

дит к снижению величин d_W и d_P относительно максимального значения $d_{\max}$, примерно равного 1,41 а. е. м., и отрицательному значению δd .

Заключение. Предложенные p - и d -параметры, характеризующие состав изотопной смеси, косвенным образом определяют ценность изотопной смеси или изотопно-модифицированного материала. Результаты исследований могут быть использованы для дальнейшего изучения закономерностей изменения состава изотопной смеси в разделительном каскаде.

Статья написана по итогам конференции, проведенной при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-22056).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмелев А.Н., Смирнов А.Ю., Бонарев А.К. и др. Изотопомодифицированный молибден для безопасной ядерной энергетики. — Теорет. основы хим. технологии, 2016, т. 50, № 6, с. 663—672. // Shmelev A.N., Smirnov A.Yu., Bonarev A.K. et al. Isotopically modified molybdenum for safe nuclear power. — TFCE, 2016, v. 50, № 6, p. 1049—1057.
2. Borisevich V.D., Ignatenko V.G., Sulaberidze G.A., Chuzhinov V.A. Application of stable isotopes in Russian Federation. — J. Radioanal. Nucl. Chem., 1996, v. 205, № 2, p. 181—184.
3. Abrosimov N.V., Arefev D.G., Becker P. et al. A new generation of 99.999% enriched ^{28}Si single crystals for the determination of avogadro's constant. — Metrologia, 2017, v. 54, p. 599—609.
4. Cohen K. Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of ^{235}U . NY: McGraw-Hill, 1951. 165 p.
5. Палкин В.А. Потенциал и разделительная способность в процессах разделения бинарных смесей изотопов. — Атомная энергия, 1998, т. 84, вып. 3, с. 253—259. // Palkin V.A. Potential and Separation Capacity in the Separation of Binary Mixtures of Isotopes. — Atomic Energy, 1998, v. 84, № 3, p. 196—201.
6. Палкин В.А. Потенциалы разделения многокомпонентной смеси изотопов. — Там же, 2013, т. 115, вып. 4, с. 230—235. // Palkin V.A. Separation Potentials for Multicomponent Isotopic Mixtures. — Ibid, 2014, v. 115, № 4, p. 277—283.
7. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Смирнов А.Ю. Разделительный потенциал для многокомпонентных изотопных смесей: состояние проблемы. — ИФЖ, 2017, т. 90, № 2, с. 271—277. // Sulaberidze G.A., Borisevich V.D., Smirnov A.Yu. Separation potential for multicomponent mixtures: state-of-the art of the problem. — JEPTEP, 2017, v. 90, № 2, p. 251—257.
8. Borisevich V.D., Levin E.V. Separation of multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge. — Sep. Sci. Technol., 2001, v. 36, № 9, p. 1697—1735.

Поступила в Редакцию 18.12.20

УДК 551.521.2

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДОНА НА ПОВЕРХНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Рыжакова Н.К., Альмяков П.Э., Ставицкая К.О. (НИ ТПУ, г. Томск), Бухарова О.В.,

Ложников Ф.И. (НИ ТГУ, г. Томск)

e-mail: philiplozhnikov13@mail.ru

Известно, что радон и его дочерние продукты распада являются наиболее значимой причиной естественного облучения населения. Наличие радона высокой концентрации в жилых или производственных помещениях увеличивает риск возникновения онкологических заболеваний [1]. При проведении радиационно-экологических исследований в соответствии с нормативными документами измеряют плотность потока радона на земной поверхности участка застройки.

Территория считается опасной, если 20% и более результатов этих измерений превышает критическое значение, равное 80 мБк/(с·м²). В этом случае при проектировании строительства зданий предусматриваются меры противорадоновой защиты, что делает строительство более дорогим.

В последние годы данный подход к оценке радоноопасности подвергается критике по двум основным причинам. Во-первых, результаты измерения плотности потока радона характеризуются

временной и пространственной вариабельностью. Временная изменчивость плотности потока радона связана с колебаниями метеорологических условий и стохастической природой радиоактивного распада [2, 3]. Пространственная вариабельность радонового поля обусловлена неоднородностью геологической среды: различным типом приповерхностных почвенных слоев, неоднородностью распределения почвенных макропор и трещин, режима увлажнения грунта [4]. Во-вторых, измерения плотности потока радона проводят на земной поверхности. Однако количество радона, выделяющегося из рыхлого поверхностного слоя и залегающих в основании фундамента зданий плотных пород, заметно отличается [5].

