

УДК (550.8.013:504.32):546.296  
DOI: 10.46698/VNC.2026.70.83.001

Оригинальная статья

## Моделирование плотности потока радона в зависимости от температуры и влажности воздуха (на примере аномальной зоны горы Бештау)

П.А. Сидякин<sup>1</sup>, А.А. Барышников<sup>1</sup>, И.М. Першин<sup>1</sup>, П.С. Микляев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пятигорский институт (филиал) Северо-Кавказского федерального университета,  
Россия, 357500, г. Пятигорск, ул. Ермолова, 46,  
e-mail: sidyakin\_74@mail.ru;

<sup>2</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Россия, 101000, г. Москва,  
Уланский пер., 13, стр. 2, e-mail: peterm7@inbox.ru

Статья поступила: 08.10.2025, доработана: 29.12.2025, принята к публикации: 14.01.2026

**Резюме: Актуальность работы.** Изучение механизмов переноса радона и выявление аномалий, таких как на горе Бештау (Кавказские Минеральные Воды), где зафиксированы экстремально высокие значения плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта, критически важно для оценки радиационного риска. Основной источник поступления радона в здания – грунты основания здания, особенно в зонах геологических разломов, где возможен конвективный перенос. **Цель исследования.** Целью исследования является разработка математической модели для прогнозирования плотности потока радона на основе метеорологических и других параметров, имеющих потенциальное влияние на поступление радона из горных пород в атмосферный воздух. Исследование направлено на анализ влияния температуры и влажности воздуха на ППР в выявленной радоновой аномалии на западном склоне г. Бештау. **Методы работы.** Для анализа использовались данные измерений ППР, температуры и влажности воздуха, проведенные в период с 2018 по 2020 годы. На основе этих данных методом множественной линейной регрессии был создан прототип математической модели прогнозирования радоновой активности. **Результаты работ.** Разработан прототип математической модели, позволяющий прогнозировать значения ППР по температуре и влажности воздуха с достоверностью около 71 %. Проверка модели на независимых данных показала близкое совпадение прогноза с реальным измеренным значением. Установлено, что для повышения точности прогноза необходимо учитывать дополнительные факторы, такие как атмосферное давление, влажность и температура грунта, а также сейсмическая активность. Начаты работы по интеграции этих параметров в модель. Модель была реализована также и в виде программного обеспечения.

**Ключевые слова:** радон, гора Бештау, плотность потока радона, радоновая аномалия, регрессионный анализ, моделирование.

**Благодарности:** Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-27-00028 «Исследование механизмов переноса радона в проницаемых зонах земной коры на примере курортного региона Кавказские Минеральные Воды, обладающего уникальными радиационно-экологическими характеристиками. Мониторинг, математическое моделирование, прогнозирование».

**Для цитирования:** Сидякин П.А., Барышников А.А., Першин И.М., Микляев П.С. Моделирование плотности потока радона в зависимости от температуры и влажности воздуха (на примере аномальной зоны горы Бештау). *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 57-68. DOI: 10.46698/VNC.2026.70.83.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.70.83.001

Original paper

## Modeling of radon flux density depending on air temperature and humidity (case study of the anomalous zone of Mount Beshtau)

P.A. Sidyakin<sup>1</sup>, A.A. Baryshnikov<sup>1</sup>, I.M. Pershin<sup>1</sup>, P.S. Miklyaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pyatigorsk Institute (branch) of the North Caucasus Federal University,  
46 Ermolova Str., Pyatigorsk 357500, Russian Federation,  
e-mail: sidyakin\_74@mail.ru;

<sup>2</sup> Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,  
13/2 Ulanskiy lane, Moscow 101000, Russian Federation,  
e-mail: peterm7@inbox.ru

