

УДК 574.5(571.1):546.296

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДОНА-222 В ПОЧВАХ ПОЙМЫ И НАДПОЙМЕННЫХ ТЕРРАС РЕК ИРТЫША И ТОБОЛА

Алимова Гульсем Салимовна<sup>1</sup>,  
gulsem76@mail.ru

Токарева Алёна Юрьевна<sup>1</sup>,  
aytokareva@list.ru

Уткина Ирина Александровна<sup>1</sup>,  
utkina.67@bk.ru

Самкова Мария Владимировна<sup>1</sup>,  
maria-samkova08081602@mail.ru

<sup>1</sup> Тобольская комплексная научная станция Уральского отделения Российской академии наук  
Россия, 626152, г. Тобольск, ул. имени академика Юрия Осипова, 15.

**Актуальность.** Полученные данные по распределению в почвах естественного радионуклида – радона-222, вносящего ключевую радиационную нагрузку для развития рака легких, актуальны как региональные показатели для Тюменской области при оценке потенциальной радоноопасности почв.

**Цель:** рассмотреть взаимосвязи физических параметров почвы (температуры, глубины) и атмосферного воздуха (температуры, влажности, давления) с плотностью потока радона-222 в почве, определить потенциально радоноопасные участки почв пойм и надпойменных террас рек Иртыша и Тобола.

**Объекты:** плотность потока радона-222 в почвах пойм и надпойменных террас рек Иртыша и Тобола в границах Тобольского, Вагайского и частично Ярковского районов Тюменской области Российской Федерации.

**Методы.** Измерение плотности потока радона-222 в почве выполнено методом пассивной сорбции радона-222 на активированном угле с последующим измерением активности сорбированного радона-222 в лабораторных условиях с помощью комплекса «Камера-01». Измерения активности радона-222 в угле выполнялись по  $\beta$ -излучению короткоживущих дочерних продуктов распада радона – свинца-214 и висмута-214, находящихся в состоянии радиоактивного равновесия с радоном-222, сорбированным в угле.

**Результаты.** Приводятся данные (2018–2021 гг.) по распределению плотности потока радона-222 в почвах пойм и надпойменных террас рек Иртыша и Тобола в границах Тобольского, Вагайского и частично Ярковского районов Тюменской области Российской Федерации. Плотность потока радона-222 с поверхности почвы на 73 из 76 исследуемых участках почв, расположенных в пойме и надпойменных террасах Иртыша и Тобола, не превышает 80 мБк/(м<sup>2</sup>·с), что относит данные почвы к первому классу радоноопасности в соответствии с ОСПОРБ 99/2010. Поверхность почв данных участков не является потенциально опасной. На глубине почв 0,4–1,0 м плотность потока радона-222 в среднем варьирует от 109,3 до 495 мБк/(м<sup>2</sup>·с), максимальные значения варьируют в пределах 1085...1280 мБк/(м<sup>2</sup>·с). Установлено достоверное влияние глубины почвы на распределение плотности потока радона-222 – от глубины к поверхности почвы концентрация радона-222 уменьшается. Плотность потока радона-222 не зависит от незначительных колебаний атмосферного давления, не установлены статистически значимые связи с температурой и влажностью атмосферного воздуха. Выявлено увеличение в почве средних значений плотности потока радона-222 в летний (август) и осенний (сентябрь) месяцы по сравнению с весенним (май) практически в два раза.

### Ключевые слова:

Иртыш, Тобол, почва, пойма, надпойменная терраса, плотность потока радона-222.

### Введение

На почвах поймы и надпойменных террас таких крупных рек, как Иртыш и Тобол, в Российской Федерации расположены населенные пункты разного типа, фермерские хозяйства, предприятия химической, нефтехимической промышленности, активно развивается строительство жилых, общественных и административных зданий. Во многих странах для обеспечения экологической безопасности таких территорий все больше внимания уделяется естественной радиоактивности [1]. Основной вклад в естественную радиоактивность вносит изотоп радиоактивного газа – радон-222, образуется в результате  $\alpha$ -распада нуклида радия-226. Постоянно образуясь в природе при радиоактивном распаде материнских ядер, радон-222 перемешивается с атмосферным воз-

духом и представляет опасность для человека, вызывая рак органов дыхания [2, 3]. Установлено, что около 10 из 100 % зарегистрированных случаев рака легкого в мире связывают с воздействием радона-222 на организм человека [3, 4]. В Российской Федерации на заболеваемость и смертность населения от рака легкого, вызванного действием радона-222, приходится более 3000 новых случаев в год, что составляет около 6 % от общего количества числа новообразований органов дыхания [5]. Величиной, характеризующей активность радона-222, проходящего через единицу площади в единицу времени, является плотность потока радона-222, выражаемая в единицах мБк/(м<sup>2</sup>·с). В Российской Федерации в настоящее время действует основной нормативный документ – СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиа-

ционной безопасности» с изменениями на 16 сентября 2013 г. (ОСПОРБ 99/2010), в котором указаны допустимые значения плотности потока радона-222 с поверхности почв и грунтов, предназначенных для строительства жилых зданий, – не более 80 мБк/(м<sup>2</sup>·с), и не более 250 мБк/(м<sup>2</sup>·с) для зданий производственного назначения.

Исследуемая территория почв в административно-территориальном отношении находится в пределах Тобольского, Вагайского и Ярковского районов Тюменской области Российской Федерации. По почвенно-экологическому районированию исследуемая территория входит в Бореальный географический пояс, Европейско-Западно-Сибирскую таежно-лесную почвенно-биоклиматическую область [6]. По геоморфологической структуре исследуемая территория почв расположена в центральной части Западно-Сибирской равнины в границах Тобольского материка, в Кондинской и Среднеиртышской низменностях. Рельеф представляет собой четвертичные отложения низких террас озерно-аллювиального генезиса разных возрастов [7, 8]. Четвертичные ледниковые глины относятся к наиболее радиоактивным после юрских глин, в которых сосредоточены природные радиоактивные вещества, являющиеся потенциальным источником радонотделения [9], выявлено, что коэффициент эманирования образцов озерного ила самый высокий (0,56) по сравнению с аргиллитом (менее 0,1) [10].

В основном всплеск радоновых аномалий связывают с индуцированием сейсмотектонических движущих сил [3, 11–13], но в то же время появились публикации о необходимости различать аномалии радона-222 нетектонического происхождения [14]. Недостаточная изученность радоноопасности почв данной территории вызывает необходимость проведения исследований и получения современных данных о потенциально радоноопасных участках.

На скорость эсхалиции радона-222 из почвы могут влиять физические свойства почвы и атмосферного воздуха [15]. Этим исследованиям посвящен ряд публикаций. В одних публикациях выявлено незначительное влияние температуры и влажности атмосферного воздуха на концентрацию почвенного радона-222 [16], в других – слабое влияние температуры почвы [17]. В работе [18] ссылаются на отрицательную корреляцию между температурой воздуха и концентрацией радона-222, а в публикации [19], наоборот, – на положительную корреляцию между этими показателями. Авторы [20] предлагают экспоненциальную модель зависимости концентрации радона-222 от температуры в приземном слое атмосферы, подтвержденную индексом согласия Уиллмотта. Полученные исходные результаты говорят о сложности изучения факторов, влияющих на пути миграции и эсхалиции радона-222 в почвенном газе и атмосферном воздухе. Поэтому необходимо проводить подобные исследования на большем числе территорий, с разными granulометрическим составом и физическими свойствами почвы. Полученные данные полезны для составления карт концентраций радона-222, что позволяет прогнозировать радоновый риск.

