

УДК 551.2:546.296(476)

DOI 10.63874/2218-0311-2026-1-91-102

Сергей Григорьевич Котов¹, Евгений Александрович Кухарик², Геннадий Аркадьевич Аронов³¹канд. техн. наук, доц., ведущий науч. сотрудник отд. инженерно-информационного обеспечения
Центра геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси²канд. геол.-минерал. наук, доц., зав. лаб. региональной геологии и современной геодинамики
Института природопользования Национальной академии наук Беларуси³канд. геол.-минерал. наук, директор Центра геофизического мониторинга
Национальной академии наук Беларуси**Sergey Kotov¹, Evgeniy Kukharik², Gennady Aronov³**¹Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leader Researcher
of the Engineering-Informational Support Department of the Centre of Geophysical Monitoring
of National Academy of Sciences of Belarus²Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor,
Head of the Laboratory of Regional Geology and Modern Geodynamics
of Institute for Nature Management of National Academy of Sciences of Belarus³Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director of the Centre of Geophysical Monitoring
of National Academy of Sciences of Belaruse-mail: lab@geology.win

О ПОСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНЫХ РАДОНОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ГЕОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ЗОНАХ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

Обоснована необходимость постановки непрерывных радонометрических исследований в геодинамически активных зонах территории Беларуси. Показано, что для реализации подобных работ может быть использован комплекс «Альфарад плюс», способный измерять, фиксировать и оперативно передавать значения по объемной активности радона и плотности потока этого газа для дальнейшей обработки и интерпретации. Этот вывод подтвержден обобщенными данными специальных замеров, выполненных в период 18.12.2024–28.02.2025 гг. в шурфах, заложенных возле здания государственного учреждения «Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси», а также на площадках вблизи геофизических обсерваторий «Нарочь» и «Плещеницы».

Ключевые слова: радон, радонометрический метод, объемная активность радона, плотность потока радона, геодинамика, Беларусь.

On Conducting of Continuous Radonometry Studies in Geodynamic Active Zones of the Territory of Belarus

This article substantiates the need for continuous radonometric studies in geodynamically active zones of Belarus. It demonstrates that the «Alfarad Plus» system, capable of measuring, recording, and quickly transmitting radon volumetric activity and flux density data for further processing and interpretation, can be used to implement such studies. This conclusion is supported by summarized data from special measurements conducted between December 18, 2024, and February 28, 2025, in pits near the building of the Center for Geophysical Monitoring of the National Academy of Sciences of Belarus, as well as at sites near the «Naroch» and «Pleshchenitsy» geophysical observatories.

Key words: radon, radonometric method, volumetric activity of radon, radon flux density, geodynamics, Belarus.

Введение

Благодаря развитию и применению эманационного (радонового) метода исследований к настоящему времени накоплен обширный фактический материал об особенностях поведения радиоактивного газа радона в различных геолого-геодинамических условиях многих регионов мира. Если в первые десятилетия XX в. закладывались методические основы радонометрии, а проводимые с использованием этого метода исследования имели общепознавательное значение, то уже к середине прошлого столетия диагностика объемной активности радона применялась в практической деятельности –

при поиске и разведке месторождений урановых руд, региональном изучении геодинамической активности недр, а также в гидрогеологических исследованиях [1]. В 1970–1980 гг. радонометрический метод начали активно применять для решения задач инженерной геологии и геоэкологии (определение и картирование радоноопасных территорий, оценка радиационной обстановки в зданиях и сооружениях, а также с целью нормирования допустимых уровней радона в жилых и общественных помещениях). Полученные материалы были обобщены в крупных монографических изданиях [2–5].

На протяжении последних 25–35 лет получило развитие направление мониторинга временных вариаций радонового поля, в т. ч. в связи с изучением сейсмотектонических процессов и возможных предвестников землетрясений. На современном этапе большой интерес представляют комплексные геологические исследования, сочетающие применение радонометрического метода с другими изотопными и геофизическими методами, использованием физико-математических моделей переноса радона, проводятся долговременные и систематические наблюдения в различных геологических условиях. Отдельным важным аспектом прикладного применения эманационного метода является изучение геодинамической обстановки территорий размещения ответственных инженерных сооружений и крупных промышленных объектов, таких как АЭС, ГЭС, нефте- и газопроводы, крупные подземные горные выработки и др. Подобные изыскания проводятся во многих странах мира, о чем свидетельствует представительная опубликованная литература [6–13].

Опыт использования радонометрического метода в Республике Беларусь обобщен в работе [1]. Ее авторами дана оценка роли особенностей геологического строения в формировании радоновых аномалий, выполнено комплексное изучение концентраций радона в почвенном воздухе зон разрывных нарушений, различных генетических типов четвертичных отложений, выявлен радонопродуцирующий потенциал различных типов пород платформенного чехла и кристаллического фундамента территории Беларуси. Однако, несмотря на это, следует отметить, что в стране долговременные исследования эманаций и эксхалаций радона практически не проводились, что и определяет актуальность постановки работ в данном направлении.

Целью настоящей статьи является обоснование постановки непрерывных радонометрических исследований в пределах геодинамически активных зон территории Беларуси и обобщение промежуточных результатов проведенных измерений, выполненных с использованием комплекса «Альфарад плюс».

Материалы и методы исследования

Измерение объемной активности ^{222}Rn с использованием комплекса «Альфарад плюс» основано на электростатическом осаждении заряженных ионов ^{218}Po из отобранной пробы воздуха на поверхность полупроводникового детектора. Объемная активность ^{222}Rn определяется по количеству зарегистрированных альфа-частиц при распаде атомов ^{218}Po , осевших на полупроводниковом детекторе.

