

УДК 550.343.3+550.343.6

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА СЕТЬЮ ПУНКТОВ, РАБОТАЮЩЕЙ В ТЕСТОВОМ РЕЖИМЕ, НА ЮГЕ ОСТРОВА САХАЛИН *

**Е. О. Макаров^{1,2}, П. П. Фирстов¹, Д. В. Костылев^{3,5},
Е. С. Рылов⁴, И. П. Дудченко⁵**

¹ Камчатский филиал Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН 683006, г. Петропавловск-Камчатский, Пийпа б-р, 9

² Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4

³ Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 693010, г. Южно-Сахалинск, ул. Тихоокеанская, 2А

⁴ Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, 683006, г. Петропавловск-Камчатский, Пийпа б-р, 9

⁵ Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б

E-mail: ice@emsd.ru

Радоновый мониторинг в мировой литературе признан перспективным методом для прогноза землетрясений. В последнее десятилетие на полуострове Камчатка достаточно убедительно продемонстрирована перспективность радонового метода для прогноза субдукционных землетрясений. Южная часть острова Сахалин является регионом высокой сейсмической опасности. Результаты, полученные на Камчатке, дают основание надеяться на обнаружение предвестниковых аномалий в поле радона (Rn) и для более слабых, но не менее опасных, мелкофокусных землетрясений острова Сахалин. В тестовом режиме на юге острова Сахалин в настоящее время функционирует сеть из трех пунктов мониторинга объемной активности радона (ОА Rn) в воздухе подпочв. С целью лучшего представления об условиях миграции Rn к дневной поверхности в окрестности установки радиометров выполнены сейсморазведочные работы. Регистрация объемной активности радона ведется по α -излучению с использованием метода принудительной конвекции. Проявление слабой сейсмической активности на юге Курило-Камчатской и на севере Японской сейсмогенных областей нашло отражение в динамике подпочвенного радона на двух пунктах. После обкатки аппаратуры и установки стационарных пунктов планируется использовать данные радонового мониторинга в качестве дополнительного параметра для обоснования заключений о сейсмической опасности юга острова Сахалин.

Ключевые слова: радоновый мониторинг, Камчатка, Сахалин, прогноз землетрясения

© Макаров Е. О. и др., 2018

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-05-00162

Введение

В обзорных работах [1, 2, 3] собраны сведения известные до 2008 г. о регистрации радона с целью поиска предвестников землетрясений и показана перспективность сейсмоэманационного метода для этой цели. На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (ПКГП) сеть пунктов регистрации $OA Rn$ в подпочвенном воздухе функционирует с 1997 года. Данные, полученные на ПКГП, достаточно убедительно показывают перспективность радонового метода для прогноза субдукционных землетрясений, для 64% землетрясений с эпицентрами на удалении меньше 200 км и с магнитудой $5.5 < M < 6.9$ выявлены краткосрочные предвестниковые аномалии. Время упреждения их составляет от нескольких суток до нескольких часов [4]. Полученные на ПКГП результаты дают надежду на обнаружение предвестниковых аномалий в поле подпочвенного радона (ПГ) и для более слабых, но не менее опасных, мелкофокусных землетрясений острова Сахалин.

Южная часть острова Сахалин является регионом высокой сейсмической опасности. Известны 4 землетрясения, интенсивность сотрясений от которых в близлежащих населенных пунктах превосходила 7 баллов: Монеронское, 5 сентября 1971 г. с $M=7.2$; Такойское, 1 сентября 2001 г. с $M=5.5$; Горнозаводское, 17 августа 2006 г. с $M=5.6$; Невельское, 2 августа 2007 г. с $M=6.1$.

Активное развитие добычи углеводородов и систем их транспортировки в порты отгрузки на острове Сахалин повышает риск сейсмической опасности. Поэтому мониторинг сейсмичности и разработка методов, способствующих повышению эффективности прогноза землетрясений, является актуальной задачей для острова Сахалин. Актуальность данной работы обусловлена, помимо выше изложенного, тем, что в настоящее время в соответствии с заключениями Сахалинского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска, действует среднесрочный прогноз землетрясения с магнитудой $M = 6.0 \pm 0.7$ [5].

Силами Камчатского филиала совместно с Сахалинским филиалом «Единой геофизической службы РАН» (ЕГС РАН) и Институтом морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН (ИМГиГ ДВО РАН) летом 2018 г. была организована временная сеть радонового мониторинга на юге острове Сахалин (СРМЮС), состоящая из трех пунктов, которая работает в тестовом режиме (рис. 1). Координаты пунктов приведены в табл. 1.

Пункты располагаются в углах равностороннего треугольника со стороной ~ 30 км. Ранее на ПКГП было установлено, что площадная расстановка приборов позволяет обнаруживать перед землетрясениями с $M > 5.5$ района Авачинского залива возмущения ПР длительностью несколько суток, обусловленные прохождением по геосреде сигналов, названных “деформационными волнами” (ДВ), которые могут возникать в результате квазипластичного течения геоматериала на последней стадии подготовки сильных землетрясений. Кажущаяся скорость их распространения по данным сети пунктов мониторинга ПР на Камчатке оценивается 14-144 км/сут. По-видимому, аномалии в динамике ПР формируются в результате прохождения ДВ солитонного типа, которые, воздействуя на эманлирующий горизонт в пунктах регистрации, что приводит к изменениям величины $OA Rn$ в зоне аэрации [4, 6, 7].



Рис. 1. Схема расположения пунктов мониторинга почвенного радона на юге острова Сахалин. YSSR – пункт в Южно-Сахалинске на территории СФ ФИЦ ЕГС РАН; PETR – пункт в поселке Петропавловский; ОЖДР – пункт в поселке Ожидаево

Таблица 1

Параметры пунктов сети непрерывного мониторинга ПР на юге о. Сахалин

№ п/п	Дата начала наблюдений	Координаты		Код пункта	ОА R _п , кБк/м ³	Глубина откачки, м
		φ°, N	λ°, E			
1	02.07.2018	46°47'19.00"	142°29'45.58"	PETR	0.21	1.0
2	05.07.2018	47°01'50.25"	142°23'41.61"	OJDR	17.30	1.7
3	06.07.2018	46°57'31.01"	142°45'37.04"	YSSR	7.30	2.0

Методика наблюдений

На пунктах СРМЮС регистрация осуществляется радиометром RADEX MR107 производства Российской фирмы ООО «КВАРТА-РАД», предназначенным для оценки эквивалентной равновесной объемной активности R_п и дочерних продуктов его изотопов по величине ОА R_п в воздухе жилых и общественных помещений. Радиометр представляет собой современное полупроводниковое устройство, собранное в едином корпусе и оснащенное элементами управления и экраном. RADEX MR107 позволяет анализировать динамику измерений, сигнализировать о превышении допустимых санитарных норм содержания R_п в воздухе помещений, а также передавать полученные результаты на ПЭВМ. Измерения R_п осуществляются диффузионным методом, кроме того прибор регистрирует одновременно температуру воздуха и влажность. Все получаемые данные сохраняются в долговременную независимую память и передаются на ПЭВМ по запросу оператора, с помощью специального программного обеспечения из комплекта поставки. Управление режимами измерений, настройкой даты и временем осуществляется с помощью ПЭВМ.