Received: 08.10.2025, revised: 29.12.2025, accepted: 14.01.2026

**Abstract: Relevance.** Studying radon transport mechanisms and identifying anomalies, such as on Mount Beshtau (Caucasian Mineral Waters region), where extremely high radon flux density (RFD) values have been recorded, is critically important for assessing radiation risk. The primary source of radon in buildings is its entry from soil, particularly in fault zones where convective transport is most prevalent. **The aim** of the study is to develop a mathematical model for predicting radon flux density based on meteorological and other parameters that potentially influence radon emission from rocks into the atmosphere. The study aims to analyze the influence of air temperature and humidity on the flux density within the identified radon anomaly on the western slope of Mount Beshtau. **Methods.** Data from radon activity, temperature, and humidity measurements taken between 2018 and 2020 were used for the analysis. A prototype mathematical model for predicting radon activity was developed using multiple linear regression. **Results.** A prototype mathematical model was developed that can predict radon activity based on temperature and humidity with a reliability of approximately 71 %. Validation of the model using independent data showed close agreement between the forecast and actual measured values. It was determined that improving prediction accuracy requires incorporating additional factors such as atmospheric pressure, soil moisture, soil temperature, and seismic activity. Work has begun on integrating these parameters into the model. The model has also been implemented as software.

**Keywords:** radon, Mount Beshtau, radon flux density, radon anomaly, regression analysis, modeling.

**Acknowledgments:** *The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 24-27-00028 "Investigation of radon transport mechanisms in permeable zones of the Earth's crust using the example of the Caucasian Mineral Waters resort region, which has unique radiation and environmental characteristics. Monitoring, mathematical modeling, forecasting".*

**For citation:** Sidyakin P.A., Baryshnikov A.A., Pershin I.M., Miklyaev P.S. Modeling of radon flux density depending on air temperature and humidity (case study of the anomalous zone of Mount Beshtau). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 57-68. DOI: 10.46698/VNC.2026.70.83.001

### Введение

Радиоактивный газ радон-222 является дочерним продуктом распада радия-226, относящегося к ряду урана-238. По данным современных исследований более половины годовой эффективной дозы населения, обусловлено облучением радоном и его дочерними продуктами распада в зданиях. Радон считается второй после курения причиной развития рака легкого (Руководство ВОЗ по содержанию радона в по-

мещениях: с точки зрения общественного здравоохранения, 2009 г.). В последнее время появились сведения о возможном влиянии радона на когнитивные процессы у подростков [Pulliam et al., 2025]. Основным путем поступления радона в помещения зданий и сооружений – это диффузионный и/или конвективный перенос радона из грунтов (горных пород), лежащих в основании здания. В связи с этим, усилия ученых во всем мире направлены на изучение выделения радона из горных пород [Vena et al., 2024].

Перенос радона в литосфере обусловлен двумя процессами:

- диффузией, развитой на границе раздела сред с разной концентрацией радона, преимущественно на границе литосферы и атмосферы;
- конвективным (адвективным) переносом в трещиноватых проницаемых зонах за счет градиента давления.

В трещиноватых горных породах в зонах разломов конвективный механизм переноса может преобладать. В зонах конвективной разгрузки газов могут формироваться радоновые аномалии, т.е. аномально высокие значения объемной активности радона в грунтовой газе и плотности потока радона с поверхности грунта [Гулябянц, 2011; Маренный и др., 2016; Petermann et al., 2024]. В последние десятилетия разными авторами был выявлен ряд характерных очень мощных радоновых аномалий, связанных, по-видимому, с конвективной циркуляцией атмосферного воздуха в проницаемых зонах горных массивов [Di Carlo et al., 2023; Moreno et al., 2016; Neda et al., 2024; Perrier et al., 2024; Schmidt, 2014; Sundal et al., 2008]. В летний период более холодный и плотный воздух проницаемых зон горного массива, обогащенный радоном, опускается вниз и разгружается у подножия склонов, вытесняя теплый атмосферный воздух. Зимой воздух в горном массиве становится теплее атмосферного, поднимается вверх и разгружается в привершинной части склонов. В результате, у подножия склонов формируются радоновые аномалии с максимумами летом и минимумами зимой, а в привершинной части с обратным сезонным ритмом. Радоновые аномалии, могут обуславливать чрезвычайно высокие значения объемной активности радона в помещениях домов, построенных у подножия и в привершинной части склонов [Di Carlo et al., 2023; Perrier et al., 2024; Sundal et al., 2008]. Относительная распространенность подобных аномалий делает актуальным разработку математических моделей для прогноза поведения радона в подобных аномальных зонах.

