УДК 550.4.02

РАДОНООПАСНОСТЬ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНАХ: ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

¹Лешуков Т.В., ¹Легощин К.В., ¹Ларионов А.В., ²Лесин Ю.В.

¹ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», Кемерово, e-mail: tvleshukov@mail.ru;

²ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», Кемерово, e-mail: lyuv.geo@kuzstu.ru

В статье предложен пример пространственного анализа потенциальных источников радоноопасности геологической среды и жилых строений в программе ArcGIS. В качестве объекта исследований выбран город Ленинск-Кузнецкий Кемеровской области. Данное городское поселение является старопромышленным центром подземной добычи угля, отличается близостью жилой застройки к территории месторождения. Выделены две группы источников потенциальной радоноопасности геологической среды естественного (состав пород, тектонические нарушения) и антропогенного происхождения (нарушения, возникшие или регенерированные в результате ведения подземных горных работ). Установлено, что ключевыми из них, с точки зрения занимаемого пространства городского поселения, являются антропогенно сформированные нарушения в зоне добычи угля. Шахтные поля занимают 47,72% территории г. Ленинска-Кузнецкого, а в пределах этого пространства расположены 48,06% малоэтажных частных жилых строений. Результаты работы подчеркивают необходимость оценки влияния техногенной нарушенности пород на радиологическую безопасность Кузнецкого угольного бассейна. Вторыми по значимости источниками радоноопасности являются тектонические нарушения, которые занимают 7,58% территории городского поселения. В пределах этих естественных дизъюнктивов расположены 13,33% жилых строений. Проведенный с помощью предложенной методики анализ исследуемой территории позволил выявить рост числа ИЖС в пределах потенциально радоноопасных территорий, чем того следовало ожидать при случайном распределении. Предложенный подход к пространственной оценке позволит более достоверно определить вклад наиболее существенных факторов геологической среды в общий канцерогенный риск для населения угледобывающих районов Кузбасса и иных территорий.

Ключевые слова: Кемеровская область, Кузнецкий угольный бассейн, геологическая среда, подработанные пространства, радон, радиационная безопасность, геоинформационные системы

RADON HAZARD OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT IN COAL MINING REGIONS: A SPATIAL STUDY USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

¹Leshukov T.V., ¹Legoshchin K.V., ¹Larionov A.V., ²Lesin Yu.V.

¹Kemerovo State University, Kemerovo, e-mail: tvleshukov@mail.ru;

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, e-mail: lyuv.geo@kuzstu.ru

The article offers an example of spatial analysis of potential sources of radon hazard in the geological environment and residential buildings in the ArcGIS program. The city of Leninsk-Kuznetsk, Kemerovo region was chosen as the object of research. This urban settlement is an old industrial center of underground coal mining, which are distinguished by the proximity of residential development to the field. Two groups of sources of potential radon hazard of the natural geological environment (rock composition, tectonic disturbances) and anthropogenic genesis (disturbances created or regenerated as a result of underground mining) are identified. It has been established that the primary from the point of view of occupied urban space are human-made disturbances in the coal mining zone. Mine fields occupy – 47.72% of the territory of the city of Leninsk-Kuznetsk, and within this space 48.06% of low-rise private residential buildings are located. The results of the work emphasize the need to assess the impact of technogenic disturbance of rocks on the radiological safety of the Kuznetsk coal basin. The second most important sources of radon hazard are tectonic disturbances, which occupy 7.58% of the territory of the urban settlement. Within these natural faults are located – 13.33% of residential buildings. The analysis of the study area carried out using the proposed methodology allowed us to identify an increase in the number of individual housing within potentially radon-hazardous territories, which was to be expected with a random distribution. The proposed approach to spatial assessment will more accurately determine the contribution of the most significant factors of the geological environment to the overall carcinogenic risk for the population of coal mining regions of Kuzbass and other territories.

