

УДК 550.4.02

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДОНА НА ТЕРРИТОРИЯХ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ УГЛЯ**Лешуков Т.В., Легощин К.В., Ларионов А.В.***ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», Кемерово, e-mail: tvleshukov@mail.ru*

В статье публикуются данные полевых исследований плотности потока радона (ППР) из почвы на территории подработанного участка города Ленинск-Кузнецкого. Город Ленинск-Кузнецкий является одним из центров добычи угля в Кузбассе. В работе оцениваются показатели ППР из грунта над угольными шахтами. Используется метод пассивной адсорбции радона в угольных ловушках СК-13 и НК-32 от прибора «Камера-01». В результате исследования получены данные среднего уровня ППР по результатам 178 измерений. Среднее значение ППР равно $210,24 \pm 19,12$ мБк/м²*с. Приведены пространственные и количественные характеристики аномалий ППР, которые по интенсивности отличаются от аномалий, сформированных на естественных ландшафтах. Были обнаружены точечные аномалии и площадные аномалии высокой ППР из грунта. Делаются выводы о значимом влиянии шахт на радиационную безопасность грунтов района исследований. Отмечается, что в пределах подрабатываемых пространств были обнаружены участки с безопасным уровнем ППР, что предположительно соответствует цельным массивам горных пород либо глинистым грунтам. Территория без подземных выработок в г. Ленинск-Кузнецком является безопасной в отношении уровня радона. 34,83% точек измерений ППР относятся к 3-му классу опасности, что требует применения повышенных мер радиационной безопасности в строениях. Результаты работы дают основание для дальнейшего изучения влияния подземных горных работ на уровень ППР над ними или в непосредственной близости к ним. В качестве рекомендаций с целью снижения эмиссии радона на поверхность предложено использование глинистого грунта в качестве изоляционного материала.

Ключевые слова: Кемеровская область, Кузнецкий угольный бассейн, плотность потока радона, подработанные пространства, радон, радиационная безопасность

GEOGRAPHIC VARIATION IN RADON FLUX DENSITY IN TERRITORY UNDERGROUND MINES**Leshukov T.V., Legoshchin K.V., Larionov A.V.***Kemerovo State University, Kemerovo, e-mail: tvleshukov@mail.ru*

In this article we publish data from field studies of radon flux density (RFD) from soil in the territory of underground mining of the city of Leninsk-Kuznetsk. Leninsk-Kuznetsk is one of the centers of coal mining in Kuzbass. The paper estimates of RFD from the soil in the territory of underground mines. The work uses passive adsorption of radon in charcoal sorption columns SK-13 and NK-32 from the Camera-01 device. As a result of the study, data were obtained on the average level of exhalation of radon according to 178 measurements. Average value of RFD is 195.64 ± 12.4 mBq / m² * s. The maximum RFD is 1790 mBq / m² * s. The minimum RFD is 10 mBq / m² * s. The spatial and quantitative characteristics of the anomalies of the RFD are given, which differ in intensity from the anomalies formed in natural landscapes. Point anomalies and areal anomalies of increased RFD the ground were detected. Point anomalies and areal anomalies of high RFD from the soil were detected. Conclusions are drawn about the significant effect of mines on the radiation safety of soils in the research area. It is noted that within the undermined mines, areas with a safe level of RFD were found, which presumably corresponds to solid rock masses, or clay soils. The territory without underground mines in the city of Leninsk-Kuznetsk is safe in relation to the level of radon. 34.83% of RFD measurement points belong to the third hazard class, which requires increased radiation safety measures in dwellings. This work is also providing a basis for further study of the effect of underground mining on the level of the radon exhalation of nearby territories. The use of clay soil as an insulating material is proposed as a recommendation to reduce radon emanation to the surface.

Keywords: Kemerovo region, Kuznetsk coal basin, radon flux density, underground mines, radon, radiation safety

В результате исследований больших групп людей было доказано наличие взаимосвязи между резидентным облучением радоном и дополнительным риском развития рака легкого [1].

Плотность потока радона (ППР) зависит от многих факторов, которые были описаны в ранее проведенных исследованиях. Главным фактором, определяющим выход этого газа из грунта, служит концентрация химических элементов (U, Th, Ra) в нем, при распаде которых и образуется радон [2–4]. На участках с низкими концентрациями радона в почве и подстила-

ющих горных породах высокая плотность потока радона из грунта, как правило, фиксируется в дизъюнктивных нарушениях и сопутствующих им зонам тектонической нарушенности [5, 6]. Тектонические нарушения имеют разные показатели транспортирующей способности, которые чаще всего связаны с активностью нарушения и его генетическим типом [5–7].