В работах, посвященных проблеме радоноопасности территорий, отмечается, что одним из ее основных определяющих факторов является геология подстилающих пород [4, 6, 7]. В большинстве работ приводятся данные о концентрации радона в почвенном воздухе на глубине 0,5—1 м [8, 9]. С точки зрения радоноопасности территории более информативны данные о скорости выхода радона с поверхности пород. Известно, что основным источником радона, поступающего в помещения зданий, являются плотные коренные породы, залегающие в основании фундамента зданий на глубине от одного до нескольких метров. Отметим, что информации о количестве радона, эманлирующего с поверхности плотных пород, крайне мало. Целью работы являлось измерение плотности потока радона на поверхности наиболее распространенных в природе осадочных горных пород.

Проведение экспериментов. Измерения скорости выхода радона на поверхность разных пород проведены на площадках Томска в период с 2014 по 2020 г. и на территории Горного Алтая в 2018 г. (город Горно-Алтайск, села Майма и Кызыл-Озек). Территориально город Томск расположен на юго-востоке Западно-Сибирской равнины, сложенной типичными осадочными горными породами, распространенность кото-

рых в континентальной земной коре составляет около 23,6%. В черте Томска были выбраны площадки для исследования с разными типами отложений в верхней части геологического разреза: суглинками, глиной, глинистым сланцем и песчано-гравийным составом. Площадки Горного Алтая представлены каледонским складчатым сооружением, сложенным пестрым набором магматических, метаморфических и осадочных пород. Измерения проводили двумя аттестованными методами: накопительной камеры и угольных адсорберов. При реализации метода накопительной камеры использовали измерительный комплекс «Альфарад Плюс» (компания «НТМ-защита», г. Москва), для метода угольных адсорберов применяли измерительный комплекс «Камера-01» (ООО «Научно-технический центр "Нитон"», г. Москва). Неопределенность измерений не превышала $\pm 30\%$. Экспозиция для метода накопительной камеры и метода угольных адсорберов составляли 15 мин и 1,5 ч соответственно. При измерении методом угольных адсорберов использовали методику открытого объема камеры. На каждой площадке проведено до 30 измерений плотности потока радона. Всего за период проведения исследований было получено 550 результатов.

Результаты измерения. После исключения промахов по критерию Романовского была проведена проверка плотности потока радона на соответствие нормальному распределению с помощью критерия Пирсона. Проверка показала соответствие распределения измеренной плотности потока радона нормальному / логарифмически нормальному закону, что согласуется с результатами, полученными другими авторами. Следовательно, для оценки средних отклонений, стандартного отклонения и коэффициента вариации полученных выборок можно воспользоваться известными формулами. Для логарифмически нормального распределения расчет средних и стандартных отклонений соответственно проведен по формулам

$$\bar{x} = \exp \overline{\ln(x)} \exp(\sigma_{\ln x}^2/2);$$

$$\sigma_{\ln x}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[\ln(x)_i - \overline{\ln(x)}]^2}{n-1};$$

$$\sigma_x = \sqrt{\exp \overline{\ln(x)}^2 \exp(\sigma_{\ln x}^2) [\exp(\sigma_{\ln x}^2) - 1]},$$

где $\sigma_{\ln x}^2$ — дисперсия логарифма плотности потока радона для каждой площадки; σ_x — среднеквадратичное отклонение плотности потока радона на площадке; n — число измерений.

На рисунке в качестве примера приведены результаты измерений плотности потока радона двумя методами.