*Цель работы:* изучить влияние физических параметров почвы (температуры, глубины) и атмосферного воздуха (температуры, влажности, давления) на распределение плотности потока радона-222 в почве; выявить потенциально радоноопасные участки почв поймы и надпойменных террас рек Иртыша и Тобола.

#### Материалы и методы

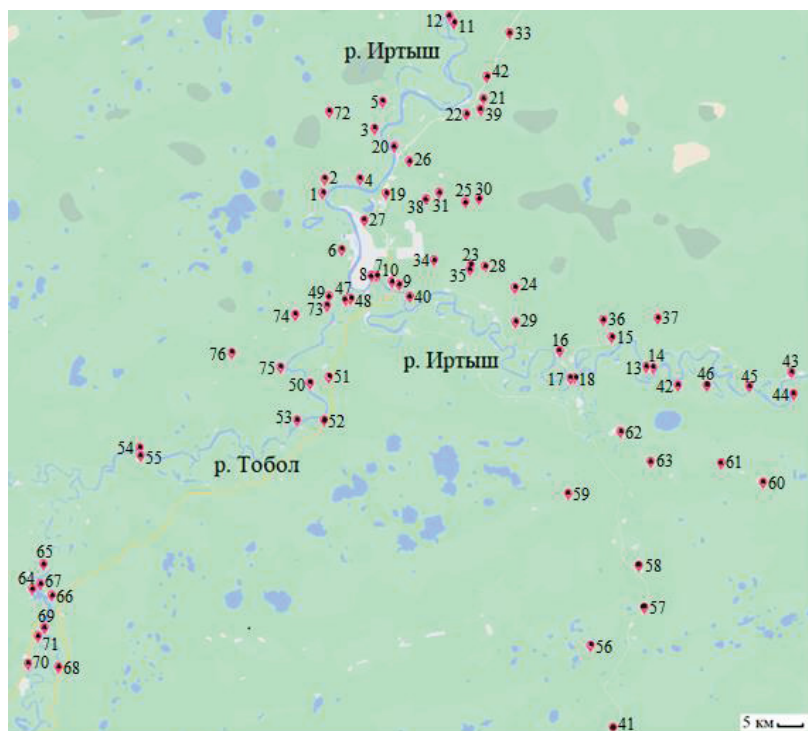
Работа проведена в два этапа. Первым этапом работ были выполнены измерения плотности потока радона-222 в почвах пойм и надпойменных террас рек Иртыша и Тобола в границах Тобольского, Вагайского и частично Ярковского районов Тюменской области Российской Федерации. За четыре года удалось подобрать 76 участков (рис. 1). Общая площадь исследованной территории составила около 15438 км<sup>2</sup>. Участки подбирались в окрестностях, сопряженных с территориями населенных пунктов, расположенных в пойме и надпойменных террасах рек Тобола и Иртыша, также учитывалась их доступность, так как большая часть исследуемой территории является заболоченной [8].

По геоморфологическому районированию участки находятся в пределах Западно-Сибирской низменности: Кондинская низменность (1–6, 72, 76), Тобольский материк (7–46), Среднеиртышская низменность (47–71, 73–75) (рис. 1).

Первый этап исследований проводился в период с июня по июль ежегодно при температуре воздуха 23–30 °С, атмосферном давлении 746–761 мм рт. ст. и влажности воздуха 40–79 %.

Измерения плотности потока радона-222 проводились на участках с поверхности и на глубине 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 м почв. В данных отверстиях и с поверхности почвы выполнены измерения плотности потока радона-222 (средней за 4 часа) методом пассивной сорбции. В качестве пассивного пробоотборника применялась накопительная камера НК-32 (90×70 мм, снаряженная масса не более 50 грамм), содержащая внутри рабочий (сорбирующий) слой активированного угля, пересыпаемый из сорбционной колонки СК-13, которая устанавливается сверху, предотвращая рабочий слой угля от поступления радона-222 из атмосферы. Использование защитной колонки СК-13 делает камеру «открытой» и за время пробоотбора позволяет избежать перепадов давления в атмосфере и в самой камере. Накопительную камеру с сорбционной колонкой устанавливали на заданную глубину почвы.

Измерения плотности потока радона-222 выполнены комплексом для мониторинга радона «КАМЕРА-01» (номер в Госреестре средств измерений Российской Федерации 26748-04). Данный прибор позволяет выполнять измерение плотности потока радона-222 от 3 до 10<sup>5</sup> мБк/(м<sup>2</sup>·с) с пределами допускаемой основной относительной погрешности измерений не более 30 %. Регенерация активированного угля для очистки от сорбированных молекул воды и радона-222 проводилась путем его сушки в сушильном шкафу ШСП-0.25-200 при температуре 140 °С в течение 2 часов.



1	58.317367; 68.116950	27	58.266867; 68.263717	53	57.891217; 68.027217
2	58.325733; 68.123583	28	58.180417; 68.684567	54	57.838483; 67.475783
3	58.438033; 68.309200	29	58.077217; 68.791933	55	57.824383; 67.479900
4	58.344583; 68.234400	30	58.307133; 68.664267	56	57.465667; 69.056983
5	58.483133; 68.330867	31	58.318067; 68.524883	57	57.537133; 69.242883
6	58.200733; 68.178483	32	58.532500; 68.692233	58	57.616583; 69.222467
7	58.162983; 68.303583	33	58.613017; 68.770350	59	57.753375; 68.975797
8	58.163617; 68.288067	34	58.192283; 68.507317	60	57.773833; 69.657417
9	58.150283; 68.378617	35	58.174767; 68.632267	61	57.810867; 69.510050
10	58.152283; 68.359283	36	58.081283; 69.099500	62	57.871283; 69.159867
11	58.631717; 68.580383	37	58.084050; 69.290150	63	57.814067; 69.262900
12	58.643883; 68.565333	38	58.306100; 68.478850	64	57.572933; 67.098083
13	57.991433; 69.274083	39	58.470417; 68.671283	65	57.619017; 67.137767
14	57.991433; 69.274067	40	58.124683; 68.422217	66	57.560000; 67.167250
15	58.048733; 69.128350	41	57.261300; 69.126617	67	57.581100; 67.127550
16	58.022250; 68.946900	42	57.958333; 69.360467	68	57.423967; 67.190233
17	57.972783; 68.998933	43	57.982900; 69.758317	69	57.497850; 67.140800
18	57.971821; 68.984982	44	57.942017; 69.766383	70	57.429333; 67.084083
19	58.316817; 68.337733	45	57.956467; 69.609817	71	57.482700; 67.119217
20	58.403833; 68.368483	46	57.958367; 69.462633	72	58.470733; 68.147300
21	58.491833; 68.680650	47	58.118900; 68.197383	73	58.116100; 68.128683
22	58.462483; 68.623517	48	58.120617; 68.213783	74	58.097517; 68.031217
23	58.182667; 68.635133	49	58.125633; 68.139367	75	57.988567; 67.972867
24	58.140950; 68.790083	50	57.959933; 68.071650	76	58.024350; 67.800967
25	58.300533; 68.615050	51	57.971333; 68.136833		
26	58.376717; 68.420550	52	57.891283; 68.120583		

**Рис. 1.** Расположение участков исследования плотности потока радона-222 в почвах

**Fig. 1.** Location of research sites of radon-222 flux density in soils

Согласно методике измерения плотности потока радона-222 с поверхности почвы допустимо использование от 1 до 5 накопительных камер; был произведен отбор проб угля с радон-222 в количестве двух на каждом участке [21]. Аппаратурное время измерения суммарной активности радона-222 в угле рабочего слоя НК-32 составило 2525 с.

