

**Отклик в поле подпочвенного радона на землетрясение 23.01.2020 г. с  $M_L=4.2$  в заливе Анива вблизи острова Сахалин**

**Е.О. Макаров<sup>1,4</sup>, Д.В. Костылев<sup>2,3</sup>, П.П. Фирстов<sup>1</sup>, П.А. Каменев<sup>3</sup>, Н.В. Богинская<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>«Единая геофизическая служба РАН», Камчатский филиал, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: [ice@emsd.ru](mailto:ice@emsd.ru)

<sup>2</sup>«Единая геофизическая служба РАН», Сахалинский филиал, Южно-Сахалинск

<sup>3</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

<sup>4</sup>Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский

**Введение**

Для краткосрочного прогноза сильных землетрясений широкое применение нашел радоновый мониторинг [7]. Сеть пунктов для регистрации объемной активности радона (ОА Rn) работает на полуострове Камчатка более 20 лет. В результате работы получены достаточно убедительные примеры возникновения краткосрочных аномалий в поле подпочвенного радона перед сильными субдукционными землетрясениями с магнитудой  $M > 5$ . По сети пунктов для зарегистрированных бухтообразных аномалий вычислялся азимут их прихода и кажущаяся скорость ( $v_{\text{каж}}$ ). Азимут с отклонением не более  $30^\circ$  совпадал с направлением на эпицентр, а  $v_{\text{каж}} = 14-144$  км/сутки. Исходя из этого, был сделан вывод о возможном формировании медленных «деформационных волн» на последней стадии подготовки сильных субдукционных землетрясений [3].

Южная часть острова Сахалин является регионом высокой сейсмической опасности. Здесь происходят мелкофокусные землетрясения, которые могут представлять опасность как для населения, так и для производственных структур острова. Поэтому, с одной стороны, радоновый метод может быть комплексирован с другими методами для прогноза сильных землетрясений, а с другой – исследования подпочвенного радона (ПР) как индикатора напряженно-деформированного состояния геосреды на острове Сахалин являются перспективными и необходимыми для понимания механизма формирования предвестниковых аномалий для мелкофокусных землетрясений.

Силами Камчатского филиала совместно с Сахалинским филиалом «Единой геофизической службы РАН» (КФ и СФ ФИЦ ЕГС РАН) и Институтом морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН (ИМГиГ ДВО РАН) летом 2018 г. была организована сеть радонового мониторинга на юге острова Сахалин (рис. 1) [1, 7].

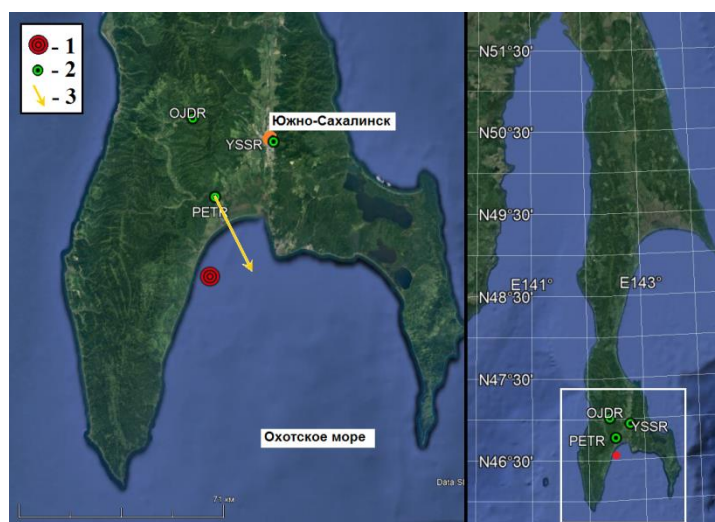


Рис. 1. Схема размещения пунктов регистрации концентрации ПР на юге острова Сахалин и эпицентр землетрясения 23.01.2020 г.

1 – эпицентр землетрясения 23.01.2020 г. с  $M_L=4.2$ ; 2 – пункты регистрации ПР; 3 – азимут на источник возмущения.

Названия пунктов:  
OJDR – Ожидаево;  
YSSR – Южно-Сахалинск;  
PETR – Петропавловское.