Измерительная камера блока измерения объемной активности комплекса «Альфарад плюс» выполнена из пластика и представляет собой пустотелый цилиндр с расположенным внутри высоковольтным электродом и герметично закрытыми фланцами с двух сторон. На входном фланце установлен фильтродержатель с аэрозольным фильтром, а на внешней поверхности размещен входной штуцер. В центре выходного фланца установлен полупроводниковый детектор с предусилителем, сигнал с которого поступает на блок управления. На выходном фланце установлена климатическая камера, которая содержит датчики температуры и влажности и соединена с измерительной камерой.

Отбор пробы воздуха в измерительную камеру осуществляется с помощью микро-воздуходувки. Проба воздуха через защитный аэрозольный фильтр поступает в измерительную камеру, проходит через климатическую камеру и поступает в микровоздуходувку. Защитный аэрозольный фильтр используется для очистки контролируемого воздуха от дисперсной фазы аэрозолей и, в том числе, от дочерних продуктов распада радона и торона, находящихся в воздухе.

Программное обеспечение «Alfa» измерительного комплекса для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» предназначено для выполнения следующих функциональных задач: оцифровки, сортировки и первичной обработки импульсов, полученных с измерительных блоков детектирования и датчиков (управления работой амплитудно-цифрового преобразователя); управления режимами работы комплекса и сервисного обслуживания (тестирования) блоков; конечной обработки и отображения данных на экране индикаторного блока комплекса в виде таблиц и графиков; хранения данных [14].

Результаты и их обсуждение

Непрерывные радонометрические исследования организуются с применением приборной базы, способной автоматически производить замеры, собирать и передавать полученные данные для дальнейшей обработки. Для решения подобной задачи был выбран комплекс «Альфарад плюс». С целью проверки работоспособности этого комплекса в полевых условиях были выполнены предварительные измерения объемной активности радона на площадках в воздухе шурфов диаметром 200 мм, заложенных на территории геофизических обсерваторий «Нарочь» и «Плещеницы», а также непосредственно около здания государственного учреждения «Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси». Полученные показатели приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты исследования объемной активности радона в воздухе шурфов

Место отбора пробы воздуха	Дата отбора пробы	Глубина шурфа, м	Средняя объемная активность радона, Бк/м ³
Территория геофизической обсерватории «Нарочь»	16.01.2025	0,9	218 ± 65
		1	251 ± 75
	17.01.2025	0,9	237 ± 71
		1	216 ± 64
Территория геофизической обсерватории «Плещеницы»	23.01.2025	1	378 ± 101

Данные таблицы 1 показывают, что значения объемной активности радона в воздухе превышают фоновые значения. Это обусловлено тем, что покровные отложения в местах отбора проб представлены флювиогляциальными аккумуляциями, которые в основном являются радонобезопасными. На территории геофизической обсерватории «Нарочь» проведено циклическое исследование объемной активности радона в воздухе бункера, в котором размещены геофизические приборы. Результаты замеров показаны на рисунке 1. Результаты циклического исследования объемной активности радона в воздухе бункера геофизической обсерватории «Нарочь» показали, что ее среднее значение составляет 146 Бк/м³, предел колебаний – 78–185 Бк/м³. Перед исследованием проб из шурфов в режиме «ОА 20» комплекса «Альфарад плюс» осуществлялся отбор пробы воздуха в помещении государственного учреждения «Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси» с помощью встроенной воздуходувки в течение 3 мин., а также производилось измерение объемной актив-

ности радона в течение 20 мин. Полученное значение объемной активности радона в воздухе не превышало величины $Q_0 \leq 20 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$.

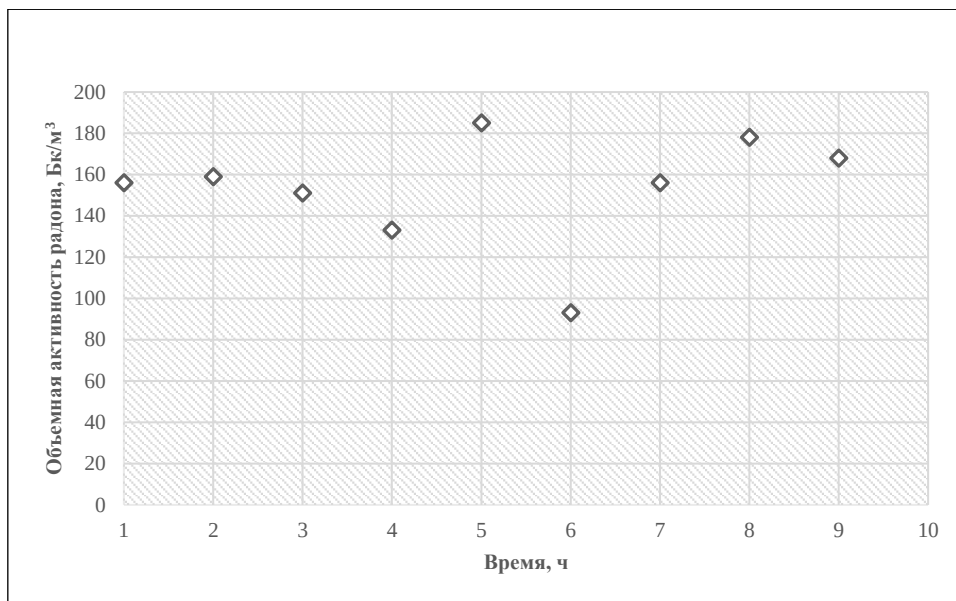


Рисунок 1 – Результаты циклического измерения объемной активности радона в воздухе бункера геофизической обсерватории «Нарочь»

Далее выполнялись замеры объемной активности радона в 3 шурфах, расположенных на территории государственного учреждения «Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси». Они были заложены в песчаных моренных отложениях припятского (сожского) возраста. Шурфы глубиной 75 и 50 см ориентированы по меридиану, а шурфы 75 и 100 см – по широте; они перекрывались деревянными щитами для исключения поступления атмосферных осадков.