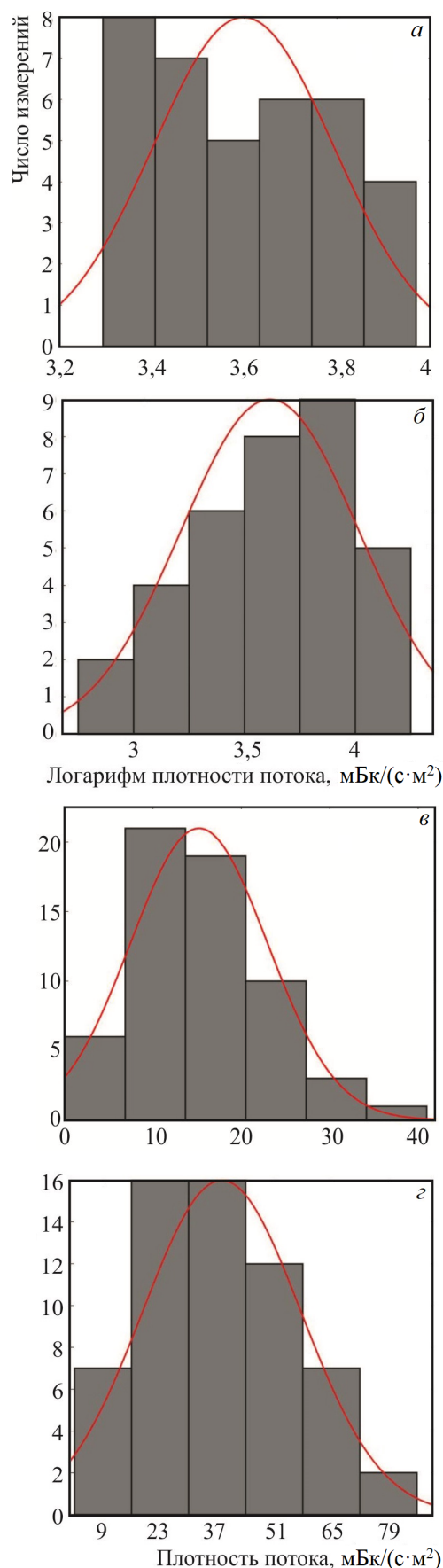
Результаты, полученные на разных площадках Томска, показывают, что для рыхлых осадочных пород средняя плотность потока радона не превышает 60 мБк/(с·м²) при коэффициенте вариации не более 70%, наибольшая средняя плотность потока радона 56 и 53 мБк/(с·м²) кварц-силикатных пород — белой глины и супеси песчанистой соответственно (табл. 1). Небольшая плотность потока радона характерна чаще всего для суглинков и супесей толщиной не менее нескольких метров, что превышает толщину слоя, из которого радон выходит на поверхность.

При проведении исследований в Горном Алтае в 2018 г. получено 74 результата измерений плотности потока радона на поверхности двух типов грунта:

дисперсного, представленного песчано-гравийно-галечными осадочными породами террас 1—3 реки Маймы и плотными глинистыми осадочными породами;

скального магматического типа, сложенного андезитом-базальтовым порфиритом, метаморфического типа, представленного кварцитом, и осадочного типа (известняк).

Измерения показывают, что породы Горного Алтая характеризуются повышенной плотностью потока радона, что согласуется с данными других известных источников (табл. 2). Сравнительно небольшую плотность потока радона имеют песчано-гравийно-галечные отложения, которым присуща высокая газопроницаемость. Эти типы



Плотность потока радона, измеренная методом накопительной камеры в 2014 (а), 2016 (б) и 2017 г. (в) и методом угольных адсорбентов в 2016 г. (г)

Таблица 1. Плотность потока радона на разных площадках Томска, мБк/(с·м²)

Номер площадки	Вид грунта	Плотность потока радона		Коэффициент вариации, %
		Диапазон	Среднее значение	
1	Суглинок	27—53	37	19
2		2—96	39	68
3	Почвенный суглинок	2—41	15	49
4	Лессовидный суглинок	20—71	46	37
5	Глинистые сланцы	22—59	34	31
6	Белые глины	20—133	56	57
7	Суглинок легкий песчанистый	15—87	49	38
8	Суглинок легкий пылеватый	5—64	31	66
9	Супесь песчанистая	7—90	53	38
10	Суглинок тяжелый пылеватый	1—20	9	66
11		11—73	40	37
12	Суглинок легкий пылеватый	0,7—42	20	58
13	Грунт крупнообломочный, галечниковый	0,7—35,7	20	50
14	Суглинок легкий пылеватый	16,5—36	25	23
15	Суглинок тяжелый пылеватый	13—62	31	44
16	Грунт крупнообломочный, гравийный	6—38	22	45
17	Суглинок легкий пылеватый	5—22	16	33