## Описание сети пунктов радонового мониторинга

Сеть пунктов регистрации объемной активности радона на юге о. Сахалин организована аналогично созданной на Камчатке и подробно описанной в работе [3], но основу ее составляют современные радиометры RADEX MR107, где регистрация объемной активности радона ведется по  $\alpha$ -излучению. Способ пассивной регистрации в объеме накопительной камеры уступил место предложенной в работе [5] методике принудительной конвекции, когда подпочвенный воздух, содержащий радон, с помощью компрессора нагнетается в камеру, где установлен радиометр [7]. Такая методика позволяет снизить уровень метеорологических помех. В настоящее время на о. Сахалин функционирует сеть из трех пунктов мониторинга ОА Rn в воздухе подпочв, которые образуют почти правильный треугольник с апертурой  $\sim 30$  км, что позволяет считать диаграмму направленности сети почти круговой.

## Краткие сведения о сейсмичности

23 января 2020 г. в заливе Анива юго-восточнее с. Таранай Анивского района было зарегистрировано землетрясение с магнитудой  $M_L=4.2$ , которое сопровождалось афтершоками. Наибольшие проявления от землетрясения испытали жители населенных пунктов юго-восточного побережья Сахалина. Оперативное определение основных параметров очага землетрясения 23 января 2020 года было выполнено в РИОЦ «Южно-Сахалинск» по данным региональной сети сейсмических станций Дальнего Востока и сейсмических станций университета Хоккайдо. Эпицентр землетрясения находился в заливе Анива на расстоянии 9 км от с. Таранай. Землетрясение ощущалось в с. Таранай с интенсивностью в 4 балла, в г. Анива (20 км) – 3-4 балла, в г. Корсаков (25 км), г. Невельск (49 км) и п. Шебунино (49 км) – 2 балла.

Таблица. Параметры землетрясения 23 января 2020 г. по данным сейсмологических центров

Источник	$t_0$ , чч:мин:сс	Эпицентр		$h$ , км	Магнитуда		
		$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$		$M_S / M_{LH}$	$mb / M_{PV}(A)$	$M_L$
РИОЦ «Южно-Сахалинск»	06:22:39.5	46.50	142.50	13	4.0 / –	– / 4.5	4.2
СФ ФИЦ ЕГС РАН (опер-ный каталог)	06:22:39.0	46.54	142.47	13	– / 4.0	– / 4.1	4.2
ССД ФИЦ ЕГС РАН	06:22:39.0	46.54	142.41	10	– / –	4.2 / –	–
EMSC	06:22:39.5	46.54	142.41	10	– / –	4.2 / –	–

Примечание. ССД ФИЦ ЕГС РАН – Служба срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН, Обнинск, Россия; РИОЦ «Южно-Сахалинск» – региональный информационный обрабатывающий центр; EMSC – Европейский сейсмологический центр.  $M_{PV}(A)$  – магнитуда по объемной волне  $P$  (тип аппаратуры  $A$ );  $M_S$  – магнитуда по поверхностной волне Релея;  $M_L$  – локальная магнитуда;  $mb$  – магнитуда по объемной волне  $P$ .