Отбор проб в шурфах производился, как правило, два раза в день: после восхода солнца и около полудня. При отборе проб воздуха использовались специальные пробоотборники, входящие в комплект комплекса «Альфарад плюс». Для отбора проб воздуха из шурфов соединяли штуцер «Вход» автономной воздуходувки с входным штуцером пробоотборника с помощью соединительной трубки из комплекта комплекса «Альфарад плюс». Пробоотборник помещали на дно шурфа. Продолжительность пробоотбора составляла 5 мин. По окончании отбора пробы пробоотборник герметизировали заглушками и записывали момент времени отбора t_1 . Результаты исследования объемной активности в шурфах глубиной 75 и 100 см в день исследования и через 2 сут. приведены в таблице 2.

Как видно из данных таблицы 2, объемная активность радона в шурфах глубиной 75 см и 100 см через 2 сут. выше объемной активности радона первоначально отобранной пробы. Исключения составляют результаты исследования в шурфе глубиной 75 см от 28.02.2025 и 03.03.2025 и в шурфе глубиной 100 см от 21.02.2025 и 24.02.2025. В этих случаях объемная активность несколько ниже и укладывается в диапазон относительной погрешности прибора «Альфарад плюс», которая составляет $\pm 30\%$ [14].

Таблица 2 – Значения объемной активности радона из воздуха шурфов глубиной 75 см и 100 см в день исследования и через 2 сут.

Дата	Q _{возд.} из шурфа глубиной 75 см, Бк/м ³		
	1 измерение	2 измерение	Среднее значение
14.02.2025	39 ± 11	97 ± 29	68 ± 20
17.02.2025	126 ± 33	94 ± 28	110 ± 33
21.02.2025	58 ± 17	38 ± 11	48 ± 14
24.02.2025	96 ± 28	–	96 ± 28
28.02.2025	138 ± 41	39 ± 11	89 ± 27
03.03.2025	0	129 ± 28	65 ± 19
	Q _{возд.} из шурфа 100 см, Бк/м ³		
	1 измерение	2 измерение	Среднее значение
14.02.2025	58 ± 17	19 ± 5	39 ± 12
17.02.2025	63 ± 18	–	63 ± 18
21.02.2025	115 ± 34	19 ± 5	67 ± 20
24.02.2025	32 ± 9	62 ± 18	47 ± 14
28.02.2025	115 ± 34	19 ± 5	67 ± 20
03.03.2025	129 ± 38	–	129 ± 38

За вторую половину декабря 2024 г. – февраль 2025 г. в течение 45 рабочих дней проведено исследование 220 проб воздуха из шурфов, из них 52 пробы из шурфа глубиной 50 см и по 84 пробы из шурфов глубиной 75 и 100 см соответственно. Кроме этого, выполнено 202 исследования по два измерения из каждого шурфа: 46 измерений из шурфа глубиной 50 см и по 78 измерений из шурфов глубиной 75 и 100 см соответственно, а также по 6 единичных замеров из каждого шурфа 50, 75 и 100 см. По материалам парных измерений определялось среднее арифметическое значение, которое дальше использовалось при проведении анализа данных.