Вторым этапом проведены исследования по выявлению статистически значимых связей между показателями физических свойств атмосферного воздуха (температуры, давления, влажности), температуры почвы и плотности потока  $^{222}\text{Rn}$  по глубине почвы от 0

до 0,6 м. Для этого в 2019 г. на территории Тобольской комплексной научной станции Уральского отделения Российской академии наук, расположенной в центральной части города Тобольска, был выделен экспериментальный участок. В почве участка были выполнены отверстия диаметром 20 см и глубиной 0,2; 0,4; 0,6 м. Одновременно определялись плотность потока радона-222 в трехкратной повторности, физические свойства атмосферного воздуха – температура, влажность – с помощью термогигрометра ИВА-6Н-КП, давление атмосферного воздуха – барометром БАММ-1 и температура почвы – термометром TESTO 830-T1.

Статистический анализ полученных данных проведен в программе Statistica 10.0 (StatSoft Inc., США, 2011) при использовании тестов Колмогорова–Смирнова, критерия Шапиро–Уилка и Н-критерия Краскела–Уоллиса, критерия Стьюдента, коэффициента ранговой корреляции Спирмена  $K_S$ .

### Результаты и обсуждение

Нормальное распределение выборки данных по критериям Колмогорова–Смирнова (KS) подтверждается уровнем значимости  $p > 0,2$  и Шапиро–Уилки (SW) –  $p > 0,05$ . Полученные на экспериментальном участке выборки данных ( $n=311$ ) плотности потока радона-222 ( $Q$ ), температуры почвы ( $t_{\text{почвы}}$ ), параметров атмосферного воздуха (температуры ( $t$ ), давления ( $P$ ) и влажности ( $W$ )) по глубине почвы  $H$ , равной 0 ( $n=78$ ), 0,2 ( $n=78$ ), 0,4 ( $n=78$ ), 0,6 ( $n=77$ ) м, не подчиняются закону нормального распределения Гаусса, так как не выполняются указанные выше условия (табл. 1).

**Таблица 1.** Распределение выборки данных (по критериям Колмогорова–Смирнова (KS) и Шапиро–Уилки (SW))

**Table 1.** Distribution of data sampling ( $Q$ ,  $t_{\text{soil}}$ ,  $W$ ,  $P$ ,  $t$ ) by Kolmogorov–Smirnov (KS) and Shapiro–Wilkie (SW) criteria

$Q$ , мБк/(м <sup>2</sup> ·с)/ $Q$ , mBq/(m <sup>2</sup> ·s)	$n$	%	
KS=0,12321, $p < 0,01$ KS=0,12321, $p < 0,01$  SW=0,91105, $p=0$ SW=0,91105, $p=0$	0 < $x \leq 50$	113	36,3
	50 < $x \leq 100$	58	18,7
	100 < $x \leq 150$	60	19,3
	150 < $x \leq 200$	37	11,9
	200 < $x \leq 250$	25	8,0
	250 < $x \leq 300$	9	2,9
	300 < $x \leq 350$	7	2,3
350 < $x \leq 400$	2	0,6	
$W$ , %	$n$	%	
KS=0,13299, $p < 0,01$ KS=0,13299, $p < 0,01$  SW=0,92927, $p=0$ SW=0,92927, $p=0$	35 < $x \leq 40$	35	11,3
	40 < $x \leq 45$	60	19,3
	45 < $x \leq 50$	24	7,7
	50 < $x \leq 55$	48	15,4
	55 < $x \leq 60$	48	15,4
	60 < $x \leq 65$	60	19,3
65 < $x \leq 70$	36	11,6	
$t$ , °C	$n$	%	
KS=0,17177, $p < 0,01$ KS=0,17177, $p < 0,01$  SW=0,91650, $p=0$ SW=0,91650, $p=0$	5 < $x \leq 10$	36	11,6
	10 < $x \leq 15$	38	12,2
	15 < $x \leq 20$	142	45,7
	20 < $x \leq 25$	95	30,6
$t_{\text{почвы}}/t_{\text{soil}}$ , °C	$n$	%	
KS=0,06242, $p < 0,2$ KS=0,06242, $p < 0,2$  SW=0,97901, $p=0,00016$ SW=0,97901, $p=0,00016$	4 < $x \leq 6$	2	0,6
	6 < $x \leq 8$	14	4,5
	8 < $x \leq 10$	47	15,1
	10 < $x \leq 12$	43	13,8
	12 < $x \leq 14$	76	24,4
	14 < $x \leq 16$	58	18,6
	16 < $x \leq 18$	58	18,6
18 < $x \leq 20$	13	4,2	
$P$ , кПА/кРА	$n$	%	
KS=0,13311, $p < 0,01$ KS=0,13311, $p < 0,01$  SW=0,95668, $p=0$ SW=0,95668, $p=0$	99,5 < $x \leq 100$	24	7,7
	100 < $x \leq 100,5$	36	11,6
	100,5 < $x \leq 101$	83	26,7
	101 < $x \leq 101,5$	48	15,4
	101,5 < $x \leq 102$	72	23,2
	102 < $x \leq 102,5$	24	7,7
	102,5 < $x \leq 103$	24	7,7

Для оценки корреляционной связи между двумя показателями, у которых выборки данных не имеют нормального распределения, применен корреляционный анализ с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена  $K_S$  (табл. 2)

Оценка статистической значимости коэффициента ранговой корреляции Спирмена  $K_S$  выполнена с помощью теста Стьюдента по t-статистике по условию  $|t_{\text{набл}}| \geq t_{\text{крит}}$ :

$$t_{\text{набл}} = K_S \cdot (N-2)^{1/2} / (1-K_S^2)^{1/2}$$

**Таблица 2.** Корреляции рангового порядка Спирмена ( $K_S$ )  
**Table 2.** Spearman rank order correlations ( $K_S$ )

Параметр Parameter	$K_S$	$k(N-2)^{**}$	$P$	Качественная характеристика силы связи* Qualitative characteristic of the connection strength*	$t_{\text{набл}}$ $t_{\text{observed}}$	$t_{\text{крит}}$ $t_{\text{critical}}$
$Q$ , $H$	0,80	23,3	0,0000	высокая/high	6,43	3,7
$Q$ , $t$	0,22	3,9	0,0001	слабая/weak	0,45	8,6
$Q$ , $W$	0,10	1,8	0,0696	слабая/weak	0,14	5,9
$Q$ , $t_{\text{почвы}}(t_{\text{soil}})$	0,14	2,4	0,0151	слабая/weak	0,22	8,3
$Q$ , $P$	0,004	0,1	0,9507	незначима insignificant	0,001	6,3

Примечание: \*по шкале Чеддока; \*\* $k(N-2)$  – число степеней свободы, где  $N$  – число коррелируемых пар показателей,  $t_{\text{набл}}$  и  $t_{\text{крит}}$  – значения критерия Стьюдента.