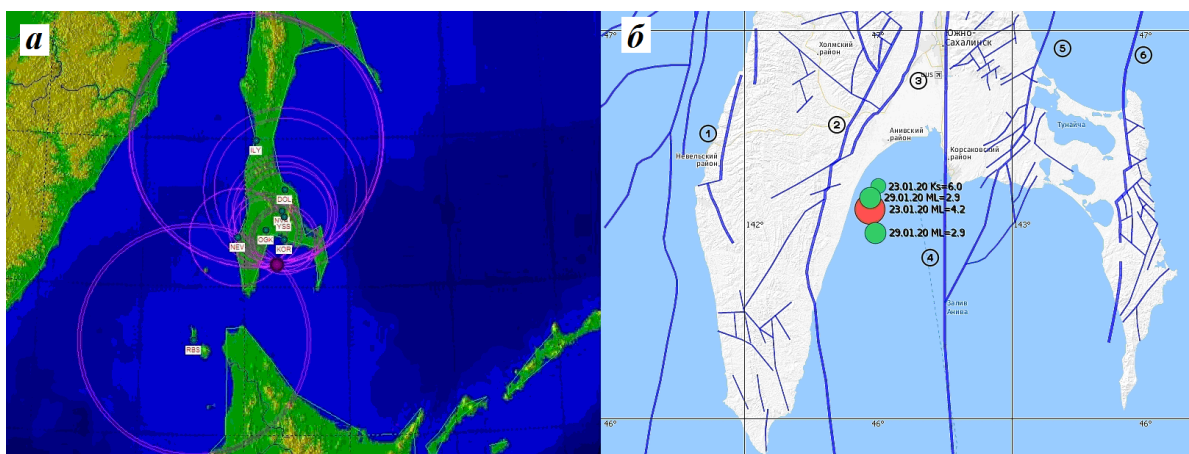


Рис. 2. Эпицентр землетрясения 23 января 2020 года (а), тектоника Южной части о. Сахалина по [2], и эпицентры главного события и его наиболее сильных афтершоков (б). 1 – Западно-Сахалинский разлом; 2 – Центрально-Сахалинский разлом; 3 – Апрельский разлом; 4 – Сусунайский разлом; 5 – Мерейский разлом; 6 – Тонино-Анивский разлом.

Афтершоковая активность процесса была кратковременной и завершилась на седьмые сутки после основного толчка. За первые сутки произошел один афтершок с  $K_s=6.0$ , оставшиеся два возникли на седьмые сутки, магнитуда каждого из них составила  $M_L=2.9$ . Глубины очагов всех произошедших событий локализованы в пределах 10-13 км. Схожие результаты были получены международным сейсмологическим центром EMSC и службой срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН (таблица).

Землетрясение 23 января 2020 г. произошло в пределах структуры Центрально-Сахалинского (Тынь-Поронайского) взбросо-надвига. Наиболее детально разломы и тектонические нарушения южной части Сахалина отражены на схеме из работы [2] (рис. 2б). На ней видно, что для области от  $46.0^\circ\text{N}$  до  $47.0^\circ\text{N}$  характерно дробление земной коры, с большим количеством локальных разломов северо-восточного и северо-западного направлений. Западной границей этой области может условно служить  $142.2^\circ\text{E}$ , а восточной – долгота  $142.7^\circ\text{E}$ . На показанной тектонической схеме отчетливо видны опережающие нарушения, секущие Центрально-Сахалинский разлом. Именно с ним и связаны, в основном, очаги землетрясений в этом районе [2].

### Отражение подготовки землетрясения 23.01.2020 г. с $M_L=4.2$ в поле подпочвенного радона

Перед землетрясением 23.01.2020 г. с  $M_L=4.2$  в поле подпочвенного радона были зафиксированы синфазные бухтообразные аномалии отрицательной полярности длительностью  $\sim 2$  сут, не связанные с резкими изменениями атмосферного давления (рис. 3а). Относительная амплитуда аномалий ( $\delta = ((A_A - A_\Phi) / A_\Phi) \cdot 100\%$ ) была достаточно мала и составила  $\delta_{\text{OJDR}} = -21\%$ ,  $\delta_{\text{PETR}} = -21\%$  и  $\delta_{\text{YSSR}} = -17\%$ . Время упреждения, принятое как время между моментом возникновения аномалии и событием, составило 17-19 сут.