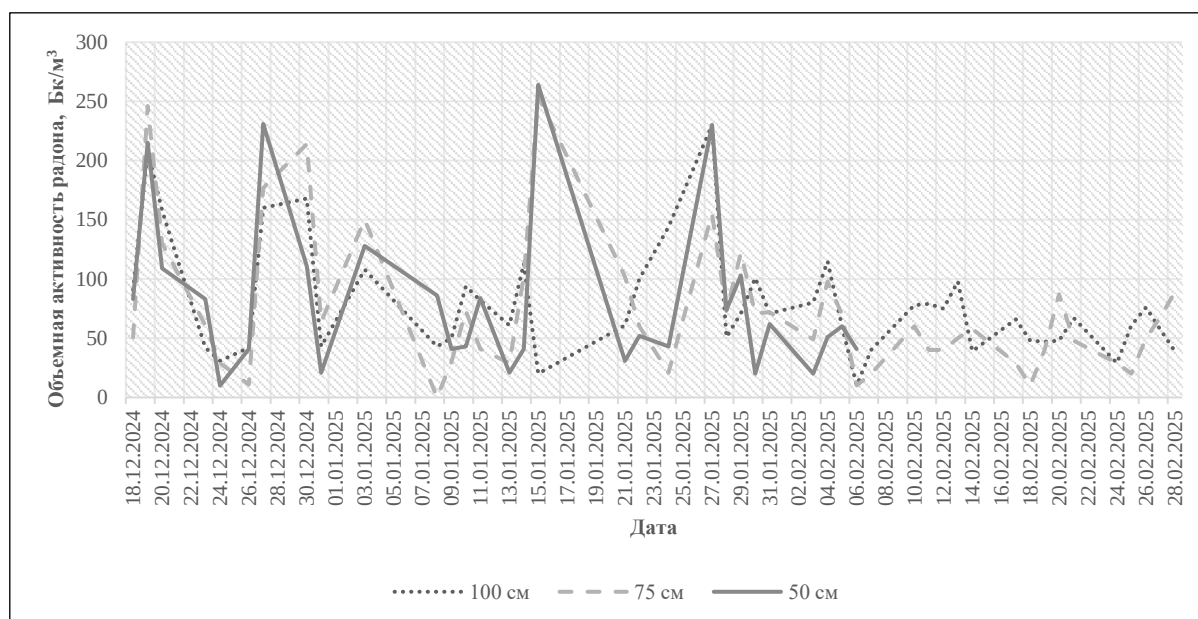


Рисунок 2 – Динамика значений объемной активности радона (Бк/м³) в воздухе шурфов различной глубины, заложенных возле здания государственного учреждения «Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси» в г. Минске, за период с 18.12.2024 по 28.02.2025

Результаты проведенных исследований объемной активности радона показали, что она не является постоянной. Обобщение опубликованных материалов позволило высказать предположение, что объемная активность радона в воздухе шурфов зависит

от среднесуточной температуры воздуха. На рисунке 2 представлена динамика значений объемной активности радона в воздухе шурфов, заложенных возле здания государственного учреждения «Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси», за период с 18.12.2024 по 28.02.2025.

Данные, представленные на рисунке 2, показывают значительную изменчивость показателей объемной активности радона во времени. Это может объясняться существованием взаимосвязи объемной активности радона от некоторых метеорологических характеристик, а именно от среднесуточной температуры воздуха и количества атмосферных осадков. Для проверки этого утверждения были проанализированы соответствующие материалы наблюдений по метеостанции «Минск» за период с 18.12.2024 по 28.02.2025 (рисунки 3 и 4).

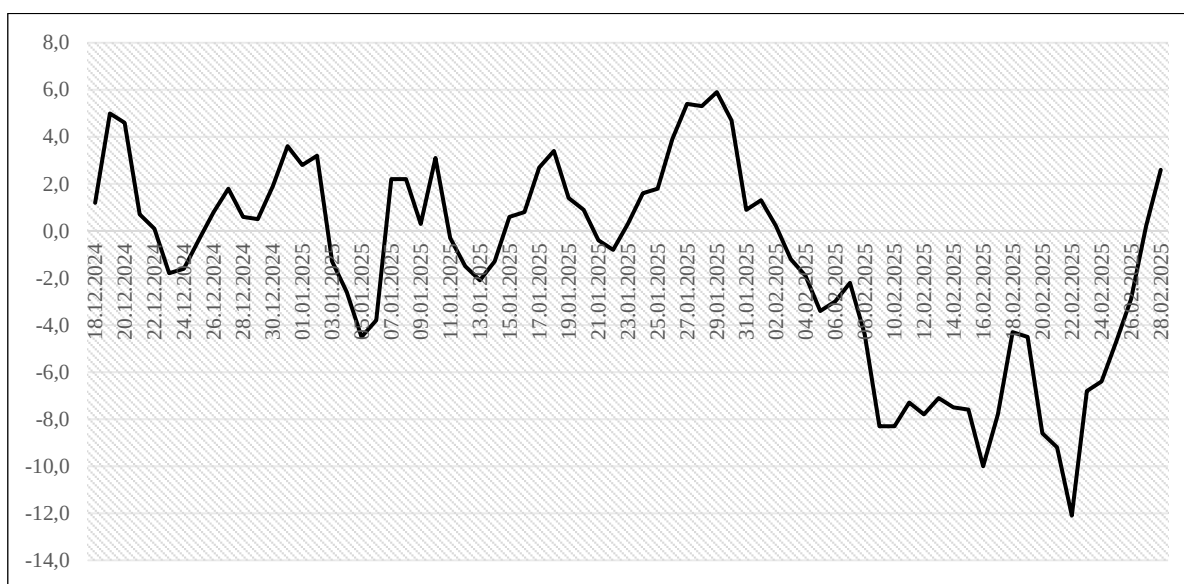


Рисунок 3 – Среднесуточная температура в г. Минске за период с 18.12.2024 по 28.02.2025