Note: \*according to the Cheddock scale; \*\* $k(N-2)$  – number of degrees of freedom, where  $N$  is the number of correlated pairs of indicators,  $t_{\text{observed}}$  and  $t_{\text{critical}}$  are values of the Student's test.

В результате коэффициент корреляции является незначимым между величинами плотности потока радона-222 ( $Q$ ) и показателями почвы, атмосферного воздуха ( $t_{\text{почвы}}$ ,  $t$ ,  $W$ ,  $P$ ). Следует отметить, что в период проведения эксперимента колебания давления атмосферного воздуха были незначительны – от 99,5 до 103 кПа (табл. 1). Возможно, поэтому значимые связи между плотностью потока радона-222 и давлением атмосферного воздуха не выявлены. Так, в работе [22] указано, что резкие скачки атмосферного давления вызывают изменение значений плотности потока радона-222 с поверхности почвы: при резком падении атмосферного давления поток воздуха направлен из почв в атмосферу, что вызывает увеличение плотности потока радона-222 с поверхности почвы.

Статистически значимая корреляционная зависимость наблюдается только между значениями плотности потока радона-222 и глубиной почвы (табл. 2).

На диаграмме Тьюки показано уменьшение значения медианы плотности потока радона-222 к поверхности почвы (рис. 2).

Для выявления статистически значимых различий между значениями  $Q$  и периодом отбора проб почвенного воздуха на экспериментальном участке использован непараметрический метод с применением рангового Н-критерия Краскела–Уоллиса, при котором выраженные корреляции значимы при  $p < 0,05$  (табл. 3, 4).

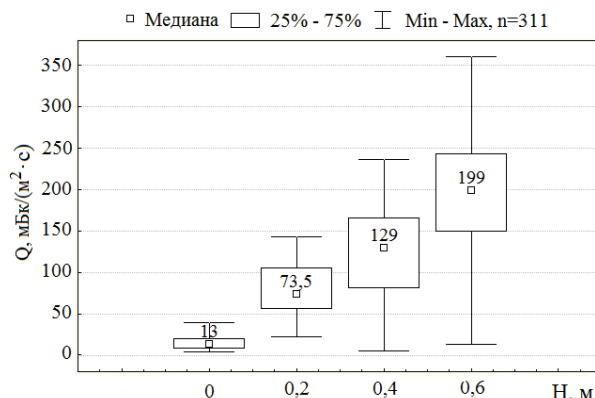


Рис. 2. Диаграмма Тьюки значений плотности потока радона-222 по глубине почвы, полученных на экспериментальном участке

Fig. 2. Tukey diagram of the radon-222 flux density values for the soil depth obtained at the experimental site

Таблица 3. Анализ парных различий (по дате отбора проб почвенного воздуха для определения  $Q$ ) с использованием  $H$ -критерия Краскела–Уоллиса

Table 3. Analysis of paired differences (by the date of sampling of soil air to determine  $Q$ ) using the Kruskal–Wallis  $H$ -criterion

№ пары/Pair no.	Месяц (парные различия) Month (paired differences)	n	Сумма рангов Sum of ranks	$H$ -критерий Краскела–Уоллиса для выборки данных $Q$ Kruskal–Wallis $H$ -criterion for the sample data $Q$	Уровень значимости, $p$ Significance level, $p$
1	Май/May	131	12267,50	29,8	0,0000
	Август August	96	13610,50		
2	Май/May	131	11701,00	30,2	0,0000
	Сентябрь September	84	11519,00		
3	Август August	96	8717,00	0,007	0,9337
	Сентябрь September	84	7573,00		

Таблица 4. Средние значения плотности потока радона-222, полученные на экспериментальном участке в 2019 г.

Table 4. Average values of the radon-222 flux density obtained at the experimental site in 2019

Глубина почвы, м Depth of soil, m	Средние значения плотности потока радона-222, полученные на экспериментальном участке в 2019 г., мБк/(м <sup>2</sup> ·с) Average values of radon-222 flux density obtained at the experimental site in 2019, mBq/(m <sup>2</sup> ·s)		
	Май/May	Август/August	Сентябрь/September
0	10,7	16,8	20,0
0,2	52,8	101,5	92,9
0,4	69,9	152,3	160,4
0,6	127,3	249,6	231,0

Выявлено увеличение средних значений плотности потока радона-222 в летний (август) и осенний (сентябрь) месяцы по сравнению с весенним (май) практически в два раза по всей глубине почвы – от 0 до 0,6 м, при этом условия проведения эксперимента (территория, тип почвы, глубина) оставались неиз-

менными (табл. 3, 4). Возможно, распределение плотности потока  $^{222}\text{Rn}$  в почве зависит от других факторов, например, от сезонных колебаний влажности почв или атмосферных осадков. В работе [23] установлено увеличение концентрации радона-222 в водной фракции почв в конце лета и осенью при высокой влажности почв. Сезонная динамика выделения радона-222 из почвы, где пиковое значение выхода радона-222 регистрировалось осенью, отмечена в работах и других авторов [24, 25].

На рис. 3 и в табл. 5 приведены средние значения и параметры распределения плотности потока радона-222 с поверхности и по глубине почвы в пределах Тобольского материка, Кондинской и Среднеиртышской низменностей. Не на всех 76 участках удалось отобрать пробы угля с радона-222, на глубинах почвы 0,4 м (75 участков), 0,6 м (74 участка), 0,8 м (67 участков), 1,0 м (48 участков) (табл. 5). Это обусловлено наличием грунтовых вод на глубине уже 0,6 м или наличием труднокопаемых тяжелых почвенных горизонтов с преобладанием глинистой фракции.

По результатам проведенных измерений с поверхности почв на 73 из 76 исследуемых участках средние значения плотности потока радона-222 не превышают 31,2 мБк/(м<sup>2</sup>·с) (рис. 3, табл. 5), за исключением участков 45, 46 и 50. Здесь наблюдается превышение допустимого значения плотности потока радона-222 с поверхности почв – более 80 мБк/(м<sup>2</sup>·с).

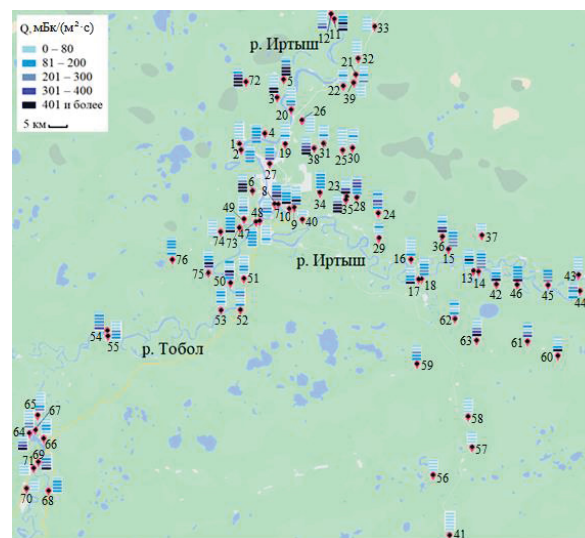


Рис. 3. Карта-схема распределения плотности потока  $^{222}\text{Rn}$  в пойме и надпойменных террасах рек Иртыша и Тобола по глубине почвы – 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 м