По данным проведенных ранее исследований [Miklyaev et al., 2022] на западном склоне горы Бештау (регион Кавказских минеральных вод) в районе Бештаугорской кольцевой дороги была выявлена локальная радоновая аномалия, характеризующаяся крайне высокими значениями плотности потока радона, а также очень сильными сезонными колебаниями данного показателя. В период с 2018 года и по настоящее время на горе Бештау проводятся исследования выделения радона из горного массива, включающие периодические измерения плотности потока радона с поверхности грунта, а также мощности дозы гамма-излучения, удельной активности природных радионуклидов в горных породах, метеорологических параметров. Было установлено, что плотность потока радона на фоновых участках составляет от 100 до 800 мБк/(м<sup>2</sup>·с), а в зоне выявленной радоновой аномалии на локальном участке периодически 4000–25 000 мБк/(м<sup>2</sup>·с). Значения объемной активности (ОА) радона в открытом воздухе в аномальной зоне достигали 1540 Бк/м<sup>3</sup>, что в 100 раз превышает местный фон [Miklyaev et al., 2022]. По результатам радонового мониторинга, проводившегося в течение нескольких лет, в данной аномальной зоне были выявлены мощные сезонные колебания ППР с поверхности грунта. В течение летнего периода регистрировались аномально высокие значения ППР. В холодный период года, когда температура воздуха снижалась ниже +11...+14<sup>0</sup>С, плотность потока радона резко падала, и

принимала аномально низкие значения, снижаясь в некоторые моменты времени до 15–30 мБк/(м<sup>2</sup>·с), что примерно в 10–30 раз ниже фоновых значений, характерных для горы Бештау. Сезонный выброс радона в аномальной зоне обусловлен, скорее всего, явлением термоиндуцированной конвекции, описанным выше. В данной статье проведена математическая обработка результатов измерений и моделирование плотности потока радона в зоне аномалии на западном склоне горы Бештау.

#### *Геологическое строение территории*

Характерной особенностью региона Кавказских минеральных вод является группа отдельных гор, представляющих собой интрузивные субвулканические диапиры. Интрузии относятся к Эльбрусскому магматическому региону и расположены на пересечении широтного Предкавказского краевого прогиба и меридионально вытянутого Транскавказского тектонического поднятия. Наиболее крупный интрузивный массив – гора Бештау (1401 м над уровнем моря) сложена щелочными гранит-порфирами, трахитами и липаритами, которые в совокупности известны как «бештауниты», характеризующимися повышенными содержаниями урана-238 [Карпенко и др., 2009; Панов, 2023; Титов и др., 2020]. В недрах массива в системе разломов и трещин северо-западного простирания залегают урановые рудные жилы, содержащие от нескольких сотых до нескольких процентов <sup>238</sup>U [Машковцев и др., 2010]. Здесь в период с 1954 г. по 1975 г. проводилась промышленная добыча урана. Продукты выветривания бештаунитов (гравий, дресва со щебнем и более крупными обломками пород) покрывают нижние части склонов и прилегающие территории. По результатам сейсмотектонических исследований [Бондарь, Гордеев, 2022] было уточнено местоположение и современная активность основных разломов, включая три основных типа разломов и систем трещиноватости: а) меридиональную систему, включая главный разлом Бештау, б) диагональную систему северо-западного простирания, содержащую урановые руды, и в) систему кольцевых разломов, которая образовалась на границе магматического массива и вмещающих осадочных пород во время внедрения магмы и последующего общего тектонического поднятия массива, происходившего в плиоцен-четвертичный период. Большинство разломов, особенно ориентированных на северо-запад, отчетливо видны в рельефе в форме впадин и оврагов [Бондарь, Гордеев, 2022]. Выявленная мощная радоновая аномалия приурочена к узлу пересечения разлома северо-западного простирания с кольцевым разломом. Кроме того, по воспоминаниям старожилов недалеко от выявленной аномалии было расположено устье одной из штолен бывшего уранового рудника, ныне полностью ликвидированное и засыпанное (установить точное положение бывшего устья на местности не удалось). В связи с чем не исключено, что система разломов в данном месте соединяется с пространством бывшего уранового рудника.