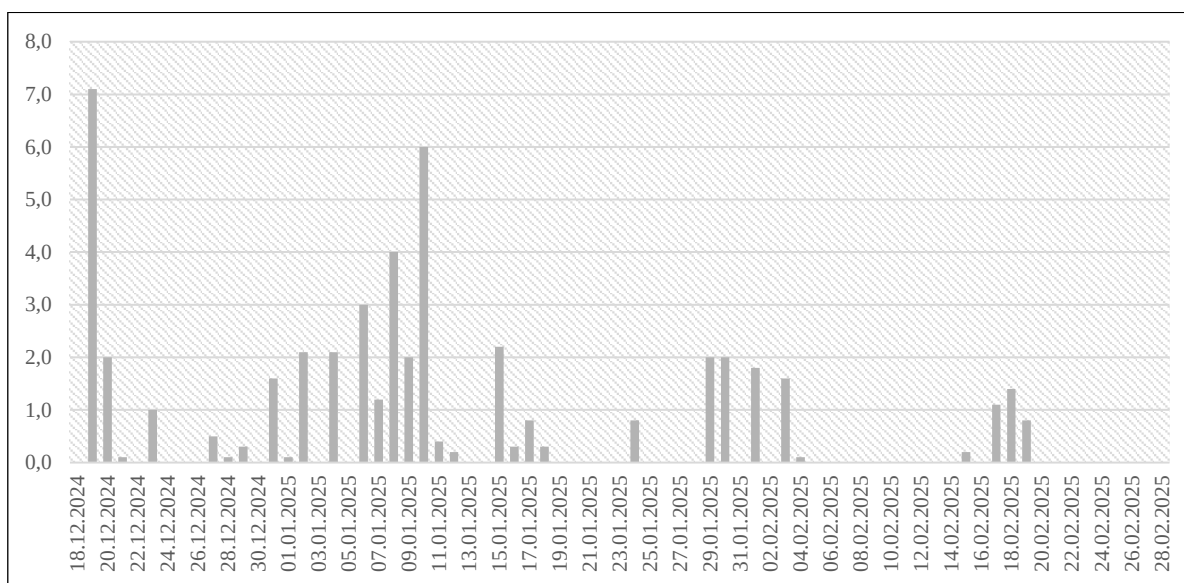


Рисунок 4 – Количество атмосферных осадков в г. Минске за период с 18.12.2024 по 28.02.2025

Сопоставление данных рисунков 2 и 3 за период 18.12.2024 – 31.12.2024 свидетельствует о том, что на качественном уровне существует взаимосвязь между объемной активностью радона в шурфах и среднесуточной температурой воздуха. Учитывая это, предпринята попытка найти количественную зависимость между объемной активностью радона в воздухе шурфов и среднесуточной температурой. В результате обработки полученных данных получены следующие линейные уравнения:

– для шурфа 100 см:

$$Q_0 = 72,7 + 19,5t, \quad (1)$$

– для шурфа 75 см:

$$Q_0 = 76,1 + 20,1t, \quad (2)$$

– для шурфа 50 см:

$$Q_0 = 78,1 + 15,1t, \quad (3)$$

где здесь и далее по тексту Q_0 – объемная активность радона, Бк/м³, t – среднесуточная температурой, °С.

Коэффициент корреляции Пирсона, который оценивает силу и направление связи между численными величинами, для уравнения (1) составляет 0,67, для уравнения (2) – 0,56, для уравнения (3) – 0,48. Таким образом, корреляция, описываемая уравнениями (1) и (2), высокая положительная, а уравнением (3) – средняя положительная.

Учитывая, что коэффициенты в уравнениях (1) и (2) близки, предпринята попытка найти единую количественную зависимость между объемной активностью радона в воздухе шурфов глубиной 75 см и 100 см и среднесуточной температурой воздуха. В результате обработки полученных данных получено следующее линейное уравнение:

$$Q_0 = 74,4 + 19,8t. \quad (4)$$

Значение коэффициента корреляции Пирсона составило 0,61. Это значит, что корреляция, описываемая уравнением (4), высокая положительная.

При сопоставлении данных рисунков 2 и 3 за период 18.12.2024 – 31.01.2025 видно, что шести положительным пикам значений объемной активности радона в воздухе шурфов соответствуют шесть пиков среднесуточной температуры воздуха. В связи с этим предпринята попытка получить количественную зависимость между объемной активностью радона в воздухе шурфов и среднесуточной температурой воздуха.

В результате обработки данных, полученных во второй половине декабря 2024 – январе 2025 г., выведены следующие линейные уравнения:

– для шурфа 100 см:

$$Q_0 = 79,6 + 9,1t, \quad (5)$$

– для шурфа 75 см:

$$Q_0 = 82,1 + 7,3t, \quad (6)$$

– для шурфа 50 см:

$$Q_0 = 77,1 + 8,3t. \quad (7)$$

Коэффициент корреляции Пирсона для уравнения (5) составляет 0,41, для уравнения (6) – 0,26, для уравнения (7) – 0,29. Таким образом, корреляция, описываемая уравнениями (5) – (7), средняя положительная.

Учитывая, что коэффициенты в уравнениях (5) и (6) близки, предпринята попытка найти единую количественную зависимость между объемной активностью радона в воздухе шурфов глубиной 75 и 100 см и среднесуточной температурой воздуха. В результате обработки экспериментальных данных получено следующее линейное уравнение:

$$Q_0 = 80,8 + 8,2t. \quad (8)$$

При этом коэффициент корреляции Пирсона составил 0,18, что характеризует корреляцию, описываемую уравнением (8) как слабую положительную.

На основании этого можно сделать заключение, что линейная корреляционная зависимость объемной активности радона в воздухе шурфов от температуры воздуха существует. Проведено также обобщение и анализ данных рисунков 2 и 3 за весь период наблюдений (18.12.2024 – 28.02.2025). В результате обработки полученных материалов выведены следующие линейные уравнения:

– для шурфа 100 см:

$$Q_0 = 84,6 + 4,2t, \quad (9)$$

– для шурфа 75 см:

$$Q_0 = 80,9 + 5,5t, \quad (10)$$

– для шурфа 50 см:

$$Q_0 = 74,4 + 8,9t. \quad (11)$$

Коэффициент корреляции Пирсона для уравнения (9) составил 0,39, для уравнения (10) – 0,41, для уравнения (11) – 0,35. Таким образом, корреляция, описываемая уравнениями (9) – (11), средняя положительная.

Следует отметить, что коэффициенты корреляции Пирсона для данных за вторую половину декабря 2024 – февраль 2025 г. даже несколько выше, чем за вторую половину декабря 2024 – январь 2025 г. Это еще раз доказывает, что существует линейная корреляционная зависимость между значениями объемной активности радона в воздухе шурфов и среднесуточной температурой воздуха.