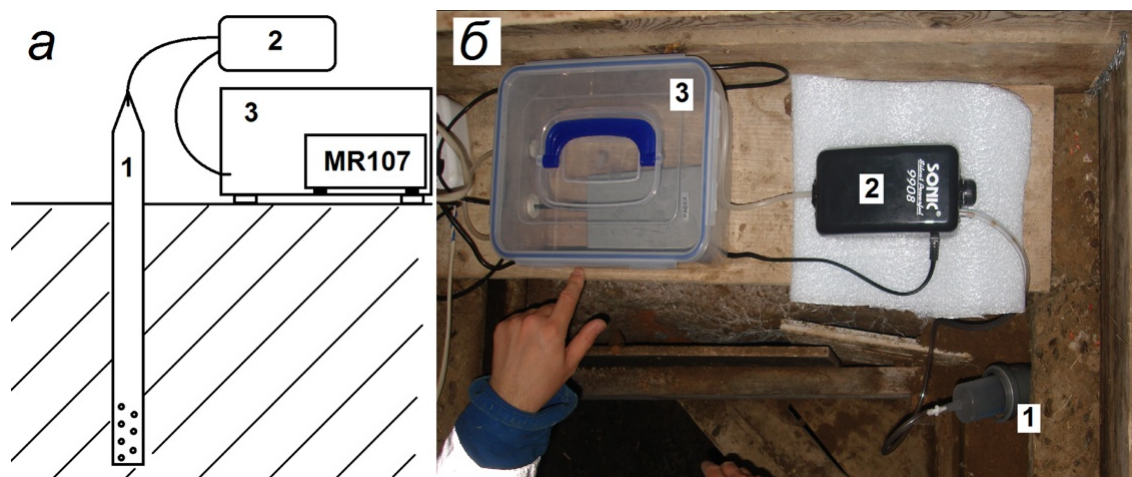


Рис. 2. Блок-схема (а) и общий вид (б) комплекта для регистрации почвенного радона. 1 – перфорированная труба в шпуре; 2 – компрессор; 3 – накопительная камера с прибором MR107

Для мониторинга ПР с помощью прибора MR107 был применен метод принудительной конвекции с помощью откачки почвенного воздуха из измерительного шпура компрессором в накопительную камеру, где устанавливался прибор [8] (рис. 2). Как показано во многих работах [9, 10], основными помехами при измерении объемной активности ПР являются вариации метеорологических величин: температуры воздуха, атмосферного давления и влажности почвы. Примененная на СРМЮС методика измерений с откачкой почвенного воздуха из измерительного шпура в накопительную камеру позволяет значительно снизить уровень этих помех.

Описание пунктов мониторинга ПР

Пункты мониторинга ПР были установлены на юге Сахалина в Центрально-Сахалинской разломной зоне, включающей разломы вдоль западных ограничений основных межгорных впадин о. Сахалин – Сусунайской и Тымь-Поронайской. Эта зона, называемая иногда Тымь-Поронайской активной зоной, включает Ключевской разлом (Тымь-Поронайской депрессии) и Апрельский разлом в Сусунайской депрессии [11].

Кинематика Центрально-Сахалинской разломной зоны в целом характеризуется взбросо-надвиговой природой. Сейсмическая активность разломной зоны в настоящее время невысока. Однако, по результатам палеосейсмологических исследований, разлом способен генерировать землетрясения с $M = 7.0 - 7.5$ [12]. На рис. 3 показаны разломы и тектонические нарушения южной части Сахалина из работы [13], а также расположение пунктов относительно тектонических разломов.

В местах расположения пунктов мониторинга ПР проводились сейсморазведочные работы и эманационная съемка с целью изучения строения верхней части геологического разреза и выбора точек установки радиометров.

Пункт **PETR** располагается на территории экспериментального геофизического полигона «Петропавловское» ИМГиГ ДВО РАН на возвышенности в подвальном помещении жилого дома в долине реки Лютога (поселок Петропавловское). Откачка почвенного воздуха осуществляется из шпура глубиной один метр. На момент

начала регистрации, объемная активность радона (ОА Rn), измеренная с помощью радиометра РГА-01, составила 0.21 кБк/м³.

Пункт OJDR в поселке Ожидаево располагается в районе сейсмической станции OJD СФ ЕГС РАН в пойме реки Ожидаевская. Откачка подпочвенного воздуха осуществляется в подвале жилого дома с глубины 1.7 м. В момент начала регистрации ОА Rn составляла 17.3 кБк/м³. Такое высокое значение ОА Rn в воздухе подпочв не отмечались даже при эманационной съемке района Волчанского месторождения термальных вод [14]. Не исключено, что данный пункт находится в зоне динамического влияния Центрально-Сахалинского разлома (рис. 3).

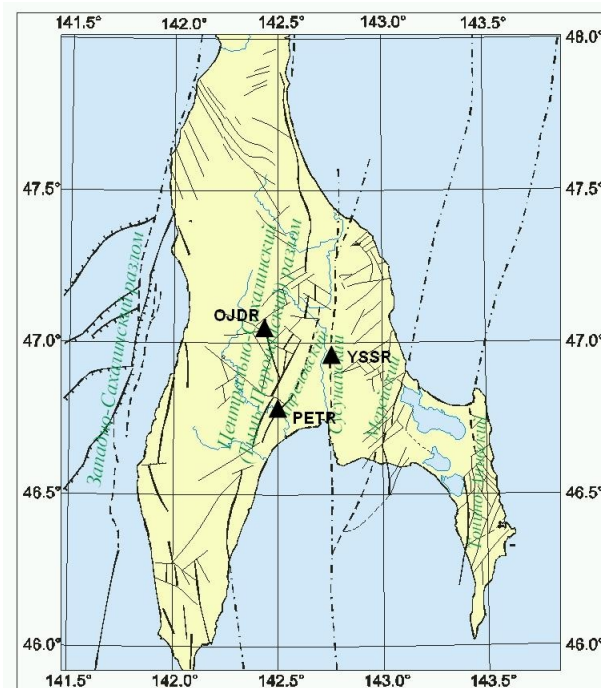


Рис. 3. Положение пунктов непрерывного мониторинга ПР и разрывная тектоника юга Сахалина по В.С. Рождественскому и С.М. Сапрыгину [13]

Пункт YSSR располагался на территории СФ ФИЦ ЕГС РАН на склоне сопки в районе установки сейсмической станции YSS. Откачка подпочвенного воздуха осуществляется с глубины два метра. На момент начала регистрации ОА Rn составляла 7.3 кБк/м³.