Подземная добыча может приводить к образованию значительного количества нарушений горных пород, которые становятся транспортирующими каналами для радона. Их пространственная ориентиров-

ка и транспортирующая способность, вероятно, имеют свои особенности, которые необходимо учитывать. Кроме того, интенсивность изменения показателя ППР в пределах нарушений также может отличаться от естественных ландшафтов. В работе [8] отмечалось значительное превышение ППР из грунта на территориях с шахтными выработками, которые необходимо учитывать при планировании поселений с подземной добычей угля. Имеются ранее проведенные исследования на территориях угледобычи в Германии, Великобритании и Польше, которые продемонстрировали значительные концентрации радона в помещениях, расположенных над шахтными выработками [9–11].

Цель исследования: изучение пространственной изменчивости плотности потока радона в местах подработки угольными шахтами (на примере Ленинск-Кузнецкого района Кемеровской области).

Задачи исследования:

1. Измерить ППР из грунтов в районе индивидуальной жилищной застройки, расположенной на территории, подработанной угольными шахтами.

2. Соотнести ППР из грунтов с объемной активностью радона (ОАР) в жилых помещениях, расположенных на данной территории, измеренной ранее.

3. Вынести атрибутивную информацию по ОАР в жилых помещениях и ППР из грунтов на картосхему района исследований.

4. Провести анализ и интерпретацию полученной пространственной модели распределения ППР из грунта на исследуемой территории.

Материалы и методы исследования

Объект исследования находится в г. Ленинск-Кузнецком Кемеровской области. Изучаемый грунт располагается в окрестностях домов, в которых ранее были получены превышения значений ОАР в жилых помещениях. Тектоническое строение участка исследований характеризуется отсутствием крупных дизъюнктивов, что исключает их влияние на плотность потока радона. Комплексы пород однородны и представлены переслаивающимися алевролитами, песчаниками, аргиллитами и углями, которые характеризуются низкими показателями материнских элементов по отношению к радону и его дочерним продуктам (ДПР).

Исследование грунта проводилось в дни без осадков с сентября по октябрь 2019 г., а ОАР измерялась в домах в зимнее время

с ноября 2018 г. по февраль 2019 г. Фиксация ППР производилась с помощью сорбционных колонок СК-13 и накопительных камер НК-32 от прибора «Камера-01». Ловушки устанавливались в заранее подрыхленный грунт на 2–8 часов и обрабатывались в течение 12 часов после окончания измерений.

Построение картосхемы осуществлялось с помощью программы ArcGIS. Космоснимок получен с сайта Яндекс.Карты. Интерполяция данных между точками наблюдений осуществлялась с помощью метода обратно взвешенных расстояний (ОВР). Обработка результатов производилась в программе MS Office Excel с помощью надстройки «Пакет анализа».

Результаты исследования и их обсуждение

Грунт исследуемой территории имеет среднее арифметическое значение – $210,24 \pm 19,12$ мБк/м²*с, что относит данную территорию к 3-му классу опасности по нормам радиационной безопасности (НРБ), для которой необходимо применять усиленные меры по радоновой защите. Данный уровень ППР превышает фоновые значения, полученные для Ленинск-Кузнецкого района: $33,07 \pm 1,78$ мБк/м²*с [8]. Максимальное значение, зафиксированное в ходе исследования на данном участке, составляет 1790 мБк/м²*с, а минимальное – 10 мБк/м²*с. Согласно более ранним работам по радоновой активности нарушений рост показателя ППР главным образом наблюдается в активных дизъюнктивах [12]. В данном случае эту территорию можно отнести к геодинамически активной области, которая сформировалась над шахтными выработками.

Распределение показателей ППР в пределах исследуемой территории представлено в таблице.

Согласно исследованию 34,83% точек наблюдения относятся к 3-му классу опасности по ППР, что требует усиленной защиты от радона. Около 37,64% полученных значений относятся к 1-му классу опасности, для которой требуется лишь установка обычной вентиляционной системы. Ко 2-му классу опасности относятся 27,53% измеренных значений, что требует средней защиты от поступления и выведения радона из жилого строения. В целом данная ситуация нехарактерна для территорий с таким геолого-тектоническим строением, что также подтверждает влияние горных выработок на радоновую опасность ландшафтов.