Как видно из данных рисунка 4, 18 и 31 декабря 2024 г. зафиксировано выпадение атмосферных осадков. Это позволяет предположить, что выпадение атмосферных осадков является фактором, снижающим объемную активность радона в воздухе шурфов. Чтобы проверить это предположение, из выборки данных по объемной активности радона в воздухе шурфов и среднесуточной температуре воздуха за вторую половину декабря 2024 – январь 2025 г. исключены дни, когда выпадали атмосферные осадки. В результате получены следующие линейные уравнения:

– для шурфа 100 см:

$$Q_0 = 90,2 + 11,1t, \quad (12)$$

– для шурфа 75 см:

$$Q_0 = 77,5 + 7,0t, \quad (13)$$

– для шурфа 50 см:

$$Q_0 = 60,5 + 16,0t. \quad (14)$$

Коэффициент корреляции Пирсона для уравнения (12) составляет 0,48, для уравнения (13) – 0,28, для уравнения (14) – 0,66. Таким образом, корреляция, описываемая уравнениями (12) и (13), средняя положительная, а уравнением (14) – высокая положительная. Сопоставление корреляционных коэффициентов Пирсона для уравнений (5) и (12), а также (6) и (13) свидетельствует о том, что они близки. В то же время коэффициент корреляции Пирсона для уравнения (14) существенно выше, чем для уравнения (7).

Если исключить из рассмотрения данные за одни сутки после выпадения осадков и обработать их, то получим корреляционные зависимости, у которых коэффициент корреляции Пирсона для шурфов глубиной 100 и 75 см не изменится, а для шурфа глубиной 50 см достигнет значения 0,71. Это позволяет заключить, что влияние выпадения атмосферных осадков на линейную корреляцию объемной активности радона в воздухе шурфов от температуры имеет место для неглубоких (50 см) шурфов. Для проверки этого вывода проведено аналогичное исследование на выборке данных за вторую поло-

вину декабря 2024 – февраль 2025 г. В результате обработки данных получены следующие линейные уравнения:

– для шурфа 100 см:

$$Q_0 = 85,7 + 4,2t, \quad (15)$$

– для шурфа 75 см:

$$Q_0 = 74,6 + 4,3t, \quad (16)$$

– для шурфа 50 см:

$$Q_0 = 66,4 + 13,2t. \quad (17)$$

При сопоставлении уравнений (9) и (15), (10) и (16), (11) и (17) видно, что коэффициенты эмпирических уравнений, полученных для данных за вторую половину декабря 2024 – февраль 2025 г., близки к коэффициентам для данных за этот же период, где исключены дни с осадками. Коэффициент корреляции Пирсона для уравнения (15) составляет 0,39, для уравнения (16) – 0,38 и для уравнения (17) – 0,63. Таким образом, корреляция, описываемая уравнениями (15) и (16), средняя положительная, а уравнением (17) – высокая положительная. Сопоставление корреляционных коэффициентов Пирсона для уравнений (9) и (15), а также (10) и (16) свидетельствует о том, что они близки. В то же время коэффициент корреляции Пирсона для уравнения (17) существенно выше, чем для уравнения (11). Коэффициент корреляции Пирсона для уравнения (15) составляет 0,39, для уравнения (16) – 0,38, для уравнения (17) – 0,63. Таким образом, корреляция, описываемая уравнениями (15) и (16), средняя положительная, а уравнением (17) – высокая положительная.

В феврале 2025 г. было проведено исследование плотности потока радона. На рисунке 5 представлена динамика значений плотности потока радона в шурфе глубиной 50 см, заложенного возле здания государственного учреждения «Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси».

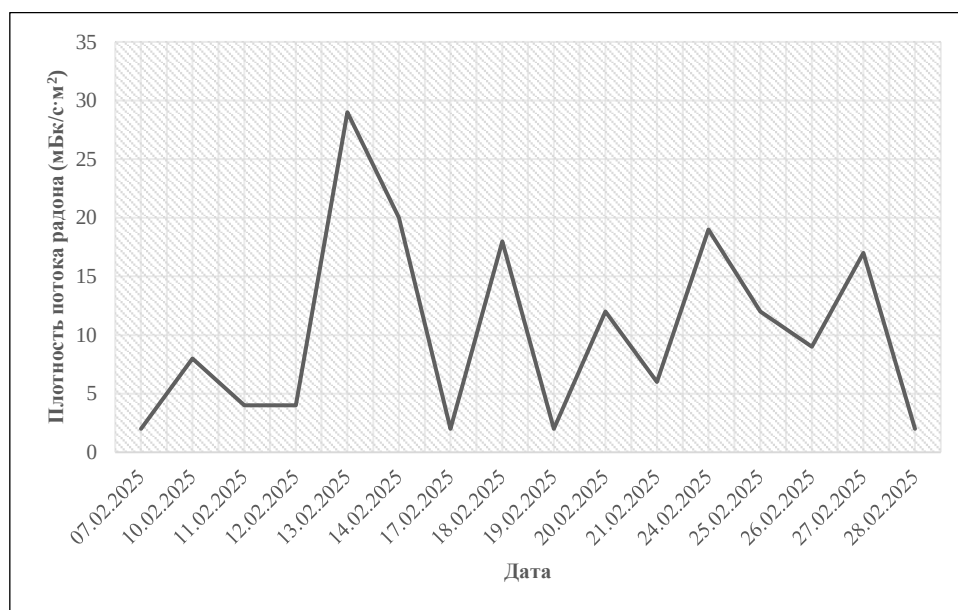


Рисунок 5 – Плотность потока радона (мБк/с·м²) в шурфе глубиной 50 см, заложенном возле здания государственного учреждения «Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси» в г. Минске, за период 07.02.2025 – 28.02.2025

Проанализируем значения среднесуточной температуры и количества атмосферных осадков в г. Минске во второй половине февраля 2025 г. (рисунки 3 и 4) с измеренными значениями плотности потока радона. Нужно отметить, что все измерения плотности потока радона, кроме последнего, проводились при отрицательных среднесуточных температурах воздуха, а выпадение атмосферных осадков фиксировалось только 17.02.2025 и 18.02.2025. Не просматривается корреляция между плотностью потока радона в шурфе глубиной 50 см и выпадением атмосферных осадков.