Сейсморазведочные работы и эманационная съемка на пунктах СРМЮС

В июле 2018 г. на трех пунктах методом преломленных волн (МПВ) были выполнены сейсморазведочные работы, с использованием цифровой сеймостанции «Лакколит X-3М», в комплекте с сейсмической косой СМ – 20 и сейсмоприемниками GS – 20 DX. При этом длина приемной расстановки составляла 46 метров с шагом между сейсмоприемниками 2 метра. Сейсмические наблюдения проводились по методике «встречных и нагоняющих годографов» с промежуточными пунктами возбуждения. На каждом профиле было 9 пунктов возбуждения, из них два вынесены за пределы расстановки. Возбуждение сейсмических волн осуществлялось

с помощью кувалды весом 5 кг по металлической плашке. Вертикально направленными ударами возбуждались продольные волны, а ударами в плоскости перпендикулярной к оси профиля, под углом 45° от горизонтальной поверхности, поперечные волны. Количество накоплений на одном пункте возбуждения 10-15. Шаг дискретизации записи – 1 мс.

Обработка полученных сейсмических материалов по методу сейсмических жесткостей, выполнялась в программе Zond ST2D. Эта программа позволяет осуществить весь процесс обработки данных: чтение и визуализацию сейсмограмм, фильтрацию и различного рода усиление трасс, пикировку первых вступлений, построение и редактирование годографов, определение скоростей упругих волн и построение преломляющих границ.

Выработанный граф обработки данных МПВ ориентирован на реализованный в пакете Zond ST2D алгоритм сейсмотомографии. Он состоит из нескольких этапов:

- создание проекта;
- ввод и обработка сейсмограмм, ввод параметров системы наблюдений;
- выделение первых вступлений и построение годографов;
- обработка годографов, подбор параметров модели;
- расчет скоростей по разрезу.

Окончательная обработка и совместная интерпретация выполнялась в программе Surfer.

Расположение профилей при проведении разведочных работ на пунктах СРМЮС представлено на рис. 4, а скоростные разрезы на рис. 5-7.

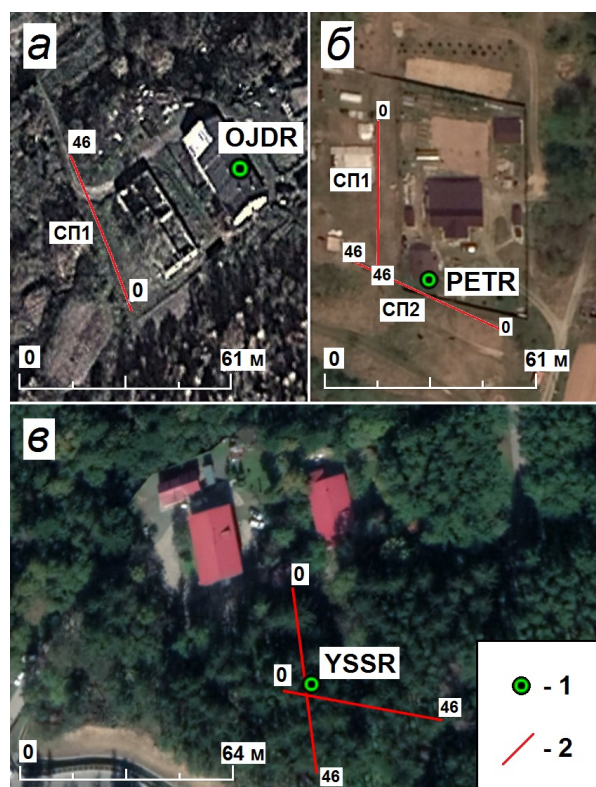


Рис. 4. Расположение профилей при проведении сейсморазведочных работ на пунктах регистрации подпочвенного радона (YSSR, OJDR, PETR) о. Сахалин. 1 – пункт регистрации подпочвенного радона; 2 – сейсмический профиль (СП)

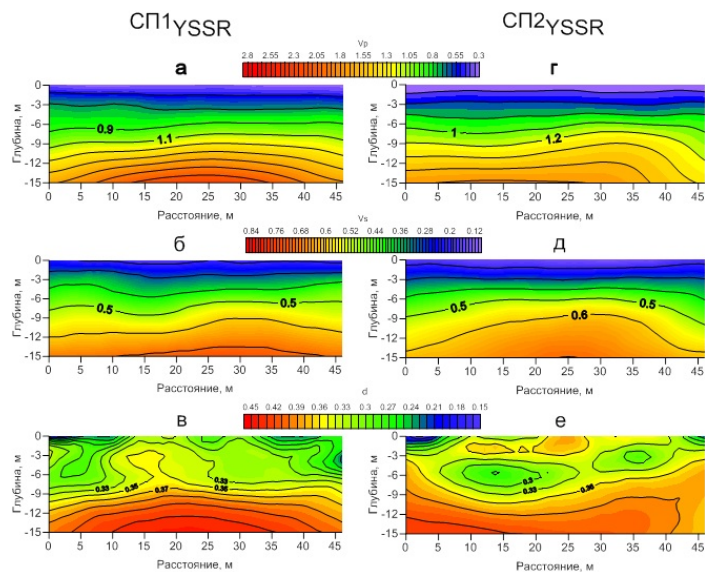


Рис. 5. Скоростные разрезы Р и S волн в районе пункта YSSR по двум профилям СП1 и СП2 (см. рис. 5). а, г V_P ; б, д – V_S ; в, е коэффициента Пуассона

По результатам сейсморазведочных работ получены скоростные разрезы на двух профилях (СП1_{YSSR}, СП2_{YSSR}) в районе пункта YSSR. Полученный разрез можно представить в виде толщи суглинков. На СП1_{YSSR} и СП2_{YSSR} прослеживается линза дресвяного грунта (рис. 5), которая также видна на карте распределения коэффициента Пуассона (рис. 5в, е) и подтверждается «прогибом» на скоростном разрезе S-волн. Поскольку разрез по скважине представлен суглинком с прослоями дресвяного грунта, и расположение скважин относительно расположения профилей неизвестно, то достоверность существования линзы не велика.