Keywords Kemerovo region, Kuznetsk coal basin, geological environment, underground mines, radon, radiation safety, geographic information systems

Радон является важным фактором геологической среды, который влияет на частоту неинфекционной заболеваемости населения, в первую очередь онкологической [1]. Отмечается значимость изучения длительного воздействия ра-

дона и связанного с ним канцерогенного риска [2]. Низкодозовое (резидентное) бытовое облучение радоном в настоящее время в исследованиях рассматривается в качестве важного фактора канцерогенеза [3].

Естественным причинам радоновой опасности геологической среды посвящены работы многих отечественных и зарубежных исследователей [4–6]. Хорошо изучены механизмы концентрации и рассеивания радона, его пространственные закономерности распределения и приуроченность к определенным тектоническим структурам. Полученные результаты лежат в основе создания карт радоноопасности территории или геогенного потенциала радона.

Техногенные причины увеличения радоновой опасности геологической среды в основном связывают с областями отработки высокорadioактивных руд, где описаны закономерности изменения radioактивного фона, которые, как правило, затрагивают все компоненты окружающей среды [7–8]. На территориях добычи слаборадиоактивных полезных ископаемых существенного изменения радиологических показателей, как правило, не фиксируется. В целом для таких территорий радиологические параметры определяются главным образом особенностями транспорта радона из недр к поверхности, который преимущественно осуществляется по нарушениям. Это характерно и для угледобывающих территорий. Открытый способ добычи угля считается наиболее геологически неблагоприятным в отношении окружающей среды, поскольку он воздействует на все компоненты окружающей среды, одновременно с этим существенного роста радиационных параметров в них не наблюдается. Подземный способ добычи угля определяет меньшее химическое загрязнение ландшафтов, в то же самое время происходит образование областей повышенной трещиноватости пород, которым сопутствуют проваливание и проседание грунта. К ним приурочены обильные выходы различных газов (метана, угарного газа, углекислого газа, водорода, радона и др.) [9]. Механизмы его поступления на поверхность изучены на территории угольных шахт Китая и Австралии. В исследованиях по миграции радона над шахтной выработкой его обычно используют как косвенный индикатор подземного горения пластов угля [10]. На территории старопромышленных районов Великобритании, Германии и Польши были зафиксированы превышения концентрации радона в почвенном воздухе и подвальных помещениях жилых строений [11; 12]. Наряду с этим в Кузбассе на территориях угледо-

бычи, где применяется подземный способ, были обнаружены высокие и существенно превышающие фоновые уровни показатели плотности потока радона из грунта [13; 14], что позволило в настоящей работе рассматривать данный антропогенный механизм образования транспортных путей для этого газа в качестве существенного фактора радиационной опасности для населения.

Таким образом, геологическая среда представляет собой весьма неоднородный объект в отношении эманаций радона на поверхность. Это обстоятельство может приводить к формированию разных по своему масштабу и интенсивности влияния зон повышенной потенциальной радоновой опасности, которые необходимо выявлять и территориально выделять. Наиболее подходящим средством для пространственной оценки выступают геоинформационные системы.

Предварительная территориальная оценка причин радоноопасности геологической среды производится с целью их ранжирования по степени распространенности на территории и расчета потенциального риска для населения. Данная оценка может быть востребована при принятии решения о назначении земель под индивидуальное жилищное строительство (ИЖС) либо определении мер радонозащиты.

Материалы и методы исследования

Большое количество поселений в Кемеровской области располагается на или в непосредственной близости к местам добычи угля, что может вызывать повышенный риск, связанный с воздействием радона на человека. В настоящее время отсутствуют работы по выявлению радоновой опасности Кузнецкого угольного бассейна, в частности в местах активной добычи угля подземным способом, что определяет необходимость проведения подобного исследования для данной территории. Типовым объектом был выбран Ленинск-Кузнецкий городской округ, который является одним из старейших районов добычи угля, со значительными площадями шахтных полей и присутствием крупных тектонических нарушений, что делает его подходящим для пространственного исследования антропогенных и естественных факторов радоноопасности, с целью последующей экстраполяции закономерностей на аналогичные территории Кузбасса.