Вместе с тем, учитывая, что выявлена корреляционная зависимость между объемной активностью радона в воздухе шурфа и температурой воздуха, исследована корреляционная связь значений плотности потока радона и температуры воздуха в шурфе глубиной 50 см. Результаты этого исследования показали, что коэффициент корреляции Пирсона для всей совокупности данных по плотности потока радона в зависимости от температуры воздуха равен 0,07. При исключении из рассмотрения значений для положительной среднесуточной температуры коэффициент корреляции Пирсона для этой совокупности данных равен 0,14, а при исключении из рассмотрения данных для суток с выпадением атмосферных осадков коэффициент корреляции Пирсона составляет -0,17. Если исключить из рассмотрения данные и для положительной среднесуточной температуры, и для суток с выпадением атмосферных осадков, коэффициент корреляции Пирсона равен 0,03. Из теории корреляционного анализа известно, что для диапазонов значений 0 – 0,24 и 0 – -0,24 коэффициента корреляции Пирсона связь между переменными слабая положительная (или отрицательная). Это позволяет сделать вывод, что между плотностью потока радона в шурфе глубиной 50 см и среднесуточной температурой воздуха корреляционная зависимость отсутствует.

Проведенные с помощью комплекса «Альфарад плюс» исследования объемной активности радона и плотности потока этого радиоактивного газа показывают его эффективность и позволяют сделать вывод о том, что использование рассматриваемого прибора возможно при постановке непрерывных радонометрических исследований в различных геологических условиях территории Беларуси. Наибольший интерес представляет организация подобных работ в геодинамически активных участках, к которым относятся зоны активных разрывных нарушений (разломов) земной коры, а также территория Солигорского горнопромышленного района, в границах которого в настоящее время фиксируются проявления техногенно обусловленной сейсмичности. С учетом того факта, что в окрестностях г. Солигорска функционирует сеть сейсмических станций, ее целесообразно дополнить аппаратурой для выполнения непрерывных наблюдений за поведением радиоактивного газа радона с целью детального изучения геодинамической обстановки.

Заключение

1. Анализ проведенных исследований показывает, что радонометрический метод в настоящее время широко используется при изучении геодинамической активности недр во многих регионах мира. На территории Беларуси были выполнены циклы работ по отдельным зонам разломов земной коры, однако долгосрочные исследования не проводились. Изложенные в настоящей статье материалы показывают, что реализация непрерывных радонометрических изысканий возможна с использованием комплекса «Альфарад плюс», способного определять объемную активность радона и плотность его потока и передавать полученные значения для дальнейшей обработки и интерпретации. Существенный интерес в этом отношении представляют зоны активных на современном этапе разломов земной коры, а также территория Солигорского горнопромышленного района, в границах которого фиксируется проявление техногенной сейсмичности.

2. Во второй половине декабря 2024 – феврале 2025 г. выявлена средняя положительная корреляция между объемной активностью радона в воздухе шурфов и значением среднесуточной температуры воздуха. Показано, что во второй половине февраля 2025 г. корреляционная зависимость между значениями плотности потока радона в шурфе глубиной 50 см и среднесуточной температурой воздуха отсутствует.

3. Установлено, что выпадение атмосферных осадков оказывает влияние на корреляционную зависимость между показателями объемной активности радона в воздухе шурфа и значением среднесуточной температуры воздуха для неглубоких шурфов (50 см), и не влияет на объемную активность радона в воздухе глубоких (75 и 100 см) шурфов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Матвеев, А. В. Радон в геологических комплексах Беларуси / А. В. Матвеев, А. К. Карабанов, М. И. Автушко. – Мн. : Бел. навука, 2017. – 136 с.
2. Султанходжаев, А. Н. Радиоактивные эманации при изучении геологических процессов / А. Н. Султанходжаев, В. Г. Тыминский, А. И. Спиридонов. – Ташкент : Фан, 1979. – 120 с.
3. Шашкин, В. Л. Эманирование радиоактивных руд и минералов / В. Л. Шашкин, М. И. Пруткина. – М. : Атомиздат, 1979. – 112 с.
4. Гудзенко, В. В. Изотопы радия и радон в природных водах / В. В. Гудзенко, В. Т. Дубинчук. – М. : Наука, 1987. – 159 с.
5. Wilkening, M. Radon in the Environment / M. Wilkening. – Amsterdam : Elsevier, 1990. – 137 p.
6. Рудаков, В. И. Эманионный мониторинг геосред и процессов / В. И. Рудаков. – М. : Высш. шк., 2009. – 176 с.
7. Ульянов, В. Ю. Мониторинг радона как индикатора сейсмотектонических событий на площадке АЭС «Бушер-1» и прилегающей территории провинции Бушер Исламской Республики Иран / В. Ю. Ульянов // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 4 (25). – С. 7–17.
8. Семинский, К. Ж. Вариации объемной активности радона в разломных зонах земной коры: пространственные особенности / К. Ж. Семинский, А. А. Бобров, С. Дэмбэрэл // Физика Земли. – 2014. – № 6. – С. 80–98.
9. Бирюлин, С. В. Пространственно-временные закономерности проявления аномалий объемной активности радона перед тектоническими землетрясениями в районе Южных Курил : дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.10 / Бирюлин Сергей Викторович ; ФГБУН «Институт геофизики имени Ю. П. Булашевича УрО РАН». – Екатеринбург, 2021. – 137 л.
10. Soil gas radon: a tool for exploring active fault zones / K. Ioannides, C. Papachristodoulou, K. Stamoulis [et al.] // Applied Radiation and Isotopes. – 2003. – Vol. 59, iss. 2–3. – P. 205–213.
11. Radon, Cl^- and SO_4^{2-} anomalies in hot spring water associated with the 1995 earthquake swarm off the east coast of the Izu Peninsula, Central Japan / S. Nishizawa, G. Igarashi, Y. E. Sano [et al.] // Applied Geochemistry. – 1998. – Nr 13. – P. 89–94.
12. Spatial radon anomalies on active faults in California / C. Y. King, B. S. King, W. S. Evans, W. Zhang // Applied Geochemistry. – 1996. – Vol. 11. – P. 497–510.
13. The use of radon as an earthquake precursor / R. C. Ramola, M. Singh, A. S. Sandhu [et al.] // Nuclear Geophysics. – 1990. – Vol. 4, nr 2. – P. 275–287.
14. Комплекс измерительный для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс». – URL: https://ntm.ru/UserFiles/File/document/ION/Aplus/Alpharad_manual.pdf (дата обращения: 12.02.2026).
15. Архив погоды в Минске // Погода и климат в Беларуси. – URL: <https://www.pogodaiklimat.by/weather/26850> (дата обращения: 14.02.2026).