Fig. 3. Schematic map of radon-222 flux density distribution in the floodplain and fluvial terraces above floodplain of the Irtysh and Tobol Rivers by soil depth – 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 m

Участки 45 (Тобольский материк) и 46 (Среднеиртышская низменность) расположены в прирусловой пойме р. Иртыш вблизи деревень Быкова и Лукина Вагайского района Тюменской области, где с поверхности почвы зафиксированы максимальные значения плотности потока радона-222 – 135,5 и 112,0 мБк/(м<sup>2</sup>·с),

соответственно. Участок 50 (Среднеиртышская низменность) находится в приустьевой пойме р. Тобол в окрестностях деревни Большая Блинникова Тобольского района Тюменской области, где на поверхности почвы выявлено 157 мБк/(м<sup>2</sup>·с) (рис. 3, табл. 5). Возможно, здесь играют роль взвешенные наносы с рек, ежегодно попадающие на пойму в период паводка, которые могут приносить разные химические соединения, в том числе и радионуклиды ряда распада урана-238.

**Таблица 5.** Параметры распределения плотности потока радона-222 с поверхности и по глубине почв в пределах Тобольского материка, Кондинской и Среднеиртышской низменностей

**Table 5.** Parameters of radon-222 flux density distribution from the surface and by soil depth within Tobolsk mainland, Kondinskaya and Medium-Irtyshskaya lowlands

Геоморфологическая структура Geomorphological structure	Глубина почвы, м Soil depth, m	Количество участков Number of sites	Плотность потока радона-222, мБк/(м <sup>2</sup> ·с) Radon-222 flux density, mBq/(m <sup>2</sup> ·s)			
			Среднее Average	Минимум Minimum	Максимум Maximum	Среднеквадратичное отклонение Standard deviation
			Кондинская низменность Kondinskaya lowland	0	8	17,0
	0,2	8	98,6	13,0	182,0	61,8
	0,4	8	204,0	27,0	450,0	156,1
	0,6	8	257,5	37,0	652,0	249,7
	0,8	8	349,5	30,0	775,0	255,9
	1,0	8	495,0	17,0	1200,0	474,4
Тобольский материк Tobolsk mainland	0	40	28,4	5,0	135,5	28,1
	0,2	40	80,2	8,0	239,5	60,2
	0,4	39	113,8	7	279,0	79,3
	0,6	38	165,8	22,3	494,5	127,9
	0,8	35	237,2	25,5	1085	228,6
	1,0	25	319,5	7,0	1280	307,5
Среднеиртышская низменность Sredneirtyshskaya lowland	0	28	31,2	7,0	157,0	32,9
	0,2	28	71,9	2,5	138,0	42,3
	0,4	28	109,3	7,0	298,0	85,3
	0,6	28	133,8	7,5	460,0	111,6
	0,8	24	210,6	27,0	606,5	149,3
	1,0	15	214,1	2,0	571,0	187,1

На глубине 0,4–1 м, как на экспериментальном участке (рис. 2), так и на исследуемых участках 1–76 (рис. 3, табл. 5), средние значения плотности потока радона-222 составляют уже более 80 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и находятся в диапазоне 200...495 мБк/(м<sup>2</sup>·с), а максимальные – до 1280 мБк/(м<sup>2</sup>·с).

Рассеивание радона-222 от глубины к поверхности почв связано со свойствами газа. Образовавшись из материнских пород, радон-222, как инертный газ, поднимается вверх через слои почвы, не вступая в химические взаимодействия с её компонентами. Приближаясь к поверхности почвы, газ частично растворяется в молекулах воды, присутствующих в почве, частично адсорбируется частицами почвы различного гранулометрического состава. Достигая поверхности почвы, радон-222 диффузно перемешивается с атмосферным воздухом, но в силу своего большого атом-

ного веса (в 7–8 раз тяжелее воздуха) не поднимается в верхние слои атмосферы.

На некоторых участках максимальные значения плотности потока радона-222 на глубине почвы 0,8–1 м достигают до 1085...1280 мБк/(м<sup>2</sup>·с) (табл. 5). Это участок 6, надпойменная терраса р. Иртыш (38 м над уровнем моря) вблизи поселка Савинский Затон Тобольского района на глубине 1 м почвы – 1200 мБк/(м<sup>2</sup>·с), возможно, это связано с переносом радона-222 из подземных вод скважины (№ 8РГ, дата ликвидации 22.06.2015 г.), расположенной здесь. Это участок 35, надпойменная терраса р. Иртыш (94 м над уровнем моря) в окрестностях села Абалак Тобольского района на глубине 1 м почвы – 1280 мБк/(м<sup>2</sup>·с), и участок 42, надпойменная терраса р. Иртыш (51 м над уровнем моря) вблизи деревни Трушниково Вагайского района на глубине 0,8 м – 1085 мБк/(м<sup>2</sup>·с). По суммарной величине плотности потока радона-222 почв участка № 35 (2686 мБк/(м<sup>2</sup>·с)) и участка 42 (1422 мБк/(м<sup>2</sup>·с)) можно сделать выводы о высоком, по сравнению с другими территориями, содержании материнских радионуклидов радона-222 в подстилающих породах. То есть максимальные значения плотности потока радона-222 до 1280 мБк/(м<sup>2</sup>·с) на глубине почв 0,8–1 м исследуемых участков можно объяснить геологией, тектонической структурой и подстилающими породами данных территорий.

Все исследуемые участки почв расположены на крупной тектонической структуре – Западно-Сибирской платформе, на ней чехол из осадочных пород, представляющий собой Западно-Сибирскую плиту, на плите расположена Западно-Сибирская низменность – по форме рельефа равнина различной высоты. В долине Иртыша, в пределах Тобольского материка, где расположены участки № 35 и 42 (с максимальной плотностью потока радона-222), верхний отдел (олигоцен) палеогеновой системы кайнозойской эратемы представлен верхними горизонтами туртаской свиты с мощностью от 6 до 105 м [26]. Одним из её признаков является наличие в минералогическом спектре глауконитоподобных зерен, глин (гидрослюда–монтмориллонит), радиоактивность которых на 50 % обусловлена содержащимся в этих породах радия [26, 27]. Также суглинки и глины присутствуют в тобольской свите (начало среднего неоплейстоцена) с мощностью от 3 до 10 м, в делювиальных отложениях (dIII–Н, верхнее звено неоплейстоцена – голоцен) с мощностью до 6 м.

Тектоническая схема платформы в границах исследуемых участков включает в себя Тобольское поднятие, которое является линейной структурой Уральского складчатого пояса, возможно, сформированной на каледонидах Казахстана с последующей их переработкой герцинской складчатостью. Об этом свидетельствуют не только линейный («уральский») характер поднятия и наличие гранитоидов средне-позднепалеозойского возраста (источников урана и, соответственно, радона-222), но и отчетливо проявленный в грави- и магнитных полях типично торцевой характер сочленения этой структуры с крупными региональными структурами: Казахстанской и Ал-

тайской (Салымской) складчатых систем. С помощью региональной сейсморазведки выявлены разломы на границе этих систем, сопрягающихся в районе города Тобольска и села Абалак (исследуемый участок почв № 35) практически под прямым углом, через которые радон-222 может поступать естественным путем в окружающую среду [26].