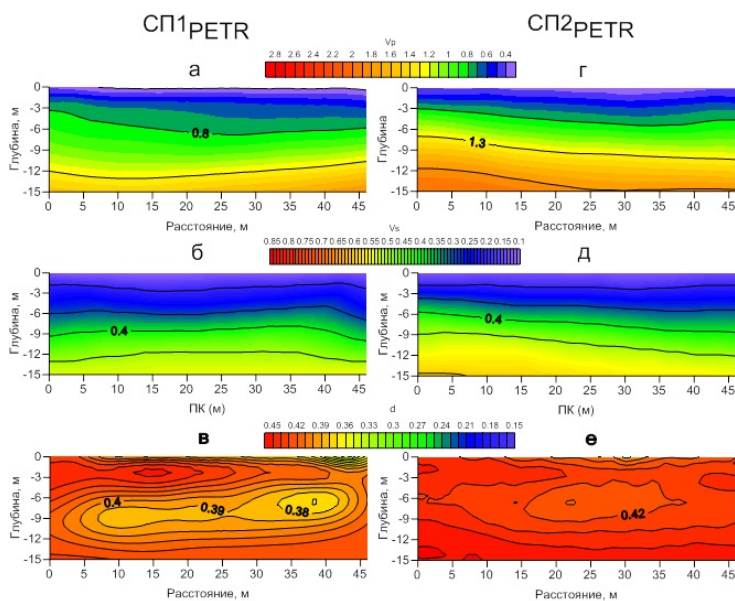


Рис. 6. Скоростные разрезы Р и S волн в районе пункта PETR по двум профилям СП1 и СП2 (см. рис. 5). а, г - V_P ; б, д - V_S ; в, е - коэффициента Пуассона (см. рис. 5)

По полученным скоростным разрезам в пункте РЕТР можно предположить, что верхняя толща сложена глинистыми породами, т.к. на СП1_{РЕТР} коэффициент Пуассона меньше 0.4 (рис. 6в). Значения скоростей близких к табличным свидетельствуют о наличии в разрезе линзы пород, содержащих суглинок, на что указывает изгиб изолиний на скоростном разрезе P – волн и отсутствующий на скоростном разрезе S – волн.

В пункте ОJDR был выполнен один сейсморазведочный профиль СП1_{ОJDR} с неоднозначными результатами, в связи с тем, что наблюдаются значительные различия в скоростных разрезах V_p и V_s (рис. 7).

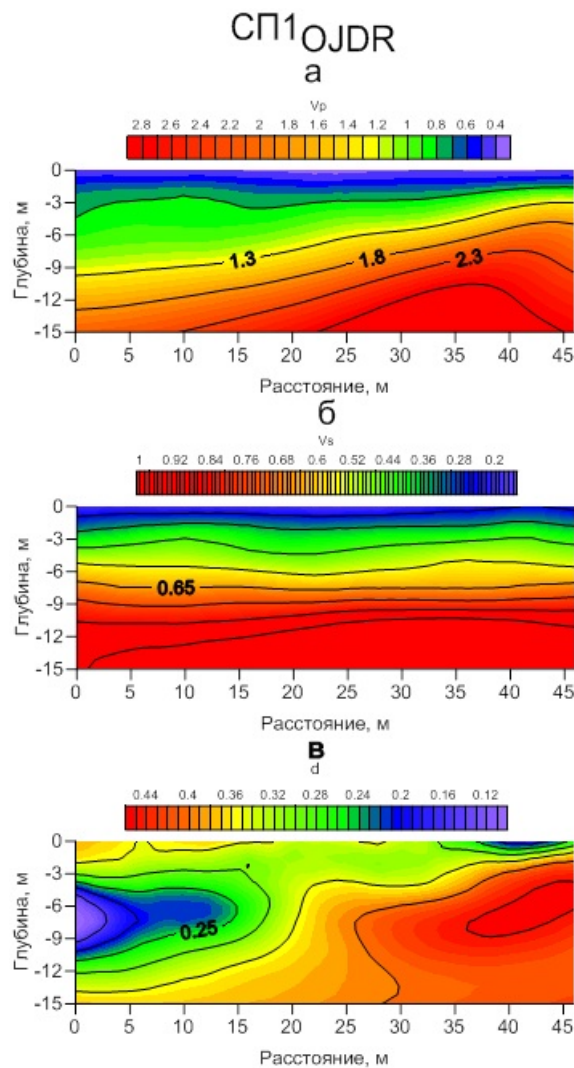


Рис. 7. Скоростные разрезы S- и P-волн в районе пункта ОJDR, коэффициент Пуассона по профилю СП1 (расположение профиля см. рис. 5))

Это может быть связано с расположением профиля на склоне с уклоном до 15% (рис. 4а). Сравнительно высокие скорости $V_p = 1.8$ км/с и $V_s = 0.65$ км/с указывают, что верхняя толща грунтов представлена разрушенным скальным грунтом с песчаным заполнителем. Глубже разрез представлен более цельным массивом скальных пород, либо обводненным трещиноватым массивом. При таких параметрах среды поперечные волны будут примерно на одном уровне, а разрез по

продольным волнам будет представлен в виде уклона и резкого роста скорости с глубиной.

На территории пункта PETR поисковым радиометром РГА-01 проводилась эманационная съемка. Воздух почв отбирался из шпуров глубиной 0.4 - 0.8 м с шагом ~ 5 м между пикетами по профилю длиной 65 м. Расположение профиля относительно установки радиометра RADEX MR107 и значения ОА Rn на пикетах показаны на рис. 8.