#### Материалы и методы исследования

Измерения ППР с поверхности грунтов проводились методом открытой камеры с активированным углем с использованием оборудования из комплекта «КАМЕРА-01», измерения активности радона в угле проводились как с использованием бета-радиометра, входящего в комплект, так и на гамма-спектрометрическом комплексе «Мультирад» в геометрии ИК-63. Диапазон измеряемых значений ППР составляет от 3 до 100000 мБк/(м<sup>2</sup>·с). Значение температуры среды экспонирования накопительных камер составляет от -15 °С до +40 °С, а относительной влажности воздуха не более 95%, время экспонирования составляло 2–3 ч. Общая неопределенность результатов измерений ППР с поверхности грунта методом открытой камеры, составляет не более ±40% [Маренный и др., 2016]. В аномальной зоне в каждый сеанс измерений

устанавливалось от 3 до 5 накопительных камер, в качестве результата принималось среднее значение.

Измерения температуры и относительной влажности проводились термогигрометром ТКА-ПКМ (20). Диапазон измерений температуры воздуха составляет от  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Основная абсолютная погрешность измерений температуры составляет  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Диапазон измерений относительной влажности воздуха составляет от 5% до 98%. Основная абсолютная погрешность измерений относительной влажности составляет  $\pm 3,0\%$ . Условия эксплуатации ТКА-ПКМ (20): температура окружающего воздуха от  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность воздуха при температуре окружающего воздуха  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  до 98%, атмосферное давление от 80 кПа до 110 кПа.

Ежемесячные измерения проводились в период с 2018 г. по 2019 г. В таблице 1 представлены результаты измерений.

Таблица 1 / Table 1

**Измерения параметров на аномалии г. Бештау в период с 2018 г. по 2019 г. /  
Measurements of anomaly parameters in Beshtau from 2018 to 2019**

Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$ / Air temperature, $^{\circ}\text{C}$	ППР в аномальной зоне, Бк/( $\text{m}^2\cdot\text{c}$ ) / Radon flux density (RFD), Bq/( $\text{m}^2\cdot\text{s}$ )	Относительная влажность воздуха, % / Relative air humidity, %	Дата измерения / Date of measurement
-3,00	0,1	75,3	18.01.2018
0,20	0,2	40	15.02.2018
0,10	0,1	70	07.03.2018
3,30	0,1	75	30.03.2018
14,00	1,6	79	10.04.2018
25,00	4,4	66	22.05.2018
28,00	23,9	59	08.07.2018
22,00	11,0	55	12.09.2018
24,50	20,4	30	15.10.2018
8,00	0,1	86	07.12.2018
0,00	0,1	89	30.01.2019
3,00	0,1	92	04.03.2019
-0,20	0,1	70	25.03.2019
3,00	0,0	77	19.04.2019
18,00	4,3	55	15.05.2019
25,00	3,9	53	17.06.2019
22,00	12,6	67	29.07.2019
26,00	9,8	43	19.08.2019
28,00	14,8	43	20.09.2019
10,00	0,1	77	17.10.2019

Анализ результатов измерений показал возможную связь плотности потока радона с температурой и относительной влажностью воздуха. На рисунках 1 и 2 приведены графики колебаний ППР и влажности воздуха и ППР и температуры воздуха соответственно.

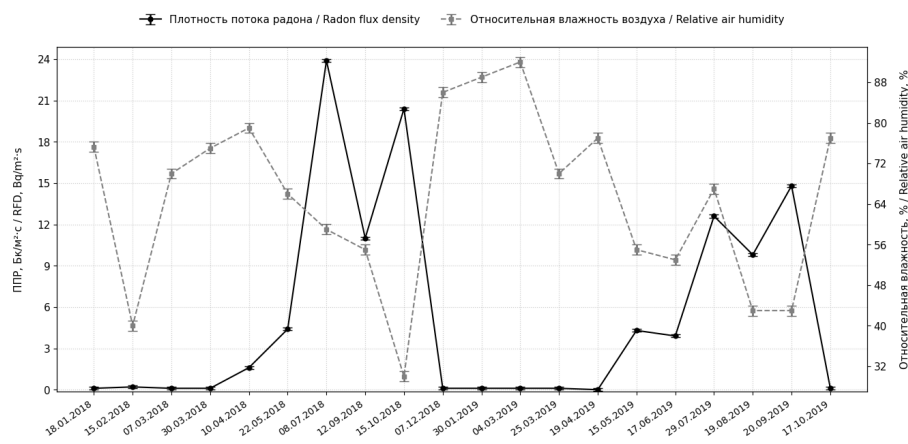


Рис. 1. График плотности потока радона и влажности воздуха на г. Бештау в период с 18.01.2018 г. по 17.10.2019 г. /