В работе использовалась среда ArcGIS, в которой были созданы слои простран-

ственной и атрибутивной информации: жилые строения, геологическая карта района исследований, шахтные поля и т.п. Также применяемая система позволяет оперативно обновлять базу по мере поступления новых данных.

Пространственная оценка потенциальных факторов радоноопасности геологической среды основана на установленных ранее фактах их взаимосвязи. Для каждой территории могут быть выбраны ключевые факторы и оценена их площадная доля (F) в территории региона по формуле:

$$F_i = \frac{Si}{S} * 100\%,$$

где F_i – площадная доля фактора в районе, Si – площадь влияния фактора, S – общая площадь территориального образования.

По своей сути для составления предварительной схемы оценки мы используем ранжирование по площади распространения того или иного фактора геологической среды.

Со стороны *естественных факторов радоноопасности* были предложены:

- состав пород (при составлении мелкомасштабной карты ограничиваются границами свит (для стратифицируемых толщ) или комплексов пород (для плутонических комплексов));

- тектоника (дизъюнктивные нарушения и сопутствующая им зона дробления и трещиноватости). Границами воздействия фактора считалась линия потенциального окончания зоны трещиноватости тектонических нарушений. Их ширина установлена по данным геологических отчетов.

Среди *антропогенных факторов радоноопасности*:

- загрязнение радиоактивными элементами, материнскими по отношению к радону (рассматриваются обычно рассеивание вследствие выемки, взрывов, транспортировки и иных действий, которым сопутствует рассеивание загрязняющих веществ (ЗВ)). В представленной работе данный фактор не рассматривался;

- формирование или регенерация трещиноватости пород в результате ведения горных работ (границы воздействия данного фактора аппроксимированы шахтным полем).

Территориальная оценка радоноопасности жилых строений с учетом потенциальных факторов геологической среды производится с целью уточнения возможных

рисков для уже проживающего населения и производится по формуле:

$$A_f = \frac{N_i}{N} * 100\%,$$

где A_f – доля жилых строений на территории потенциального фактора радоноопасности в районе, N_i – число жилых строений на территории потенциального фактора радоноопасности, N – общее число строений.

Оценка сводится к определению доли жилых строений, расположенных на территории проявления того или иного фактора, ко всем частным жилым строениям. Из изучения целенаправленно были исключены многоэтажные жилые строения, поскольку, по материалам ранее проведенных исследований, они являются безопасными в отношении радона.

Результаты исследования и их обсуждение

Для пространственной оценки потенциальных источников радоноопасности территории Ленинск-Кузнецкого городского округа была построена картосхема (рисунок).

Вследствие существенных различий между распространенностью потенциальных источников естественной и антропогенной радоноопасности геологической среды и размещения ИЖС в Ленинск-Кузнецком районе, возникает необходимость их сравнения (таблица).

Ключевым источником радоноопасности геологической среды, с точки зрения занимаемого пространства городского поселения, являются антропогенно сформированные нарушения в зоне добычи угля. Шахтные поля занимают $\approx 47,72\%$ территории Ленинска-Кузнецкого, а в пределах этого пространства расположены $48,06\%$ малоэтажных частных жилых строений. Взяв во внимание данные ранее проведенных исследований о радоноопасности грунтов и жилых строений, расположенных в зоне подземной выработки, [11; 12] можно утверждать, что данный фактор определяет высокий уровень радиационной нагрузки на население в городе. С учетом слабой радиоактивности горных пород описанных ранее свит и данных, приведенных в исследованиях других авторов [15], вторым источником радоноопасности являются участки тектонической нарушенности, которые занимают $7,58\%$ территории городского поселения. В пределах этих естественных нарушений расположены $13,33\%$ жилых строений.