Распределение плотностей потока радона

ППР, мБк/м ² *с	Количество измерений	Доля из выборки, %
0–100	78	43,82
101–200	38	21,35
201–300	17	9,55
301–400	15	8,43
401–500	12	6,74
501–600	7	3,93
>600	11	6,18

Пространственные характеристики плотности потока радона из грунта представлены на рис. 1.



Рис. 1. Плотность потока радона и показатели объемной активности радона в помещениях на улице Моховская г. Ленинск-Кузнецкий

Большая часть территории имеет показатели выше 200 мБк/м²*с. Непосредственно под всем изученным районом расположены отработанные и ныне разрабатываемые шахтные поля. На картосхеме представлены участки жилых строений, которые были ранее снесены по причине превышения содержания в них газа метана, углекислого и угарного газов, которые попадали в них из старых и ныне действующих шахт. В пределах обследованной территории были обнаружены участки с низкой плотностью потока радона (10–20 мБк/м²*с), которые соответствуют

цельным массивам горных пород или глинистым рыхлым отложениям, использованным для снижения выхода газов на поверхность после сноса жилых строений. Дома, расположенные в непосредственной близости к исследованным грунтам, имеют значительные превышения ОАР – от 384 до 1940 Бк/м³. Также на территории участка формируются воронки проседания, что вероятнее всего и приводит к формированию транспортных каналов для радона, который изначально скапливается в шахтных выработках.

По детализационным линиям, обозначенным на рис. 1, исследования грунтов были получены следующие графики ППР (рис. 2). Согласно приведенным графикам интенсивность изменения показателя ППР крайне высокая, что отличает данные нарушения от естественных, которые не имеют такой значительной амплитуды в отношении интенсивности поступления радона на поверхность [13]. В отдельных случаях на расстоянии 2–3 м параметр изменялся в 120–170 раз. По всем линиям были обнаружены как точечные превышения ППР, так и аномальные области разных размеров, где было сложно определить эпицентр выхода радона. Данные результаты усложняют процесс поиска потенциальных точек и областей выхода радона на поверхность с целью их изоляции от возводимых или уже существующих жилых строений. Формирование значительного количества точек с высоким показателем ППР свидетельствует о значительной дезинтеграции пород.

На рис. 3 предложена модель R. Klingel, J. Kemski, описывающая влияние шахтных выработок на пространственные закономерности радоновой опасности территории. В ней высокие потоки радона фиксируются по краевой части обрабатываемого пространства, что связано с процессами проседания и сжатия центральной части и растяжения периферической. В нашей работе для территории Ленинск-Кузнецкого

района пространственные закономерности расположения аномальных зон ППР имеют иную, более сложную конфигурацию. Вероятно, реальная картина эманаций радона из грунтов на подработанных территориях может описываться более сложной моделью, которая должна учитывать следующие факторы:

1) состав и сложение поверхностных грунтов;

2) структурно-тектонические характеристики обрабатываемых пластов и вмещающих пород;

3) пространственные особенности выработки.

Данные факторы будут изучены и учтены при формировании модели радоновой опасности территорий, подработанных угольными шахтами. Также стоит отметить, что процесс обрушения кровли шахтной выработки, в результате чего образуется дополнительная трещиноватость пород, не одновременный и однообразный процесс, что и приводит к формированию отличий полученных данных от предложенной модели.

Выводы

1. В окрестностях всех жилых строений с высокими показателями ОАР были обнаружены грунты с высокими показателями ППР.

2. Исследуемые грунты на территории изучаемого участка характеризуются высоким показателем ППР, почти 35% измеренных точек относятся к 3-му классу опасности, что требует внимания при строительстве частных жилых домов.

3. Полученные данные ППР подтверждают влияние на них техногенно образованных систем трещин в результате добычи угля закрытым способом.

4. Транспортирующее воздействие зоны нарушений, образованных на месте шахтных выработок, часто выражается в виде локальных, не имеющих ориентировку и определенную форму аномалий повышенных значений ППР из грунта.

5. Радоновая опасность Ленинск-Кузнецкого района главным образом связана с тектоническими нарушениями, а не с петрографическим составом территории, поскольку он представлен горными породами, с низкими кларковыми концентрациями материнских по отношению к радону радиоактивных элементов, что и было нами отражено ранее в работе [8].

6. В качестве рекомендаций по снижению выхода потока радона на поверхность рекомендуется использовать в качестве насыпи глинистый грунт; при мобилизации и проседании грунтов необходимо производить повторное засыпание.