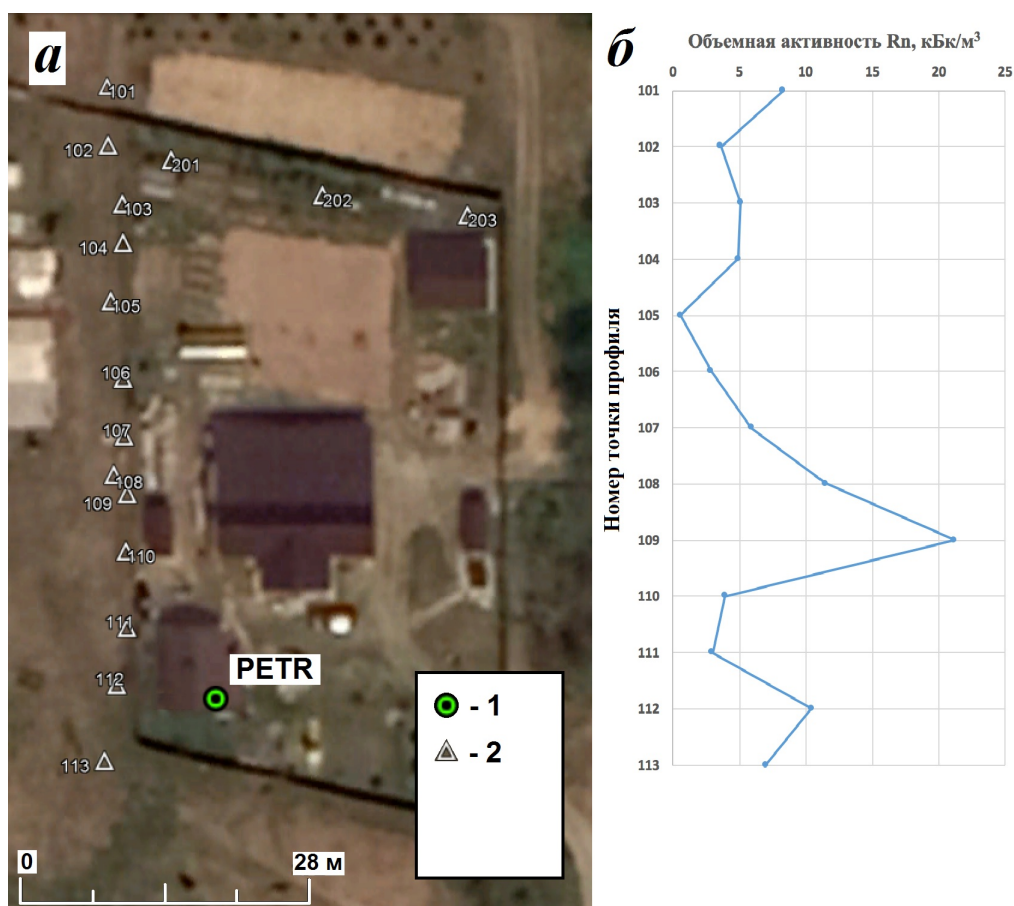


Рис. 8. Эманационный профиль (а) и значения ОА Rn (б) по профилю в пункте PETR. 1 – пункт регистрации; 2 – точки отбора почвенного воздуха по профилю

На профиле наблюдаются большие вариации значений ОА Rn, так на пикете 109 зафиксирован максимум ОА Rn ($C = 21$ kBq/m³), а минимум на пикете 105 около $C=0.6$ kBq/m³. Такая большая разница в значениях ОА Rn на небольших расстояниях между точками отбора может говорить о наличии зон разуплотнения, выступающих в качестве проводящих коллекторов для подпочвенных газов.

Наблюдения, выполненные на Камчатке, показали, что в зонах динамического влияния разломов вертикальные неоднородности даже на расстояниях 15-20 м существенно влияют на миграцию Rn к дневной поверхности. Как вертикальные, так и горизонтальные неоднородности формируют узколокализованные зоны стока радона в атмосферу, которые по-разному реагируют на изменения напряженно-деформированного состояния верхнего слоя грунта [4].

На основании эксперимента, проведенного в 2012–2014 гг. на четырех экспериментальных площадках по измерению ОА Rn в порах грунта совместно с измерениями температуры и влажности на различных глубинах до 10 м, показано существование горизонтальных мелкомасштабных неоднородностей, влияющих на миграцию радона к дневной поверхности. Площадки были организованы в открытой местности и в подвалах зданий, в различных районах РФ, разнесенных на тысячи километров [15].

На основании этого эксперимента было выявлено, что, вопреки распространенному мнению, не наблюдается монотонного увеличения ОА Rn с глубиной, как следует из модели однородного кларкового содержания радиоактивных элементов – модели с распределенными параметрами. Распределение радона в порах по глубине грунта определяется его эманулирующей способностью, в основном обусловленной активностью ^{226}Ra , а также проницаемостью, которые могут подавляться из-за присутствия воды в поровом пространстве [16].

В дальнейшем планируется проведение комплексных геофизических работ (георадарная съемка, электротомография, площадная эманационная съемка) с целью получения детального представления о физико-литологических свойствах и строении верхней части геологического разреза в пунктах регистрации подпочвенного радона о. Сахалин.