На исследуемой территории высокие концентрации радона-222 зависят и от гранулометрического состава исследуемых почв. Почвы Кондинской низменности в большинстве представлены супесями, легкими и средними суглинками. Тобольский материк и Среднеиртышская низменность характеризуются суглинистыми почвами (легкими, средними и тяжелыми суглинками) [28]. Частицы глины, в силу своих высоких сорбционных свойств, выступают сорбентами радона-222, препятствуя тем самым выходу газа на поверхность почвы, образуя природный барьер [10]. К подобным выводам пришли другие исследователи [29, 30]. Распределение плотности потока радона-222 на исследуемых участках выглядит следующим образом: Кондинская низменность > Тобольский материк > Среднеиртышская низменность (табл. 5).

Таким образом, на исследуемых участках поверхность почв (за исключением 45, 46 и 50) к потенциально радоноопасной не относится. В то же время уже на глубине почв 0,4 м большинства участков плотность потока радона-222 превышает допустимое значение – 80 мБк/(м<sup>2</sup>·с). Поскольку исследуемые участки почв расположены вблизи населенных пунктов (деревень и поселков), где основные жилища – это одноэтажные частные строения, часто имеющие погреб или подвал, следует учитывать, что радоноопасными жилищами будут являться частные строения с неизолированным грунтом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The first version of the Pan-European indoor radon map / J. Elío, G. Cinelli, P. Bossew, J. L. Gutiérrez-Villanueva, T. Tollefsen, M. de Cort, A. Nogarotto, R. Braga // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2019. – V. 19. – P. 2451–2464.
2. World Health Organization: WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Ed. by H. Zeeb, F. Shannoun. – France: World Health Organization, 2009. URL: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44149/9789241547673\\_eng.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44149/9789241547673_eng.pdf?sequence=1) (дата обращения 06.07.2022).
3. Perrier F., Girault F. Harmonic response of soil radon-222 flux and concentration induced by barometric oscillations // *Geophysical Journal International*. – 2013. – V. 195. – P. 945–971.
4. Attributable to residential radon / J. Gaskin, D. Coyle, J. Whyte, D. Krewski // *Global Estimate of Lung Cancer Mortality Environmental Health Perspectives*. – 2018. – V. 126. – P. 1–8.
5. Ярошенко И.В., Малиновский Г.П., Васильев А.В. Обобщение онкоэпидемиологических исследований связи рака легкого с радоном // *Медицина труда и промышленная экология*. – 2019. – Т. 59. – № 2. – С. 92–96.
6. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России // Почвенный институт им. В.В. Докучаева. 2014. URL: <http://egrgp.eoil.ru/content/3reg.html> (дата обращения 10.01.2022).
7. Каретин Л.Н. Почвы Тюменской области / отв. ред. С.С. Трофимов. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. – 283 с.
8. Константинова Е.Ю. Почвы области сопряжения высоких террас реки Иртыш с краевой частью возвышенности Тобольский материк // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. – 2016. – № 2 (34). – С. 6–18.

#### Заключение

Плотность потока радона-222 с поверхности почвы на 73 из 76 исследуемых участков почв, расположенных в пойме и надпойменных террасах Иртыша и Тобола, не превышает 80 мБк/(м<sup>2</sup>·с). Поверхность почв данных участков не является потенциально опасной. На участках почв, расположенных в прирусловой пойме р. Иртыш в окрестностях деревень Быкова (№ 45) и Лукина (№ 46) Вагайского района Тюменской области, с поверхности почвы зафиксированы максимальные значения плотности потока радона-222 – 135,5 и 112,0 мБк/(м<sup>2</sup>·с) соответственно, в прирусловой пойме р. Тобол вблизи деревни Большая Блинникова (№ 50) Тобольского района Тюменской области – 157 мБк/(м<sup>2</sup>·с).

На глубине почв 0,4–1,0 м плотность потока радона-222 в среднем варьирует от 109,3 до 495 мБк/(м<sup>2</sup>·с), максимальные значения варьируют в пределах 1085...1280 мБк/(м<sup>2</sup>·с).

Установлено достоверное влияние глубины почвы на распределение плотности потока радона-222 – от глубины к поверхности почвы концентрация радона-222 уменьшается. Плотность потока радона-222 не зависит от температуры почвы и основных параметров атмосферного воздуха (температуры, незначительного перепада давления и влажности).

Выявлено увеличение в почве средних значений плотности потока радона-222 в летний и осенний месяцы по сравнению с весенним практически в два раза.

*Работа выполнена в рамках фундаментальных научных исследований по теме: «Региональные особенности пространственно-временной дифференциации почв юга Тюменской области» (Регистрационный номер НИОКТР 122011900105-8).*

9. Дорожко А.Л. Природный радон: проблемы и решения // *Разведка и охрана недр*. – 2010. – № 8. – С. 50–56.
10. Микляев П.С. Научные основы оценки потенциальной радоноопасности платформенных территорий: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2015. – 307 с.
11. Friedmann H. Radon in earthquake prediction research // *Radiation Protection Dosimetry*. – 2011. – V. 149 (2). – P. 177–184.
12. Long range correlation in earthquake precursory signals / H. Chaudhuri, C. Barman, A.N.S. Iyengar, D. Ghose, P. Sen, B. Sinha // *The European Physical Journal Special Topics*. – 2013. – V. 222. – P. 827–838.
13. Riggio A., Santulin M. Earthquake forecasting: a review of radon as seismic precursor // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. – 2015. – V. 56 (2). – P. 95–114.
14. Novel determination of radon-222 velocity in deep subsurface rocks and the feasibility to using radon as an earthquake precursor / H. Zafrir, U. Malik, C. Chemo, Y. Ben Horin, Z. Zalevsky // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2016. – V. 121 (9). – P. 6346–6364.
15. Радон: от фундаментальных исследований к практике регулирования / С.М. Киселев, М.В. Жуковский, И.П. Стамат, И.В. Ярошенко. – М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. – 432 с.
16. Preliminary study on the variation of radon-222 inside greenhouse of Shouguang county, China / X. Li, X. Xu, W. Li, F. Wang, C. Hai // *Journal of environmental radioactivity*. – 2016. – V. 153. – P. 120–125.
17. Hiraó S., Yamazawa H., Moriizumi J. Estimation of the global 222Rn flux density from the Earth's surface // *Japanese Journal of Health Physics*. – 2010. – V. 45 (2). – P. 161–171.