Fig. 1. Graph of radon flux density and air humidity in Beshtau from 18 January 2018 to 17 October 2019

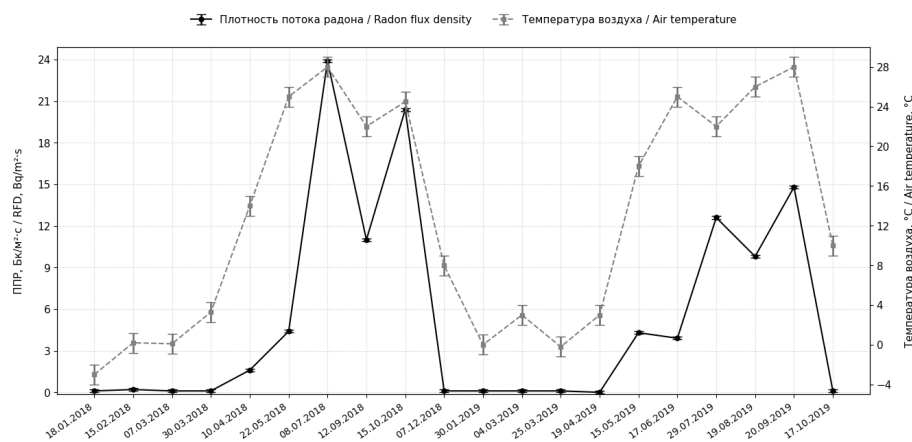


Рис. 2. График плотности потока радона и температуры воздуха на г. Бештау в период с 18.01.2018 г. по 17.10.2019 г. /

Fig. 2. Graph of radon flux density and air temperature in Beshtau from 18 January 2018 to 17 October 2019

Можно заметить, что сезонные колебания плотности потока радона имеют схожий характер с вариациями температуры воздуха, и почти зеркально отличаются от колебаний влажности воздуха. Корреляционный анализ с применением линейного коэффициента корреляции Пирсона, показал наличие значимых связей между этими параметрами, при этом ППР связан прямой зависимостью с температурой воздуха и обратной с влажностью воздуха. Коэффициенты корреляции приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Корреляционная зависимость параметров плотности потока радона с температурой воздуха и плотности потока радона с влажностью / Correlation between radon flux density and air temperature and radon flux density and humidity**

ППР/температура / Flux Density Parameter/temperature	ППР/влажность Flux Density Parameter/humidity
0.7889166	-0.723992654

Важным вопросом является возможная мультиколлинеарность температуры и влажности воздуха. Как известно, изменение температуры влияет на способность воздуха удерживать влагу, а изменение влажности может влиять на температуру воздуха посредством таких процессов, как конденсация и испарение. В целом, при неизменном атмосферном давлении и количестве влаги в атмосфере (абсолютной влажности) относительная влажность воздуха имеет обратную зависимость от температуры. В природных условиях на относительную влажность оказывают влияние и такие факторы, как атмосферное давление, изменение абсолютного содержания влаги в воздухе и точка росы. Для создания верной математической модели необходимо было исключить влияние мультиколлинеарности на стабильность модели. Были проверены экспериментальные значения параметров измерений на мультиколлинеарность. В результате проверки было обнаружено, что существует обратная корреляция между данными параметрами, что имеет физическое обоснование. Для создания математической модели это не является ограничением, но требует оценки влияния мультиколлинеарности на модель.

### Результаты исследований

Необходимость создания математической модели обусловлена возможностью прогнозировать значение плотности потока радона в зависимости от параметров окружающей среды. На данном этапе моделирования таких параметров будет два: температура воздуха и влажность воздуха.

Создание математической модели плотности потока радона было выполнено с помощью множественной линейной регрессии с применением метода наименьших квадратов [Seber, 1977]. В данной математической модели плотность потока радона является зависимой переменной, температура воздуха независимой, а влажность уточняющей переменной к температуре. В построении модели были использованы измерения, полученные в период с 2018 г. по 2019 г. (табл. 1).