Результаты работы сети пунктов регистрации ПР на юге о-ва Сахалин

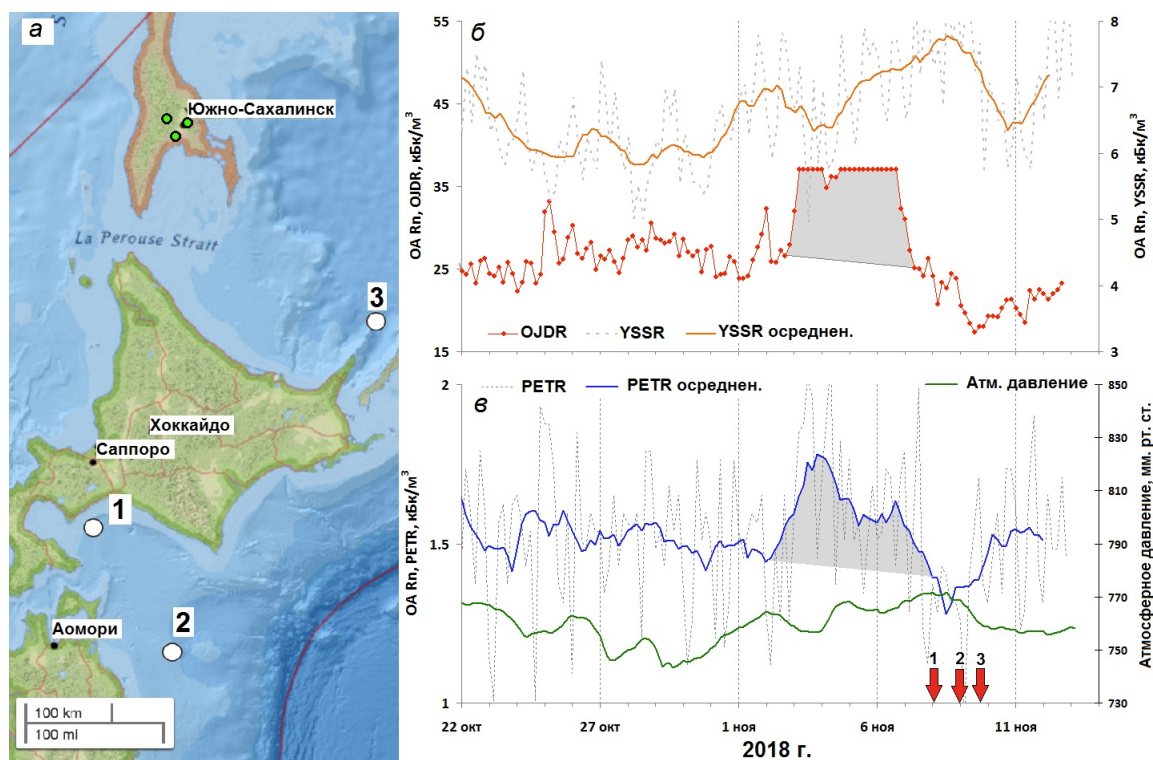


Рис. 9. Кривые ОА Rn на пунктах OJDR и YSSR (а), PETR (б) и атмосферное давление. Серым цветом показана аномалия ОА Rn, красными стрелками моменты возникновения землетрясений с номерами согласно табл. 2

На кривых ОА R_n в пунктах PЕТR и OJDR за период 22 октября - 13 ноября 2018 г с 2 по 7 ноября хорошо выделяются аномалии (рис. 9б,в). По морфологическим признакам и синфазности возникновения их можно отнести к типу А, аналогично выделенным ранее на сети пунктов на ПКГП [4]. Относительная амплитуда ($\delta\% = ((A_{ан}-A_{фон})/A_{фон}) \cdot 100$) этих аномалий составила $\delta_{OJDR} > 40\%$, $\delta_{PЕТR} = 20\%$. Точное значение максимума амплитуды аномалии на пункте OJDR оценить не представляется возможным по причине превышения значениями ОА R_n верхнего предела динамического диапазона регистратора MR107. Аномалии нельзя объяснить влиянием метеорологических факторов, так как в этот период не отмечено сильных вариаций атмосферного давления (рис. 9б).

Можно предположить, что выявленные аномалии могли быть связаны с процессами, отражающими изменение геодинамической обстановки и обусловленные перестройкой полей сейсмотектонических напряжений рассматриваемого района. Действительно, сразу после возврата значений ОА R_n к исходным значениям в районе о. Хоккайдо (Япония) произошло два землетрясения магнитудой 4.4, 4.5, параметры которых приведены в таблице 2. Спустя почти сутки в районе о. Кунашир Курильской гряды произошло еще одно землетрясение (рис. 9а).

Таблица 2

Основные параметры землетрясений с $M \geq 4$, произошедших в районе Курильских островов и о. Хоккайдо (Япония) после 07 ноября 2018 г.

№ п/п	Дата	Время	Координаты		M	H, км	R _{YSSR} , км
			ϕ , N	λ , E			
1	08.11.2018	02:15:13	42.25	141.34	4.4	104	530
2	08.11.2018	23:05:36	40.74	142.52	4.5	43	690
3	09.11.2018	16:09:01	44.71	145.67	4.7	22	330

Примечание. ϕ, N – градусы северной широты; λ, E – градусы восточной долготы; M – магнитуда по NEIC (National Earthquake Information Center); H – глубина; R_{YSSR} – расстояние до опорного пункта YSSR.

Как было показано, для условий ПКГП, возникновение аномалий типа А связано с прохождением в земной среде сигналов типа уединенных «деформационных волн», возникающих в результате квазипластичного течения геоматериала в сейсмофокальной зоне на последней стадии подготовки субдукционных землетрясений с различной глубиной очага [4]. Такие волны воздействуют на эманурующий горизонт в пунктах регистрации, изменяя величину ОА R_n в зоне аэрации. Возможно, перестройка сейсмотектонических полей, нашедшая отражение в последующей сейсмичности, генерировала возмущения, аналогичные «деформационным волнам», которые были опосредованно зарегистрированы на пунктах радоновых наблюдений.

По-видимому, разломные зоны, в районе которых установлены радиометры на пунктах PЕТR и OJDR, являются достаточно тензочувствительными к процессам подготовки землетрясений в зоне субдукции района острова Сахалин. В том же временном интервале в пункте YSSR аномалия не выделяется (рис. 9а). По-видимому, это указывает на малую тензочувствительность данного пункта, что

может быть связано с особенностями геологического строения района, например с наличием слабопроницаемого тонкого слоя, не выделяемого на сейсмическом профиле, который отражает значительную часть субвертикального потока геогаза.

Дальнейший анализ получаемых данных и сопоставление с сейсмичностью региона позволят продолжать работы по выявлению аномальных изменений ОА Rn, предвещающих землетрясения. Для них, по морфологическим признакам будут выделены основные типы, а также проведено их сравнение с данными из литературных источников. Опыт на ПКГП показывает, что амплитуда аномальных возмущений, предвещающих землетрясения, в поле подпочвенного Rn находится в диапазоне $\delta=18-500\%$, что нередко меньше амплитуд помех, достигающих 300% и связанных с воздействием метеорологических величин. Поэтому, крайне важным для экспертной оценки и селекции аномалий в динамике ПР, предвещающих землетрясения, на фоне регулярно возникающих изменений динамики подпочвенных газов, связанных с другими процессами, является обнаружение синфазных вариаций на нескольких пунктах регистрации. Не менее важным представляется поиск оптимальных методик, способствующих уменьшению влияния метеорологических факторов и обеспечению надежной работы сети без потери данных при длительной непрерывной регистрации.

Заключение

Пункты установки радиометров на острове Сахалин могут быть расположены в непосредственной близости от сейсмоактивных областей (рис. 1), что невозможно реализовать для зоны субдукции в районе полуострова Камчатка. Исследования ПР как индикатора напряженно-деформированного состояния геосреды на сети станций острова Сахалин являются перспективными и необходимыми для понимания механизма формирования предвестниковых аномалий в поле ПР для коровых землетрясений. В случае создания сети пунктов мониторинга ОА Rn на южном Сахалине и получения данных с предвестниковыми аномалиям, их сравнение с данными Петропавловск-Камчатского полигона поможет более глубоко исследовать процессы, связанные с изменением напряженно-деформированного состояния геосреды на последней стадии подготовки сильных землетрясений.