18. Radon-222: environmental behavior and impact to (human and non-human) biota / M. Čujić, L. Janković Mandić, J. Petrović, R. Dragović, M. Đorđević, M. Đokić, S. Dragović // International journal of biometeorology. – 2020. – V. 65. – P. 69–83.
19. Radon variability in borehole from multi-parametric geophysical observatory of NW Himalaya in relation to meteorological parameters / L. Kamra, V.M. Choubey, N. Kumar, G. Rawat, D.D. Khandelwal // Applied Radiation and Isotopes. – 2013. – V. 72. – P. 137–144.
20. Podstawczyńska A., Pawlak W. Soil heat flux and air temperature as factors of radon (Rn-222) concentration in the near-ground air layer // Nukleonika. – 2016. – V. 61 (3). – P. 231–237.
21. Немтинов А.В. Методика измерения плотности потока радона с поверхности земли и строительных конструкций. – М.: НТИЦ «НИТОН», 1993. – 6 с.
22. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв на платформенных территориях (на примере г. Москвы) / П.С. Микляев, Т.Б. Петрова, Ю.А. Баннов, Н.Г. Анисимова // Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. – М.: ООО «Издательство Геос», 2008. – С. 235–240.
23. Гулябянц Л.А., Калайдо А.В. Противорадоновая защита жилых и общественных зданий / под ред. И.Л. Шубина. – М.: Берлин: Директ-Медиа, 2020. – 232 с.
24. Multiple seasonality in soil radon time series / M. Siino, S. Scudero, V. Cannelli, A. Piersanti, A. D'Alessandro // Scientific Reports. – 2019. – V. 9:8610. – P. 1–13.
25. Лешуков Т.В. Радоновая опасность территорий добычи угля подземным способом (на примере Кузнецкого угольного бассейна): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Грозный, 2021. – 105 с.
26. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист О-42 – Тобольск. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. – 300 с.
27. Лебедев С.В. Радиоактивность осадочных пород и экологическая обстановка на территории Саблинского памятника природы // Вестник СПбГУ. Сер. 7. – 2012. – Вып. 2. – С. 22–32.
28. Alimova G.S., Tokareva A.Yu. The radon-222 field parameters in the floodplain and above-floodplain terrace soils of the Irtysh and Tobol Rivers // Ambient Science. – 2021. – V. 08 (1). – P. 20–23.
29. Сорбционные материалы на основе бентонитовой глины месторождения «Острожанское» для обеспечения безопасного обращения с радиоактивными отходами / Л.Н. Москальчук, А.А. Баклай, Т.Г. Леонтьева, Д.К. Стреленко // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2015. – № 3. – С. 70–77.
30. Comparative analysis of the measuring results of the radon flux density and Ra-226 specific activity for different soils types / K. Stavitskaya, N. Ryzhakova, A. Udalov, P. Almyakov // AIP Conference Proceedings. – 2019. – V. 2101. – P. 020013.

Поступила 05.09.2022 г.

Прошла рецензирование 26.09.2022 г.

#### Информация об авторах

**Алимова Г.С.**, кандидат технических наук, заведующий химико-экологической лабораторией Отдела экологических исследований Тобольской комплексной научной станции Уральского отделения Российской академии наук.

**Токарева А.Ю.**, научный сотрудник химико-экологической лаборатории Отдела экологических исследований Тобольской комплексной научной станции Уральского отделения Российской академии наук.

**Уткина И.А.**, старший лаборант химико-экологической лаборатории Отдела экологических исследований Тобольской комплексной научной станции Уральского отделения Российской академии наук.

**Самкова М.В.**, старший лаборант химико-экологической лаборатории Отдела экологических исследований Тобольской комплексной научной станции Уральского отделения Российской академии наук.



UDC 574.5(571.1):546.296

## RADON-222 DISTRIBUTION IN THE SOILS OF THE FLOODPLAIN AND FLUVIAL TERRACES ABOVE FLOODPLAIN OF THE IRTYSH AND TOBOL RIVERS

**Gulsem S. Alimova**<sup>1</sup>,  
gulsem76@mail.ru

**Alena Yu. Tokareva**<sup>1</sup>,  
aytokareva@list.ru

**Irina A. Utkina**<sup>1</sup>,  
utkina.67@bk.ru

**Maria V. Samkova**<sup>1</sup>,  
maria-samkova08081602@mail.ru

<sup>1</sup> Tobolsk complex scientific station of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 15, Academician Yuri Osipov street, Tobolsk, 626152, Russia.

**The relevance** of the obtained data on distribution in the soils of the natural radionuclide – radon-222, which contributes to the key radiation load for lung cancer development, are relevant as regional indicators for the Tyumen region in assessing the potential radon danger of soils.

**The main aim** of the research is to consider interrelation of physical parameters of soil (temperature, depth) and atmospheric air (temperature, humidity, pressure) with radon-222 flux density in soil, to define potentially radon dangerous sections of soils in floodplains and above floodplain terraces of the Irtysh and Tobol rivers.

**Objects:** radon-222 flux density in soils of floodplains and above floodplain terraces of the Irtysh and Tobol rivers within Tobolsk, Vagaysk and partially Yarkovo districts of the Tyumen region of the Russian Federation.

**Methods.** Radon-222 density in soil was measured by passive sorption of radon-222 on activated carbon with further measurement of activity of sorbed radon-222 in laboratory conditions by means of complex «Camera-01». Radon-222 activity in coal was measured by  $\beta$ -radiation of short-lived decay products of radon – lead-214 and bismuth-214 which are in radioactive equilibrium with radon-222 sorbed in coal.

**Results.** The paper introduces the data (2018–2021) on radon-222 flux density distribution in soils of floodplains and fluvial terraces above floodplain of the Irtysh and Tobol rivers within the boundaries of Tobolsk, Vagaysk and partially Yarkovsky districts of the Tyumen Region of the Russian Federation. Radon-222 flux density from the soil surface does not exceed 80 mBq/(m<sup>2</sup>·s) in 73 out of 76 investigated plots of soils, located in the floodplain and fluvial terraces above floodplain of the Irtysh and Tobol rivers which corresponds to the first radon hazard class according to Basic Sanitary Rules for Radiation Safety (BSRERS 99/2010), approved in the Russian Federation. The surface of the soils of these sites is not potentially dangerous. Radon-222 flux density at soil depth of 0,4–1,0 m averages 109,3...495 mBq/(m<sup>2</sup>·s), maximum values vary within the limits of 1085...1280 mBq/(m<sup>2</sup>·s). The reliable influence of soil depth on distribution of radon-222 flux density was detected – radon-222 concentration decreases from the depth to the soil surface. Radon-222 flux density does not depend on insignificant variations in atmospheric pressure, no statistically significant relations with temperature and atmospheric air humidity were established. The average values of radon-222 flux density in soil in summer (August) and autumn (September) months increased nearly twice as much as in spring (May).

### Key words:

Irtysh, Tobol, soil, floodplain, fluvial terrace above floodplain, radon-222 flux density.

The research was carried out within the fundamental scientific research on the subject: «Regional features of space-time differentiation of soils in the south of Tyumen region» (Registration number R&D 122011900105-8).