Расположение основных потенциальных источников радоноопасности и частных малоэтажных жилых строений

Распространенность потенциальных естественных и антропогенных источников радоноопасности геологической среды и доли жилых строений в их пределах для территории Ленинск-Кузнецкого городского округа

Потенциальные источники радоноопасности	Вся территория		Шахтное поле	
	(F _p), %	(A _p), %	(F _p), %	(A _p), %
Состав пород (свиты)				
P ₂ km	29,98	64,47	11,34	35,58
P ₂ us	63,63	35,56	36,07	12,47
P ₂ ln	5,83	0,58	0,31	0,01
J ₁ os	0,61	0,00	0	0
Тектоника (крупные тектонические нарушения)				
Виноградовский взбросо-надвиг	2,67	2,82	0	0
Журинский взбросо-надвиг	3,38	8,71	0,21	0,42
Кильчигизский взбросо-надвиг	0,05	0,00	0,05	0
Нарушения меньшей амплитуды	1,50	1,88	0,81	1,28
Все нарушения	7,58	13,33	1,06	1,69
Тектоника и состав пород				
P ₂ km	3,65	9,10	0,42	1,56
P ₂ us	3,91	4,59	0,64	0,13

Примечание. *P₂km – казанково-маркинская свита; P₂us – ускатская свита; P₂ln – ленинская свита; J₁os – осинонская свита.

Анализ показывает, что расположение ИЖС, вероятно, не учитывает наличие источников естественной потенциальной радоноопасности. Наблюдается увеличение числа жилых строений в казанково-маркинской свите (P_2 km) при меньшем ее распространении, в том числе и зоне тектонической нарушенности, которая связана в первую очередь с Журинским взбросо-надвигом и нарушениями меньшей амплитуды. Данный факт предположительно можно объяснить меньшей современной перспективностью казанково-маркинской свиты в отношении потенциала добычи угля.

Распределение ИЖС также, вероятно, не в полной мере учитывает антропогенные потенциальные источники радоноопасности геологической среды. Число строений увеличивается на территории шахтных полей казанково-маркинской свиты, в том числе и в пределах одновременной естественной и техногенной нарушенности пород данной стратифицируемой толщи. Что, предположительно, можно связать с вытеснением жилых земель под ИЖС с территорий обрабатываемых в настоящее время шахтных полей.

Данные факторы естественной и антропогенной потенциальной радоноопасности геологической среды являются первостепенными для изучения с учетом распространенности ИЖС в их пределах.

При установлении средних показателей плотности потока радона из грунта и эквивалентной равновесной объемной активности радона в жилых строениях предложенная методика может быть дополнена усреднением по всему административному образованию с учетом доминантных территорий.

Заключение

Таким образом, проведенный с помощью предлагаемой методики анализ потенциальных источников радоноопасности территории Ленинск-Кузнецкого городского округа позволил выделить существенные неоднородности в распределении ИЖС, которые предположительно вызваны в числе прочих причин влиянием расположения современных обрабатываемых подземным способом пространств, но без должного учета радиологических рисков для населения.

Выяснение доли строений, расположенных в той или иной части геологической среды с определенным набором факторов, связанных с радоновой опасностью, мо-

жет предоставить более точные данные для сравнения с эпидемиологической статистикой по новообразованиям дыхательной системы административных территорий. В целом данный подход позволит более достоверно выяснить вклад наиболее существенных факторов геологической среды в общий канцерогенный риск населения угледобывающих районов Кузбасса.