Исходя из литературных источников, предполагается, что результативность радонового мониторинга вблизи очаговой зоны (мелкофокусные землетрясения), что характерно для южной части острова Сахалин, будет значительно выше по сравнению с условиями зоны субдукции на Камчатке. Предварительные результаты, продемонстрированные в данной статье, подтверждают это. В дальнейшем планируется данные с сети пунктов мониторинга ПР использовать в качестве дополнительного параметра для обоснования заключений о возможных сценариях развития сейсмического процесса на юге Сахалина.

Следует отметить, что пункт OJDR, в котором регистрируются максимальные среди других пунктов значения ОА Rn, вероятно, является наиболее тензочувствительным и требует более детальных геофизических работ для изучения его геологического строения.

Список литературы

- [1] Зубков С. И., “Радоновые предвестники землетрясений”, *Вулканология и сейсмология*, 1981, №6, 74-105. [Zubkov S.I., “Radonovyye predvestniki zemletryaseniy”, *Vulkanologiya i seysmologiya*, 1981, №6, 74-105].
- [2] Cicerone R. D., Ebel J. E., Beitton J. A., “Systematic compilation of earthquake precursors”, *Tectonophysics*, 2009, №476, 371-396.
- [3] Dubinchuk V.T., “Radon as a precursor of earthquakes”, *Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption*, Proceedings of an Advisory Group Meeting held in Vienna, Vienna, 9-12 September 1991, Vienna, 1991, 6–22.
- [4] Фирстов П. П., Макаров Е. О., *Динамика подпочвенного радона на Камчатке*, КамГУ им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, 2018, 145 с. [Firstov P.P., Makarov E.O., *Dinamika podpochvennogo radona na Kamchatke*, Kamgu im. Vitusa Beringa, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2018, 145 pp.]
- [5] Закупин А. С. и др., “Оценка сейсмической опасности на юге Сахалина на 2018 год (по данным оперативного каталога)”, *Геосистемы переходных зон*, 2:1 (2018), 52-56. [Zakupin A. S. et al., “The estimation of seismic hazard in south part of Sakhalin for 2018 year (based on preliminary catalog)”, *Geosystems of Transition Zones*, 2:1 (2018), 52-56].
- [6] Макаров Е. О., *Отклик в динамике подпочвенного радона на подготовку сильных землетрясений Камчатки и северо-западной окраины Тихого океана*, автореф. дис. на соискание степени канд. физ.-мат. наук, Петропавловск-Камчатский, 2017, 22 с. [Makarov E.O., *Otklik v dinamike podpochvennogo radona na podgotovku sil'nykh zemletryaseniy Kamchatki i severo-zapadnoy okrainy Tikhogo okeana*, avtoref. dis. . . kand. fiz.-mat. nauk., Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2017, 22 pp.]
- [7] Фирстов П. П., Макаров Е. О., “Реакция подпочвенного и растворенного в подземных водах радона на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры”, *Сейсмические приборы*, 51:4 (2015), 58-80. [Firstov P.P., Makarov E.O., “Reaction of radon in soil and groundwater to stress-strain state of the Earth’s crust”, *Seismic Instruments*, 51:4 (2015), 58-80].
- [8] Уткин В. И., Юрков А. К., “Радон как индикатор геодинамических процессов”, *Геология и геофизика*, 51:2 (2010), 277–286. [Utkin V.I., Yurkov A.K., “Radon as a tracer of tectonic movements”, *Russian Geology and Geophysics*, 51:2 (2010), 277-286].
- [9] Рудаков В. П., *Эманационный мониторинг геосред и процессов*, Научный мир, М., 2009, 175 с. [Rudakov V.P., *Emanatsionnyu monitoring geosred i protsessov*, Nauchnyy mir, M., 2009, 175 pp.]
- [10] Козлова И. А., Юрков А. К., “Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях”, *Уральский геофизический вестник*, 2005, №7, 31-34. [Kozlova I.A., Yurkov A.K., “Metodicheskiye voprosy izmereniya sodержaniya radona-222 v pochvennom vozdukh pri monitoringovykh nablyudeniyyakh”, *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik*, 2005, №7, 31–34].
- [11] Кожурин А. И., Ким Чун Ун, “Активные разломы о. Сахалин, оценка магнитуды и повторяемости максимально возможных землетрясений”, *Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири*, ИТиГ им. Ю.А.Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, 2010, 312 с. [Kozhurin A.I., Kim Chun Un, “Aktivnyye razlomy o. Sakhalin, otsenka magnitudy i povtoryayemosti maksimal'no vozmozhnykh zemletryaseniy”, *Problemy seysmichnosti i sovremennoy geodinamiki Dal'nego Vostoka i Vostochnoy Sibiri*, ITiG im. YU.A.Kosygina DVO RAN, Khabarovsk, 2010, 312 pp.]
- [12] Стрельцов М. И., Кожурин А. И., *Активные разломы и катастрофические землетрясения Сахалина (Апреловский активный разлом, результаты тренченга)*, ИМГиГ ДВО РАН, Южно-Сахалинск, 2002, 4 с. [Strel'tsov M.I., Kozhurin A.I., *Aktivnyye razlomy i katastroficheskiye zemletryaseniya Sakhalina (Aprelovskiy aktivnyy razlom, rezul'taty trenchenga)*, IMGiG DVO RAN, Yuzhno-Sakhalinsk, 2002, 4 pp.]
- [13] Рождественский В. С., Сапрыгин С. М., “Активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине”, *Тихоокеан. геология*, 18:6 (1999), 59-70. [Rozhdestvenskiy V.S., Saprygin S.M., “Aktivnyye razlomy i seysmichnost' na YUzhnom Sakhaline”, *Tikhookeanskaya geologiya*, 18:6 (1999), 59-70].
- [14] Chelnokov G., Zharkov R., Bragin I., “Radon monitoring in groundwater and soil gas of Sakhalin island”, *Journal of geoscience and environment protection*, 2015, №3, 48-53.