В математическом решении были использованы первые пять измерений из таблицы 1, для упрощения вычислений. Итогом решения уравнения станет матрица, содержащая в себе необходимые для создания математической модели коэффициенты  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  ( $b_0$  – свободный член;  $b_1$  – коэффициент влажности воздуха;  $b_2$  – коэффициент температуры воздуха). С помощью формулы регрессионного анализа и полученных коэффициентов можно получить прогноз плотности потока радона на основе данных о температуре воздуха и влажности воздуха.

Для проверки стабильности полученной математической модели в расчеты программы был также добавлен фактор инфляции дисперсии [Belsley et al., 2005]. Данный фактор позволяет оценивать степень влияния мультиколлинеарности во множественной линейной регрессии. Формула расчета фактора инфляции дисперсии представлена на формуле 1.

$$VIF(X_j) = \frac{1}{1-R_j^2} \quad (1)$$

Для полученной математической модели данный фактор имеет значение около 1.3, что указывает на слабое влияние мультиколлинеарности на модель. Влияние мультиколлинеарности на стабильность модели происходит при значении фактора инфляции дисперсии в 5 единиц и более.

При расчетах были использованы всего пять значений измерений, что достаточно мало для создания даже прототипа математической модели. При использовании большего количества значений расчеты получаются слишком большими. В связи с этим было решено создать программное обеспечение для оценки плотности потока радона с поверхности грунта, исходя из известных параметров окружающей среды.

Программное обеспечение для оценки плотности потока радона разрабатывается на языке программирования Kotlin с применением библиотеки для математических расчетов “Apache”. Данный язык программирования был выбран не случайно, его инструментарий позволяет разработать программное обеспечение, которое будет иметь совместимость с большинством операционных систем.

Для хранения большого количества измерений была создана база данных. Она позволяет вносить данные в программу без ее редактирования и в будущем позволит передавать данные с измерительных датчиков напрямую в программу. База данных была разработана с применением PostgreSQL. Измерения вносились в базу в следующем формате: дата измерения; плотность потока радона; влажность воздуха; температура воздуха. При необходимости через базу данных можно добавить новые параметры для измерения.

При проведении регрессионного анализа в программу вносятся 15 значений измерений ППР, температуры и влажности воздуха. Используя полученные данные (в период с 2018 по 2019 гг.), были вычислены свободный член (intercept), коэффициент влажности воздуха и коэффициент температуры воздуха. По данным значениям, был проведен прогноз. Прогнозирование плотности потока радона производится с помощью внесения в программу данных о температуре воздуха и влажности воздуха.

Чтобы проверить достоверность прогнозирования была применена следующая стратегия – на вход программы подавались данные 15 значений измерений, после чего для прогнозирования также вносились влажность воздуха, и температура воздуха, при которых был необходим прогноз плотности потока радона. Важный момент в том, что данные о температуре и влажности воздуха брались из 16-го по порядку измерения, которое не участвовало при создании модели. Это позволит сравнить значение, полученное при прогнозировании плотности потока радона с реальным значением, полученным при измерении. Сравнив эти данные, можно также сделать выводы о точности описания математической моделью реального объекта.

Результаты прогнозирования позволяют сделать несколько важных выводов. Прототип математической модели получился достаточно достоверным для экспериментального исследования, около 71 % коэффициент детерминации. Результат прогнозирования получился около 10 мБк/(м<sup>2</sup>·с), в то время как реальное значение около 12 мБк/(м<sup>2</sup>·с).

При верификации модели пришлось столкнуться с несколькими проблемами. Используемые данные являются, по-видимому, наиболее типичными среди многолетних измерений, соответственно, использование других данных снижает достоверность модели. Также проблемой стало ограниченное количество параметров измерений. Для дальнейшего анализа и создания динамической модели необходимо более глубоко исследовать факторы, имеющие влияние на плотность потока радона. Дальнейшая работа будет направлена на поиск решений проблемы верификации математической модели для оценки плотности потока радона с поверхности грунта.