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

Список литературы / References

1. Ajrouche R., Ielsch G., Cléro E., Roudier C., Gay D. Quantitative Health Risk Assessment of Indoor Radon: A Systematic Review. *Radiat Prot Dosimetry*. 2017. Vol. 177. № 1–2. P. 69–77. DOI: 10.1093/rpd/ncx152.
2. Gawelek E., Drozdowska B., Fuchs A. Radon as a risk factor of lung cancer. *Przegl Epidemiol*. 2017. Vol. 71. № 1. P. 90–98.
3. Eidemüller M., Jacob P., Lane R., Frost S., Zabłotcka L. Lung Cancer Mortality (1950–1999) among Eldorado Uranium Workers: A Comparison of Models of Carcinogenesis and Empirical Excess Risk Models. *PLoS One*. 2012. Vol. 7. № 8. DOI: 10.1371/journal.pone.0041431.
4. Злобина А.Н., Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Фархутдинов И.М., Ванг Н. Радиоэкологическая опасность для населения в районах распространения высокорадиоактивных гранитов // *Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг Георесурсов*. 2019. Т. 330. № 3. С. 111–125. DOI: 10.18799/24131830/2019/3/172.
5. Zlobina A.N., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Farkhutdinov I.M., Wang N. Radioecological hazard for the population living in the regions with high radioactive granites / *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. Inzhiniring Georesursov*. 2019. V. 330. № 3. 111–125 (in Russian).
6. Маренный М.А., Романов В.В., Астафуров В.И., Губин А.Т., Киселев С.М., Нефедов Н.А., Пенезев А.В. Проведение обследований зданий различного назначения на содержание радона на территориях, обслуживаемых ФМБА России // *Радиационная гигиена*. 2015. Т. 8. № 1. С. 23–29.
7. Marennyy A.M., Romanov V.V., Astafurov V.I., Gubin A.T., Kiselev S.M., Nefedov N.A., Penesev A.V. Survey for indoor radon in dwellings on the territories supervised by FMBA of Russia // *Radiation hygiene*. 2015. Vol. 8. № 1. P. 23–29 (in Russian).
8. Tchortz-Trzeciakiewicz D.E., Kłos M. Factors affecting atmospheric radon concentration, human health. *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 584–585. P. 911–920. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.137.
9. Шандала Н.К., Семенова Н.П., Исаев Д.В., Киселев С.М., Серегин В.А., Титов А.В., Филонова А.А., Журавлева Л.А., Маренный А.М. Радиоэкологическая обстановка в районе расположения Приаргунского производственного горно-химического объединения // *Гигиена и санитария*. 2014. № 4. С. 14–18.
10. Shandala N.K., Semenova M.P., Isaev D.V., Kiselev S.M., Seregin V.A., Titov A.V., Filonova A.A., Zhuravleva L.A. Radioecological situation in the area of JSC “Priargunsky Production Mining and Chemical Association” // *Hygiene and Sanitation*. 2014. № 4. P. 14–18 (in Russian).
11. Lawrence C., Akber R., Bollhöfer A., Martin P. Radon-222 exhalation from open ground on and around a uranium mine in the wet-dry tropics. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009. Vol. 100. № 1. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.09.003.
12. Palchik V. Localization of mining-induced horizontal fractures along rock layer interfaces in overburden: Field meas-

urements and prediction. *Environmental Geology*. 2005. Vol. 48. P. 68–80. DOI: 10.1007/s00254-005-1261-y.

10. Lu W., Cao Y.-J., Tien J. Method for prevention and control of spontaneous combustion of coal seam and its application in mining field. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017. Vol. 27. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.07.018.

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

12. Klingel R., Kanski J. Influence of underground mining on the geogenic radon potential. *Radon in the Living Environment*. 1999. P. 773–786.

13. 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).

14. Лешуков Т.В., Легошин К.В., Ларионов А.В. Пространственная изменчивость плотности потока радона на территориях подземной добычи угля // Успехи современного естествознания. 2020. № 4. С. 93–97. DOI: 10.17513/use.37368.

Leshukov T.V., Legoshin K.V., Larionov A.V. Geographic variation in radon flux density in territory underground mines // *Advances in current natural sciences*. 2020. № 4. P. 93–97 (in Russian).

15. 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.