Таблица 2. Плотность потока радона на разных площадках Горного Алтая, мБк/(с·м²)

Номер площадки	Порода	Плотность потока радона		Коэффициент вариации, %	
		Диапазон	Среднее значение		
		Дисперсный грунт			
1	Песчано-гравийно-галечные осадочные: терраса 3	64—140	110	20	
2		терраса 2	114—320	220	24
3		терраса 1	130—200	170	12
		Скальный грунт			
4	Глинистый известняк	220—370	292	22	
5	Известняк	310—690	500	24	
6	Андезитобазальтовый порфирит	500—1100	760	20	
7	Кварцит	540—1300	810	24	

осадочных пород характеризуются сложным минералогическим и гранулометрическим составом, поэтому средняя плотность потока радона для трех террас заметно отличается. Наибольшая плотность потока радона у кварцита (метаморфическая горная порода) и порфирита (магматическая горная порода).

Сравнительно высокая плотность потока радона для дисперсного грунта, представленного осадочными породами, скорее всего, объясняется геологическим строением территории. Горный Алтай имеет складчато-глыбовое строение, что обуславливает широкое развитие разломов. Они являются результатом разрывных деформаций,

нарушающих сплошность пород. В связи с глыбовыми движениями разрывные структуры становятся зонами повышенной проницаемости для магматических расплавов и мантийных флюидов, в том числе и радона. Таким образом, более высокую плотность потока радона на исследовательских площадках с рыхлыми осадочными породами в Горном Алтае можно объяснить повышенной проницаемостью пород, перекрывающих разломные зоны, через которые выделяется радон.

Глинистые и скальные известняки характеризуются повышенной трещиноватостью, поэтому плотность потока радона на поверхности этих пород достаточно высокая. Наибольшая плотность потока радона из магматических (андезитобазальтовый порфирит) и метаморфических (кварцит) горных пород, скорее всего, обусловлена их низкой влагоемкостью, в частности, высокой гидрофобностью. Наличие даже тонкой водной пленки на поверхности зерен породы препятствует выделению радона в открытые поры, так как пробег ионов радона-222, образующихся при радиоактивном распаде, крайне мал.

Заключение. Основным источником поступающего в здания радона являются подстилающие горные породы. Информация о количестве радона, эманлирующего с поверхности наиболее распространенных в природе коренных пород, дает возможность оценивать радоноопасность территорий без проведения измерений. Это позволяет существенно снизить затраты на локальную оценку радоноопасности на участках застройки [10]. Данными о породах, залегающих в основании фундамента зданий, располагают проектно-строительные организации. Например, для суглинистых грунтов Томска измерения следует проводить только на нескольких участках, приуроченных к зонам разломов коренных, подстилающих осадочные толщ пород.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

средняя плотность потока радона для пространственных в природе дисперсных осадочных

пород, таких как суглинки, супеси, глина, обломочные породы, не превышает $200 \text{ мБк}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, на поверхности плотных скальных пород достигает $800 \text{ мБк}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$;

высокая плотность потока радона из плотных скальных пород разного происхождения может быть обусловлена для метаморфических и магматических пород их высокой гидрофобностью, для глинистых и скальных известняков — повышенной трещиноватостью;