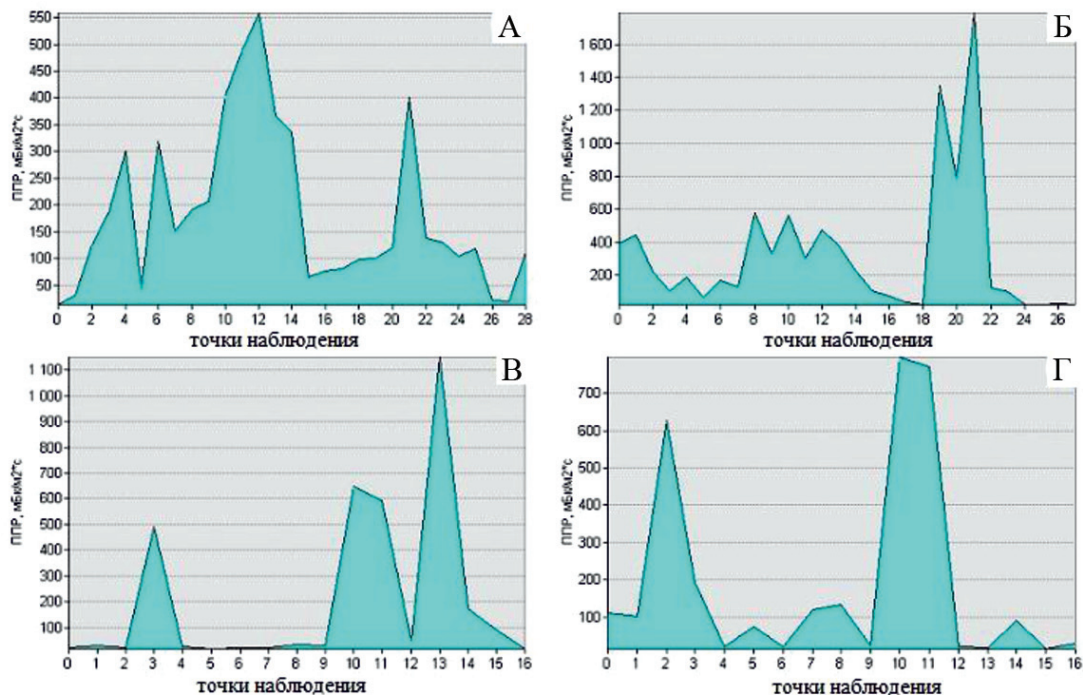


Рис. 2. Изменение показателя ППР по основным линиям детализации

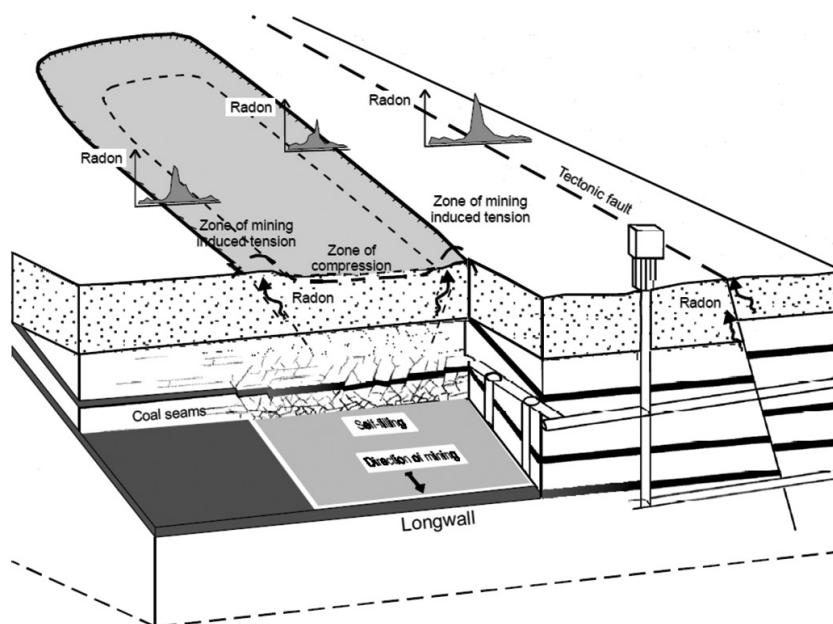


Рис. 3. Пространственные закономерности влияния шахтных выработок на радоновую опасность ландшафтов (по R. Klingel, J. Kemski [11])

7. Точки с максимальными показателями ППР часто не сопровождаются сопутствующей областью повышенных значений, что создает необходимость более детального обследования грунтов в пределах контуров уже построенных или планируемых жилых строений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00390.