- [15] Маренный А. М. и др., “Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 1 – программа и организация исследований”, *Аппаратура и новости радиационных измерений*, 2014, № 4, 33-38. [Marennyy A. M. et al., “The Comprehensive Monitored Research of the Formation of the Radon Fields in the Massifs of Soil Part 1. The Program and Organization of the Research”, *ANRI*, 2014, № 4, 33-38].
- [16] Маренный А. М. и др., “Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Ч. 5. Результаты мониторинга радона внутри грунтовых массивов”, *Аппаратура и новости радиационных измерений*, 2015, № 3, 52-63. [Marennyy A. M. et al., “The Comprehensive Monitored Research of the Formation of the Radon Fields in the Massifs of Soil. Part 5 - The Results of Laboratory Determination of the Radiation-Physical Properties of the Soil Massifs”, *ANRI*, 2015, № 3, 52-63].

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Зубков С. И. Радоновые предвестники землетрясений // *Вулканология и сейсмология*. 1981. №6. С. 74-105
- [2] Cicerone R. D., Ebel J. E., Beitton J., A. Systematic compilation of earthquake precursors // *Tectonophysics*. 2009. no. 476. pp. 371-396.
- [3] Dubinchuk V. T. Radon as a precursor of earthquakes. Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. Proceedings of an Advisory Group Meeting held in Vienna, Vienna, 9-12 September 1991. Vienna. 1991. pp. 6–22.
- [4] Фирстов П. П., Макаров Е. О. Динамика подпочвенного радона на Камчатке. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2018. 145 с.
- [5] Закупин А. С. и др. Оценка сейсмической опасности на юге Сахалина на 2018 год (по данным оперативного каталога) // *Геосистемы переходных зон*. 2018. Т. 2. № 1. С. 52-56.
- [6] Макаров Е. О. Отклик в динамике подпочвенного радона на подготовку сильных землетрясений Камчатки и северо-западной окраины Тихого океана. автореф. дис. на соискание степени канд. физ.-мат. наук. Петропавловск-Камчатский, 2017. 22 с.
- [7] Фирстов П. П., Макаров Е. О. Реакция подпочвенного и растворенного в подземных водах радона на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры // *Сейсмические приборы*. 2015. Т. 51. №4. С. 58-80.
- [8] Уткин В. И., Юрков А. К. Радон как индикатор геодинамических процессов // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. №2. С. 277–286.
- [9] Рудаков В. П. Эманационный мониторинг геосред и процессов. М.: Научный мир. 2009. 175 с.
- [10] Козлова И. А., Юрков А. К. Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях // *Уральский геофизический вестник*. 2005. №7. С. 31-34.
- [11] Кожурин А. И., Ким Чун Ун Активные разломы о. Сахалин, оценка магнитуды и повторяемости максимально возможных землетрясений. Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири. Хабаровск. ИТиГ им. Ю.А.Косыгина ДВО РАН. 2010. 312 с.
- [12] Стрельцов М. И., Кожурин А. И. Активные разломы и катастрофические землетрясения Сахалина (Апреловский активный разлом, результаты тренченга). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. 2002. 4 с.
- [13] Рождественский В. С., Сапрыгин С. М. Активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине // *Тихоокеан. геология*. 1999. Т. 18. №6. С. 59-70.
- [14] Chelnokov G., Zharkov R., Bragin I. “Radon monitoring in groundwater and soil gas of Sakhalin island // *Journal of geoscience and environment protection*. 2015. no. 3. pp. 48-53.”.

- [15] Маренный А. М. и др. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 1 – программа и организация исследований // Аппаратура и новости радиационных измерений. 2014. №4. С. 33-38.
- [16] Маренный А. М. и др. Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Ч. 5. Результаты мониторинга радона внутри грунтовых массивов // Аппаратура и новости радиационных измерений. 2015. №3. С.52-63.

Для цитирования: Макаров Е. О., Фирстов П. П., Костылев Д. В., Рылов Е.С., Дудченко И. П. Первые результаты мониторинга подпочвенного радона сетью пунктов, работающей в тестовом режиме, на юге острова Сахалин // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. № 5(25). С. 99-114. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-99-114

For citation: Makarov E. O., Firstov P. P., Kostylev D. V., Rylov E. S., Dudchenko I. P. First results of subsurface radon monitoring by network of points, operating in the test mode on the south of Sakhalin iseland, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2018, **25**: 5, 99-114. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-99-114

Поступила в редакцию / Original article submitted: 30.11.2018

DOI: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-99-114

MSC 86A17

FIRST RESULTS OF SUBSURFACE RADON MONITORING BY NETWORK OF POINTS, OPERATING IN THE TEST MODE ON THE SOUTH OF SAKHALIN ISELAND ¹

E. O. Makarov^{1,2}, P. P. Firstov¹, D. V. Kostylev^{3,5}, E. S. Rylov⁴, I. P. Dudchenko⁵

¹ Kamchatka Branch of Federal Research Center Geophysical Survey RAS, 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piypa b-r., 9, Russia

² Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, st., 4, Russia

³ Sakhalin Branch of Federal Research Center Geophysical Survey RAS, 693010, Yuzhno-Sakhalinsk, Tihookeanskaya str., 2A, Russia

⁴ Institute of Volkanology and Seismology Far Eastern Branch RAS, 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piypa b-r., 9, Russia

⁵ Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch RAS, 693022, Yuzhno-Sakhalinsk, Nauki str., 1B, Russia

E-mail: ice@emsd.ru

Radon monitoring in the world literature is recognized as a promising method for predicting earthquakes. In the last decade on the Kamchatka Peninsula, the prospect of radon method to forecast subduction earthquakes has been quite convincingly demonstrated. The southern part of Sakhalin Island is a region of high seismic risk. The results obtained on Kamchatka give grounds to hope for the detection of precursor anomalies in the radon field (Rn) and for weaker, but also dangerous, small-focus earthquakes on Sakhalin Island. A network consisting of three points for monitoring volume activity of radon (VA Rn) in the air of the subsoil is currently operating in the test mode in the south of Sakhalin Island. In order to better understand the conditions of Rn migration to the surface, seismic survey was performed in the vicinity of the installed radiometers. Volume activity of radon is registered by α -radiation using the method of forced convection. The manifestation of weak seismic activity in the south of Kuril-Kamchatka and in the north of the Japanese seismic regions was reflected in the dynamics of the subsurface radon at two points. After testing the equipment and installing stationary points, it is planned to use radon monitoring data as an additional parameter to substantiate conclusions about the seismic hazard of the south of Sakhalin Island.

Key words: radon monitoring, Kamchatka, Sakhalin, earthquake prediction

© Makarov E. O. et al, 2018

¹This work was supported by the RFBR grant No. 16-05-00162