May 2024; properties of preceding seismicity from January 2017 to May 2019. Development and Practical Application of the LTEP Method. *J. of Volcanology and seismology*, 6: 6–22. <https://doi.org/10.31857/s0203-0306201966-22>.
11. Firstov P.P. **2014.** Forecasting of large earthquakes based on radon monitoring in the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamical testing area. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bulletin of KRAESC. Earth Sciences*, 1(23): 35–49. (In Russ.).
12. Firstov P.P., Makarov E.O. **2015.** Reaction of radon in soil and groundwater to stress-strain state of the Earth's crust. *Seismicheskie pribory = Seismic Instruments*, 51(4): 58–80. (In Russ.).
13. Firstov P.P., Makarov E.O. **2018.** *Dinamika podpochvennogo radona na Kamchatke i sil'nye zemletriaseniia [Dynamics of subsoil radon in Kamchatka and strong earthquakes]*. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamGU n.a. Vitus Bering, 148 p. (In Russ.).
14. Firstov P.P., Makarov E.O., Glukhova I.P. **2017.** Peculiarities of subsoil gas dynamics before the  $M = 7.2$  Zhupanova earthquake on January 30, 2016, Kamchatka. *Doklady Akademii nauk = Doklady Earth Sciences*, 472: 196–199. <https://doi.org/10.1134/s1028334x17020015>
15. Firstov P.P., Makarov E.O., Glukhova I.P., Budilov D.I., Isakevich D.V. **2018.** Search for predictive anomalies of strong earthquakes according to the monitoring of subsoil gases at Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic test site. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(1): 16–32. (In Russ.). doi:10.30730/2541-8912.2018.2.1.016-032
16. Immè G., Morelli D. **2012.** Radon as earthquake precursor. In: D'Amico S. (ed.) *Earthquake research and analysis – statistical studies, observations and planning*, 143–160. <https://doi.org/10.5772/29917>
17. Iwata D., Nagahama H., Muto J., Yasuoka Y. **2018.** Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes. *Scientific Reports*, 8(13028).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-31341-5>
18. İnan S., Akgu T., Cemil S. **2008.** Geochemical monitoring in the Marmara region (NW Turkey): A search for precursors of seismic activity. *J. of Geophysical Research*, 113: B03401.  
<https://doi.org/10.1029/2007JB005206>
19. Kissin I.G. **2011.** Strain sensitivity in fluid-saturated media. *J. of Volcanology and Seismology*, 5(3): 179–189. doi:10.1134/S0742046311030055.

20. Majumdar K. **2004.** A study of fluctuation in radon concentration behavior as an earthquake precursor. *Current science*, 9(86): 1288–1292.
21. Parovik R.I. **2014.** *Matematicheskie modeli klassicheskoi teorii emanatsionnogo metoda [Mathematical models of the classical theory of emanation method]*. Petropavlovsk-Kamchatskiy: KamGU n.a. Vitus Bering, 128 p. (In Russ.).
22. Petraki E., Nikolopoulos D., Panagiotaras D., Cantzos D., Yannakopoulos P., Nomicos C., Stonham J. **2015.** Radon-222: A potential short-term earthquake precursor. *J. of Earth Science and Climatic Change*, 6(6): 000282. doi:10.4172/2157-7617.1000282
23. Piersanti A., Cannelli V., Galli G. **2016.** The Pollino 2012 seismic sequence: clues from continuous radon monitoring. *Solid Earth*, 7: 1303–1316. <https://doi.org/10.5194/se-7-1303-2016>
24. Popruzhenko S.V., Zubin M.I. **1997.** Tectonics and seismicity of shelf in the gulf of Avacha and adjacent areas. *J. of Volcanology and Seismology*, 19(2): 211–219.
25. Rudakov V.P. **2009.** *Emanatsionnyi monitoring geosred i protsessov [Emanation monitoring of geomedia and processes]*. Moscow: Nauchnyi mir [Scientific world], 175 p. (In Russ.).
26. Tsunomori F., Tanaka H., Murakami M., Tasaka S. **2011.** Seismic response of dissolved gas in groundwater. In: *Proceedings of the 10th Taiwan-Japan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, October 25, Taiwan, National Cheng Kung University*. Tainan, 29–35.
27. Wakita H. **1981.** Precursory changes in ground water prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake. *Earthquake Prediction: An Intern. Review*, 4: 527–532. <https://doi.org/10.1029/ME004p0527>

## About Authors

FIRSTOV Pavel Pavlovich (ORCID 0000-0003-1658-5165, ResearcherID AAC-5308-2020), Dr. sci. (Physics & Mathematics), head of Department of radon and acoustic monitoring, Federal Research Centre «United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences» (FRC UGS RAS), Kamchatka Branch, Petropavlovsk-Kamchatsky, firstov@emsd.ru  
MAKAROV Evgeniy Olegovich (ORCID 0000-0002-0462-3657, ResearcherID AAL-1711-2020), Cand. sci. (Physics & Mathematics), senior researcher, Federal Research Centre «United Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences» (FRC UGS RAS), Kamchatka Branch; head of laboratory, Kamchatka State University named after Vitus Bering (KSU named after Vitus Bering), Petropavlovsk-Kamchatsky, ice@emsd.ru