Список литературы / References

1. Lubin J.H., Boice J.D. Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies. *J. Natl. Cancer Inst.* 1997. Vol. 89. № 1. P. 49–57.
2. Hongtao Liu, Nanping Wang, Xingming Chu, Ting Li, Ling Zheng, Shouliang Yan, Shijun Li Mapping radon hazard areas using 238U measurements and geological units: a study in a high background radiation city of China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry.* 2016. Vol. 309. P. 1209–1215. DOI: 10.1007/s10967-016-4717-5.
3. Pasculli A., Palermi S., Sarra A., Piacentini T., Miccadey E. A modelling methodology for the analysis of radon potential based on environmental geology and geographically weighted regression. *Environmental Modelling & Software.* 2014. Vol. 54. P. 165–181.
4. Watson R.J., Smethurst M.A., Ganerod G.V., Finne I., Rudjord A.L. The use of mapped geology as a predictor of radon potential in Norway. *Journal of Environmental Radioactivity.* 2017. Vol. 166. P. 341–354. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.05.031.
5. Семинский К.Ж., Бобров А.А. Радоновая активность разнотипных разломов земной коры (на примере Западного Прибайкалья и Южного Приангарья) // *Геология и геофизика.* 2009. Т. 50. № 8. С. 881–896.
6. Seminsky K.Z., Bobrov A.A. Radon activity of faults (Western Baikal and Southern Angara areas). *Russian Geology and Geophysics.* 2009. Vol. 50. № 8. P. 682–692. DOI: 10.1016/j.rgg.2008.12.010.
7. Уткин В.И., Юрков А.К. Радон как индикатор геодинамических процессов // *Геология и геофизика.* 2010. Т. 51. № 2. С. 277–286.

Utkin V.I., Yurkov A.K. Radon as a tracer of tectonic movements. *Russian Geology and Geophysics.* 2010. Vol. 51. № 2. P. 220–227. DOI: 10.1016/j.rgg.2009.12.022.

7. Seminsky K.Z., Bobrov A.A., Demberel S. Variations in radon activity in the crustal fault zone: spatial characteristics // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth.* 2014. Vol. 50. № 6. P. 795–813. DOI: 10.1134/S1069351314060081.

8. Лешуков Т.В., Ларионов А.В., Легошин К.В., Яковлева С.Н. Особенности эманации радона из грунтов на территориях, подработанных угольными шахтами (на примере Ленинск-Кузнецкого района) // *Проблемы региональной экологии.* 2019. № 6. С. 140–143. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-18140.

Leshukov T.V., Larionov A.V., Legoshin K.V., Yakovleva S.N. Features of radon emanation from the soils in the territories processed by coal mines: a case study of the Leninsk-Kuznetsk district // *Problems of Regional Ecology.* 2019. № 6. P. 140–143 (in Russian).

9. Wysocka M. Radon problems in mining and post-mining areas in Upper Silesia region, Poland. *Nukleonika.* 2016. Vol. 61. P. 307–313. DOI: 10.1515/nuka-2016-0051.

10. Ball T.K., Wysocka M. Radon in coalfields in the United Kingdom and Poland. *Archives of Mining Sciences.* 2011. Vol. 56. P. 249–264.

11. Klingel R., Kemski J. Influence of underground mining on the geogenic radon potential. 1999. P. 14.

12. Матвеев А.В., Автушко М.И., Карабанов А.К., Нечипоренко Л.А., Плюснин С.М. Влияние зон разрывных нарушений на концентрацию радона в почвенном воздухе на территории Беларуси // *Геохим. та рудоутв.* 2014. № 34. С. 69–77.

Matveyev A.V., Avtushko M.I., Karabanov A.K., Nepochorenko L.A., Plusnin S.M. Fault zones and their influence on the radon concentration in the soil air in the territory of Belarus // *Geochemistry and Ore Formation.* 2014. № 34. P. 69–77 (in Russian).

13. Астахов Н.Е., Бартанова С.В., Тубанов Ц.А. Радоновые аномалии некоторых зон разломов Бурятии как фактор радиационного риска // *Известия Самарского Научного Центра Российской Академии Наук.* 2015. Т. 17. № 5. С. 21–25.

Astakhov N.E., Bartanova S.V., Tubanov C.A. Radon anomalies of some break zones in Buryatia as the factor of radiation risk // *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Centra Rossijskoj Akademii Nauk.* 2015. Vol. 17. № 5. P. 21–25 (in Russian).