REFERENCES

1. Matveyev, A. V. Radon v geologicheskikh kompleksakh Belarusi / A. V. Matveyev, A. K. Karabanov, M. I. Avtushko. – Mн. : Bel. navuka, 2017. – 136 s.

2. Sultankhodzhaev, A. N. Radioaktivnye emanatsii pri izuchenii geologicheskikh protsessov / A. N. Sultankhodzhaev, V. G. Tyminskii, A. I. Spiridonov. – Tashkent : Fan, 1979. – 120 s.
3. Shashkin, V. L. Emanirovanie radioaktivnykh rud i mineralov / V. L. Shashkin, M. I. Prutkina. – M. : Atomizdat, 1979. – 112 s.
4. Gudzenko, V. V. Izotopy radiya i radon v prirodnykh vodakh / V. V. Gudzenko, V. T. Dubinchuk. – M. : Nauka, 1987. – 159 s.
5. Wilkening, M. Radon in the Environment / M. Wilkening. – Amsterdam : Elsevier, 1990. – 137 p.
6. Rudakov, V. I. Emanatsionnyi monitoring geosred i protsessov / V. I. Rudakov. – M. : Vyssh. shk., 2009. – 176 s.
7. Ul'yanov, V. Yu. Monitoring radona kak indikatora seismotektonicheskikh sobytii na ploshchadke AES «Busher-1» i prilegayushchei territorii provintsii Busher Islamskoi Respubliki Iran / V. Yu. Ul'yanov // *Global'naya yadernaya bezopasnost'*. – 2017. – № 4 (25). – S. 7–17.
8. Seminskii, K. Zh. Variatsii ob'emnoi aktivnosti radona v razlomnykh zonakh zemnoi kory: prostranstvennye osobennosti / K. Zh. Seminskii, A. A. Bobrov, S. Demberel // *Fizika Zemli*. – 2014. – № 6. – S. 80–98.
9. Biryulin, S. V. Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti proyavleniya anomalii ob'emnoi aktivnosti radona pered tektonicheskimi zemletryasenyami v raione Yuzhnykh Kuril : dis. ... kand. geol.-mineral. nauk : 25.00.10 / Biryulin Sergei Viktorovich ; FGBUN «Institut geofiziki imeni Yu. P. Bulashevicha UrO RAN». – Yekaterinburg, 2021. – 137 l.
10. Soil gas radon: a tool for exploring active fault zones / K. Ioannides, C. Papachristodoulou, K. Stamoulis [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2003. – Vol. 59, iss. 2–3. – P. 205–213.
11. Radon, Cl^- and SO_4^{2-} anomalies in hot spring water associated with the 1995 earthquake swarm off the east coast of the Izu Peninsula, Central Japan / S. Nishizawa, G. Igarashi, Y. E. Sano [et al.] // *Applied Geochemistry*. – 1998. – Nr 13. – P. 89–94.
12. Spatial radon anomalies on active faults in California / C. Y. King, B. S. King, W. S. Evans, W. Zhang // *Applied Geochemistry*. – 1996. – Vol. 11. – P. 497–510.
13. The use of radon as an earthquake precursor / R. C. Ramola, M. Singh, A. S. Sandhu [et al.] // *Nuclear Geophysics*. – 1990. – Vol. 4, nr 2. – P. 275–287.
14. Kompleks izmeritel'nyi dlya monitoringa radona, torona i ikh dochernikh produktov «Al'farad plus». – URL: https://ntm.ru/UserFiles/File/document/ION/Aplus/Alpharad_manual.pdf (data obrashcheniya: 12.02.2026).
15. Arkhiv pogody v Minske // Pogoda i klimat v Belarusi. – URL: <https://www.pogodaiklimat.by/weather/26850> (data obrashcheniya: 14.02.2026).

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 13.03.2026