зависимость выхода радона от типа и свойств пород, залегающих в основании фундамента зданий, можно использовать при оценке радоноопасности участков застройки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Alonso H., Rubiano J.** Assessment of radon risk areas in the Eastern Canary Islands using soil radon gas concentration and gas permeability of soils. — *Sci. Total Environ.*, 2019, v. 664, p. 449—460.
2. **Микляев П.С., Макаров В.И., Дорошко А.Л. и др.** Радоновое поле Москвы. — *Геоэкология. Инженерная геоэкология. Гидрогеология. Геоэкология*, 2013, № 2, с. 172—187.
3. **Neznal M., Neznal M.** The new method for assessing the radon risk of building sites. — *Czech Geol. Survey*, 2004, v. 16, p. 7—47.
4. **Ciotoli G., Voltaggio M., Tuccimeie P. e. a.** Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region: a methodological proposal for the European Atlas of Natural Radiation. — *J. Environ. Radioact.*, 2017, v. 166(2), p. 355—375.
5. **Рыжакова Н.К., Ставицкая К.О., Удалов А.А.** Проблемы оценки потенциальной радоноопасности участков застройки. — *Радиационная гигиена*, 2018, т. 11, № 2, с. 37—44.
6. **Pasztor L., Szabo K., Szatmari G. e. a.** Mapping geogenic radon potential by regression kriging. — *Sci. Total Environ.*, 2016, v. 544, p. 883—891.
7. **Szabo K., Jordan G., Horvath A., Szabo C.** Mapping the geogenic radon potential: methodology and spatial analysis for central Hungary. — *J. Environ. Radioact.*, 2014, v. 129, p. 107—120.
8. **Miklyaev P.S., Petrova T.B., Shchitov D.V. e. a.** The results of long-term simultaneous measurements of radon exhalation rate, radon concentrations in soil gas and groundwater

- in the fault zone. — Appl. Radiat. Isot., 2021, v. 167, p. 109460—109474.
9. Mazur D., Janik M., Łoskiewicz J. e. a. Measurements of radon concentration in soil gas by CR-39 detectors. — Radiat. Meas., 1999, v. 31, p. 295—300.
10. Рыжакова Н.К., Ставицкая К.О., Удалов А.А. Новый подход к проблеме оценки радоноопасности участков застройки. — Радиационная гигиена, 2020, т. 13, № 2, с. 57—64.

Поступила в Редакцию 18.12.20

УДК 681.742.535.361:502.55:528.8:550.378:551.510.721

ОЦЕНКА РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПОВЫШЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ ПОЧВЫ

Колотков Г.А. (ИОА СО РАН, г. Томск), Матина П.Н. (НИ ТГУ, г. Томск),

Мышкин В.Ф. (НИ ТПУ, г. Томск)

e-mail: kolotkov@iao.ru

Аварии на объектах ядерной энергетики приводят к формированию на поверхности земли источника ионизирующего излучения, воздействующего на приземный слой атмосферы. Возникающая при этом ионизация среды может быть зафиксирована различными средствами: как контактными, так и дистанционными. С помощью контактных методов не всегда возможно провести исследование в труднодоступных местах, и эти методы являются ресурсозатратными [1, 2]. Целью работы была оценка возможности дистанционного метода контроля по косвенным признакам радиоактивного загрязнения почвенного слоя. Радиоактивность вне зависимости от природы ее возникновения в почве инициирует ряд физико-химических реакций с появлением так называемых маркеров, например, атомарного водорода. Метод связан с регистрацией микроволнового излучения в диапазоне 1,4—1,7 ГГц в приповерхностном слое воздуха [3]. Этот поток излучения генерируется атомарным водородом, который возникает в результате фотохимических реакций [4], инициируемых излучением радионуклидов верхнего слоя почвы.

Экспериментальное исследование содержания радионуклидов в почве. На первом этапе исследований определяли мощность

излучения приповерхностного слоя земли в микроволновом диапазоне 1,4—1,7 ГГц. Для этого были проведены экспериментальные исследования наличия и уровня содержания естественных радионуклидов в почве юго-восточной части Томской области. С помощью портативного гамма-спектрометра GS-512 измерено содержание калия, урана и тория. Пробы были отобраны на территории преобладания дерново-подзолистой и серой лесной почвы. Результаты полевых измерений, проведенных в летне-осенний период 2020 г., приведены в табл. 1.

Анализ экспериментальных данных показал, что наблюдается превышение содержания урана в почве по сравнению со средним по Сибири, которое составляет 1,75 г/т [5, 6]. Содержание урана в почве выше регионального фона в 2 раза и более обнаружено в пробах почвы из поселков Кузовлево (3,3 г/т) и Надежда (3,9 г/т), а также на территории Туганского горно-обогадательного комбината (ТГОК) «Ильменит» (3,9 г/т), повышенное содержание тория — в пробах почвы из поселка Светлого и Александровского участка ТГОК «Ильменит» (8,6 г/т), деревни Кусково и села Зоркальцево (7 г/т). На территории исследования зафиксирована массовая доля калия от 0,4 до 1,3%, что на порядок ниже средней по региону.