Важно отметить, что аналогичные сезонные радоновые аномалии, расположенные у основания склонов горных массивов в последние десятилетия были выявлены разными авторами в разных геологических и климатических условиях. Подобные аномалии связываются с конвективной циркуляцией атмосферного воздуха в пронизываемых зонах горных массивов. В этой связи очень важен опыт разработки моделей поведения радона в подобных аномальных зонах. Интенсивность конвективного переноса радона в горном массиве напрямую связана с колебаниями температуры воздуха, т.к. этот параметр определяет перепад температуры между горным массивом и окружающей средой. Влажность воздуха, может оказывать существенное влияние на конвективный перенос радона за счет конденсации влаги на аэрозолях, содержащих-

ся в воздухе, что сложным образом изменяет параметры среды, в том числе, плотность воздушной смеси.

Вместе с тем, как показали результаты моделирования, для точного прогноза недостаточно учёта только температуры и влажности воздуха. В ходе измерений были зафиксированы существенно различающиеся значения ППР при схожих значениях температуры и влажности. Это указывает на наличие других факторов, влияющих на конвективный перенос радона в горном массиве, не учтенных в модели. Такими факторами могут быть колебания содержания аэрозолей в воздушно-газовой смеси, циркулирующей в трещинах, влажности поверхностного слоя грунта, вариаций атмосферного давления, влияние неравномерного нагрева склонов горы разной экспозиции. Кроме указанных факторов, на выброс радона может влиять изменение напряженно-деформированного состояния массива пород за счет сейсмического воздействия. Примеры влияния сейсмической активности на колебания содержания радона в грунтовой воздухе в зонах разломов приведены во многих работах [Бобров, 2016; Заалишвили и др., 2022; Tallini et al., 2025]. Возможное влияние данных факторов накладывает определенные ограничения и пока что затрудняет и верификацию предложенной математической модели.

### Выводы

По результатам проведенных исследований была предложена математическая модель для прогнозирования плотности потока радона с поверхности грунта в аномальных зонах, на примере горы Бештау. В качестве независимых переменных использовались температура и влажность воздуха – параметры, которые могут оказывать влияние на плотность потока радона. Установлена тесная прямая корреляционная связь между плотностью потока радона и температурой, и обратная – между ППР и влажностью воздуха.

В результате исследования был разработан прототип математической модели для прогнозирования плотности потока радона с достоверностью около 71 %. Данная модель была реализована с помощью множественной линейной регрессии с применением метода наименьших квадратов. Параметры, использованные при построении модели, имеют корреляционную зависимость, поэтому модель было необходимо проверить на стабильность. В ходе оценки было выявлено, что мультиколлинеарность параметров не оказывает значительного влияния на математическую модель, что подтверждает стабильность модели. На основании математической модели было разработано программное обеспечение для прогнозирования плотности потока радона на основании метеорологических измерений.

### Литература

1. Бобров А.А. К вопросу о сейсмической активности и поле радона в Приольхонье (Западное Прибайкалье). // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2016. – № 3(56). – С. 76–85. DOI: 10.21285/0130-108X-2016-56-3-76-85.
2. Бондарь И.В., Гордеев Н.А. Новейшее напряженно-деформированное состояние южного борта Кандалакшского грабена. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2022. – Т. 86. № 6. – С. 870–882. DOI: 10.31857/S2587556622060036.
3. Гулябянц Л.А. Новый подход к решению проблемы защиты зданий от радона. // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3-2. – С. 3–8.
4. Заалишвили В.Б., Бирюлин С.В., Козлова И.А., Мельков Д.А., Юрков А.К. Закономерности проявления аномалий объёмной активности радона перед землетрясениями в различных сейсмоактивных регионах. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003.