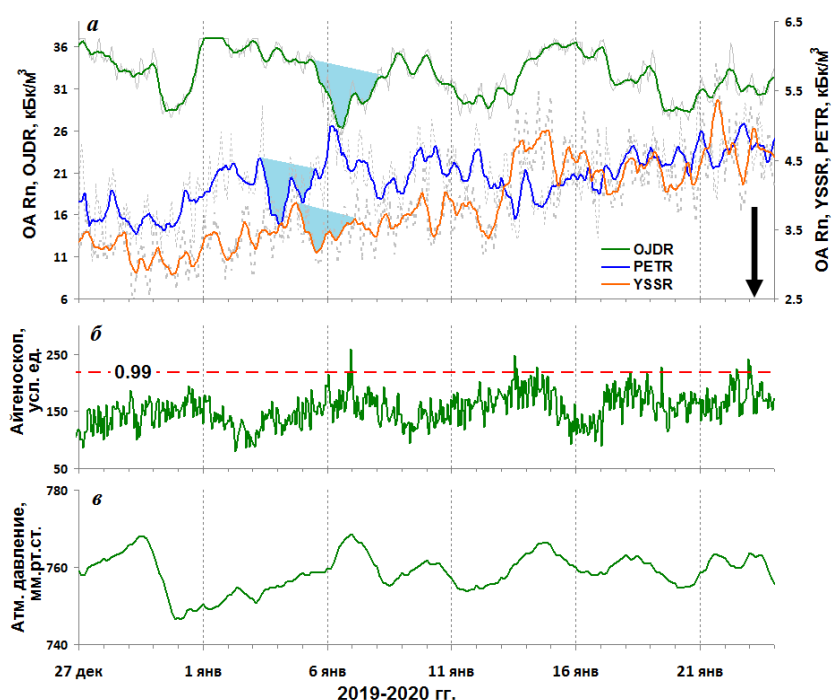


Рис. 3. Динамика ОА Rn на пунктах регистрации юга о. Сахалин с 27 декабря 2019 г. по 24 января 2020 г. (а), временной ряд, построенный по методу «айгеноскопии» (б), атмосферное давление (в). Момент землетрясения показан жирной стрелкой, аномалии выделены светло-синим цветом.

Время относительных сдвигов моментов вступлений для выделенных бухтообразных аномалий в ОА Rn оценивалось по максимуму коэффициента кросс-корреляции между временными рядами (рис. 3а). При допущении плоского фронта

возмущения, распространявшегося с постоянной скоростью и вызвавшего аномалии в поле подпочвенного радона, по разности моментов прихода выделенных вступлений был оценен сектор, центральная линия которого принята как азимут на источник возмущения. Он составил  $\alpha = 154^\circ$ , что удовлетворительно совпадает с направлением на эпицентр землетрясения (рис. 1). При этом диапазон кажущейся скорости распространения возмущения составил  $v_{\text{каж}} = 12-14$  км/сут.

Следует отметить, что случаи возникновения отрицательных радоновых предвестниковых аномалий перед землетрясениями отмечаются крайне редко [3, 6]. Поэтому зарегистрированные на сети пунктов юга Сахалина радоновые аномалии, предваряющие землетрясение, следует считать уникальными.

Выделить аномалии с такой малой амплитудой на фоне большого числа помех достаточно сложно, и при экспертной оценке временных рядов в первую очередь обращалось внимание на синфазные вариации на всех пунктах регистрации согласно методике, описанной в [3]. Для более достоверного определения момента возникновения синфазных вариаций трех временных рядов ПР, имеющиеся данные были обработаны по методу «айгеноскопии» [4]. Были выделены реперные точки, т.е. моменты коллективного поведения трех рядов данных ПР. Момент максимального превышения сигнального порога, определенного методикой как квантиль, равный 0.99, находится во временной окрестности выделенных экспертной оценкой синфазных аномалий, что подтверждает обоснованность выделения предвестника.

### **Заключение**

Первые результаты выделения предвестниковых аномалий в поле подпочвенного радона для мелкофокусных землетрясений юга о. Сахалин дают обнадеживающие результаты. По-видимому, так же как и субдукционные землетрясения, мелкофокусные землетрясения могут предваряться квазивязким течением геоматериала, формирующим «деформационные волны», которые воздействуют на эманулирующий горизонт в пунктах регистрации и изменяют величину  $OA R_n$  в зоне аэрации.

Работа выполнялась в рамках гос. задания № АААА-А19-119031490088-8, и при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00493.

### **Список литературы**

1. Макаров Е.О., Фирстов П.П., Костылев Д.В. и др. Первые результаты мониторинга подпочвенного радона сетью пунктов, работающей в тестовом режиме, на юге острова Сахалин // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 5. С. 99-114.
2. Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. Структурные взаимоотношения неогеновых и четвертичных образований, активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18. № 6. С. 59.
3. Фирстов П.П., Макаров Е.О. Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский, 2018. 148 с.
4. Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухова И.П. и др. Поиск предвестниковых аномалий сильных землетрясений по данным мониторинга подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 1. С. 16-32.
5. Уткин В.И., Юрков А.К. Радон как индикатор геодинамических процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 2. С. 277-286.
6. Cicerone R.D., Ebel J.E., Beittton J.A. Systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. V. 476. P. 371-396.
7. Makarov E., Firstov P., Kostylev D. et al. Test mode of operation network of monitoring subsoil radon in the south of Sakhalin // E3S Web of Conferences. 2018. 62. DOI: 10.1051/e3sconf/20186203007