### REFERENCES

1. Elío J., Cinelli, G., Bossew P., Gutiérrez-Villanueva J.L., Tollefsen T., De Cort M., Nogarotto A., and Braga R. The first version of the Pan-European indoor radon map. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, vol. 19, pp. 2451–2464.
2. *World Health Organization: WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. Eds. H. Zeeb, F. Shannoun. France, World Health Organization, 2009. Available at: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44149/9789241547673\\_eng.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44149/9789241547673_eng.pdf?sequence=1) (accessed 6 July 2022).
3. Perrier F., Girault, F. Harmonic response of soil radon-222 flux and concentration induced by barometric oscillations. *Geophysical Journal International*, 2013, vol. 195, pp. 945–971.
4. Gaskin J., Coyle D., Whyte J., Krewski D. Global estimate of lung cancer mortality attributable to residential radon. *Environmental Health Perspectives*, 2018, vol. 126, pp. 1–8.
5. Yarmoshenko I.V., Malinovskiy G.P., Vasilyev A.V. A meta-analysis of oncoepidemiological data on possible link between radon exposure and lung cancer. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*, 2019, vol. 2, pp. 92–96. In Rus.
6. *Ediny gosudarstvennyy reestr pochvennykh resursov Rossii* [Unified State Register of Soil Resources of Russia]. 2014. Available at: <http://egrpr.esoil.ru/content/3reg.html> (accessed 10 January 2022).
7. Karetin L.N. *Pochvy Tyumenskoy oblasti* [Soils of the Tyumen region]. Ed. by S.S. Trofimov. Novosibirsk, Nauka, Siberian branch Publ., 1990. 283 p.
8. Konstantinova E.Yu. Soils of the area of the conjugation of the high terraces of the Irtysh River with the edge of the Tobolsk mainland upland. *Tomsk State University Journal of Biology*, 2016, vol. 2 (34), pp. 6–18. In Rus.
9. Dorozhko A. L. Prirodny radon: problemy i resheniya [The natural radon: problems and solutions]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2010, no. 8, pp. 50–56.
10. Miklyaev P.S. *Nauchnye osnovy otsenki potentsialnoy radonopasnosti platformennykh territoriy*. Diss. Dokt. nauk [Scientific basis for assessing the potential radon hazard of platform territories. Dr. Diss.]. Moscow, 2015. 307 p.

11. Friedmann H. Radon in earthquake prediction research. *Radiation Protection Dosimetry*, 2011, vol. 149 (2), pp. 177–184.
12. Chaudhuri H., Barman C., Iyengar A.N.S., Ghose D., Sen P., Sinha B. Long range correlation in earthquake precursory signals. *The European Physical Journal Special Topics*, 2013, vol. 222, pp. 827–838.
13. Riggio A., Santulin M. Earthquake forecasting: a review of radon as seismic precursor. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 2015, vol. 56 (2), pp. 95–114.
14. Zafir H., Malik U., Chemo C., Ben Horin Y., Zalevsky Z. Novel determination of radon-222 velocity in deep subsurface rocks and the feasibility to using radon as an earthquake precursor. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, vol. 121 (9), pp. 6346–6364.
15. Kiselev S.M., Zhukovsky M.V., Stamat I.P., Yarmoshenko I.V. *Radon: ot fundamentalnykh issledovaniy k praktike regulirovaniya* [Radon: from fundamental research to regulation practice]. Moscow, FGBU SRC Burnasyan FMBC, FMBA of Russia Publ. house, 2016. 432 p.
16. Li X., Xu X., Li W., Wang F., Hai C. Preliminary study on the variation of radon-222 inside greenhouse of Shouguang county, China. *Journal of environmental radioactivity*, 2016, vol. 153, pp. 120–125.
17. Hirao S., Yamazawa H., Moriizumi J. Estimation of the global  $^{222}\text{Rn}$  flux density from the Earth's surface. *Japanese Journal of Health Physics*, 2010, vol. 45 (2), pp. 161–171.
18. Čujić M., Janković Mandić L., Petrović J., Dragović R., Đorđević M., Đokić M., Dragović S. Radon-222: environmental behavior and impact to (human and non-human) biota. *International journal of biometeorology*, 2020, vol. 65 (1), pp. 69–83.
19. Kamra L., Choubey V.M., Kumar N., Rawat G., Khandelwal D.D. Radon variability in borehole from multi-parametric geophysical observatory of NW Himalaya in relation to meteorological parameters. *Applied Radiation and Isotopes*, 2013, vol. 72, pp. 137–144.
20. Podstawczyńska A., Pawlak W. Soil heat flux and air temperature as factors of radon (Rn-222) concentration in the near-ground air layer. *Nukleonika*, 2016, vol. 61 (3), pp. 231–237.
21. Nemtinov A.V. *Metodika izmereniya plotnosti potoka radona s poverkhnosti zemli i stroitelnykh konstruksiy* [Methodology for measuring radon flux density from the ground surface and building structures]. Moscow, STC «NITON» Publ., 1993. 6 p.
22. Miklyaev P.S., Petrova T.B., Bannov Yu.A., Anisimova N.G. *Mekhanizmy formirovaniya potoka radona s poverkhnosti pochv na platformnykh territoriyakh (na primere g. Moskvy)* [Mechanisms of radon flux formation from soil surface in platform areas (by example of Moscow)]. *Sergeevskie chteniya. Mezhdunarodny god planety Zemlya: zadachi geologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii. Materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii* [Sergeyev Readings. International Year of Planet Earth: Tasks of Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology. Proc. of the annual session of the RAS Scientific Council on Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology]. Moscow, Geos Publ. House, 2008. pp. 235–240.
23. Gulabyanc L.A., Kalaydo A.V. *Protivoradonovaya zashchita zhi-lykh i obshchestvennykh zdaniy* [Anti-radon protection of residential and public buildings]. Moscow, Berlin, Direkt-Media Publ., 2020. 232 p.
24. Siino M., Scudero S., Cannelli V., Piersanti A., D'Alessandro A. Multiple seasonality in soil radon time series. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9:8610, pp. 1–13.
25. Leshukov T.V. *Radonovaya opasnost territoriy dobychi uglya podzemnym sposobom (na primere Kuznetskogo ugolnogo bassey-na)*. Diss. Kand. nauk [Radon hazards in areas of underground coal mining (the example of the Kuznetsk coal basin). Cand. Diss.]. Grozny, 2021. 105 p.
26. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (trete pokolenie). Seriya Zapadno-Sibirskaya. List O-42 – Tobolsk. Obyasnitelnaya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). West Siberian series. Sheet O-42 – Tobolsk. Explanatory note]. St-Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI Publ., 2009. 300 p.
27. Lebedev S.V. Radioaktivnost osadochnykh porod i ekologicheskaya obstanovka na territorii Sablinskogo pamyatnika prirody [Radioactivity of sedimentary rocks and the environmental situation on the territory of the Sablinsky Nature Monument]. *Vestnik SPbGU. Ser. 7*, 2012, no. 2, pp. 22–32.
28. Alimova G.S., Tokareva A.Yu. The radon-222 field parameters in the floodplain and above-floodplain terrace soils of the Irtysh and Tobol Rivers. *Ambient Science*, 202, vol. 08 (1), pp. 20–23.
29. Moskalchuk L.N., Baklay A.A., Leonteva T.G., Strelenko D.K. Sorption materials based on bentonite clay from Ostrozhanskoe deposit to ensure the safe management of radioactive waste. *The works of BGTU. Chemistry and technology of inorganic substances*, 2015, vol. 3, pp. 70–77. In Rus.
30. Stavitskaya K., Ryzhakova N., Udalov A., Almyakov P. Comparative analysis of the measuring results of the radon flux density and Ra-226 specific activity for different soils types. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2101, p. 020013.

Received: 5 September 2022.  
Reviewed: 26 September 2022.

#### Information about the authors

**Gulsem S. Alimova**, Cand. Sc., head of the Chemical-Ecological Laboratory, Tobolsk complex scientific station of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Alena Yu. Tokareva**, researcher, Tobolsk complex scientific station of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Irina A. Utkina**, senior laboratory assistant, Tobolsk complex scientific station of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Maria V. Samkova**, senior laboratory assistant, Tobolsk complex scientific station of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.