5. Карпенко Е.И., Санжарова Н.И., Спиридонов С.И., Серебряков И.С. Радиоэкологическая обстановка в районе размещения бывшего уранодобывающего предприятия ЛПО «Алмаз». // *Радиация и риск*. – 2009. – Т. 18. № 4. – С. 73–81.
6. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: «Перо», 2016. – 394 с.
7. Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин Н.В., Щеточкин В.Н. Уран Российских недр. М.: ВИМС, 2010. – 850 с.
8. Панов А.В. Радиоэкологические проблемы в районе размещения Лермонтовского предприятия «Алмаз» по добыче и переработке урановой руды. Обзор. // *Радиация и риск*. – 2023. – Т. 32. № 1. – С. 131–153. DOI: 10.21870/0131-3878-2023-32-1-131-153.
9. Титов А.В., Шандала Н.К., Исаев Д.В., Семенова М.П., Серегин В.А., Бельских Ю.С., Остапчук Т.В., Чернобаев А.С. Оценка радиационной опасности пребывания населения и ведения хозяйственной деятельности в районе расположения выработанного уранового месторождения. // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. – 2020. – Т. 65. № 2. – С. 11–16.
10. Belsley D.A., Kuh E., Welsch R.E. Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of collinearity. New York: John Wiley & Sons, 2005. – 320 p.
11. Bena E., Ciotoli G., Petermann E., Bossew P., Ruggiero L., Verdi L., Huber P., Mori F., Mazzoli C., Sassi R. A new perspective in radon risk assessment: Mapping the geological hazard as a first step to define the collective radon risk exposure. // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 912. – Art. No. 169569. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169569.
12. Di Carlo C., Ampollini M., Antignani S., Caprio M., Carpentieri C., Caccia B., Bochicchio F. Extreme reverse seasonal variations of indoor radon concentration and possible implications on some measurement protocols and remedial strategies. // *Environmental Pollution*. – 2023. – Vol. 327. – Art. No. 121480. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121480.
13. Miklyaev P.S., Petrova T.B., Shchitov D.V., Sidiyakin P.A., Murzabekov M.A., Tsebro D.N., Marennyy A.M., Nefedov N.A., Gavriliev S.G. Radon transport in permeable geological environments. // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 852. – Art. No. 158382. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158382.
14. Moreno V., Bach J., Font L., Baixeras C., Zarroca M., Linares R., Roque C. Soil radon dynamics in the Amer fault zone: an example of very high seasonal variations. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2016. – Vol. 151. Pt. 1. – pp. 293–303. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.10.018.
15. Neda T., Dosa A. Seasonal variations of radon activity concentration in mofettes from Harghita and Covasna Counties, Romania. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2024. – Vol. 273. – Art. No. 107389. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107389.
16. Perrier F., Bourges F., Girault F., Lartiges B., Bonnet S., Genty D., Denele Y., Regard V., Regnier E., Bouquerel H., Lei Bo, Rivet Th., Losno R. Radon-222 signatures of atmospheric dynamics in the Pech Merle Painted Cave, France: Consequences for management and conservation. // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 949. – Art. No. 174648. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174648.
17. Petermann E., Bossew P., Kemski J., Gruber V., Suhr N., Hoffmann B. Development of a high-resolution indoor radon map using a new machine learning- based probabilistic model and German radon survey data. // *Environmental Health Perspectives*. – 2024. – Vol. 132. Issue 9. – Art. No. 97009. DOI: 10.1289/EHP14171.
18. Pulliam H.R., Embury C.M., Rempe M.P., Okelberry H.J., Rice D.L., Coutant A.T., Glesinger R., Wilson T.W., Taylor B.K. Chronic radon exposure is associated with developmental alterations to neural and behavioral indices of cognitive control. // *NeuroImage*. – 2025. – Vol. 321. – Art. No. 121524. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2025.121524.
19. Schmidt P. Proof of the radiological remediation success at former uranium mining and milling sites (WISMUT sites) in Germany. In: 4th Europ. IRPA Congr. Geneve, Switzerland. June 23–27, 2014.
20. Seber G.A.F. Linear regression analysis. New York: Wiley and Sons, 1977. – 465 p.
21. Sundal A.V., Valen V., Soldal O., Strand T. The influence of meteorological parameters on soil radon levels in permeable glacial sediments. // *Science of The Total Environment*. – 2008. – Vol. 389. Issues 2–3. – pp. 418–428. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.09.001.
22. Tallini M., Guerriero V., Nyberg A.A., Wyss R. et al. Selection of hydrosensitive to seismicity sites for radon monitoring in the Abruzzo aquifers (central Italy) within the European

ArtEmis project. // Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C. – 2025. – Vol. 141. Pt. 2. – Art. No. 104127. DOI: 10.1016/j.pce.2025.104127.

## References

1. Bobrov A.A. To seismic activity and radon field in Priolkhonie (Western Baikal region). Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits. 2016. No. 3(56). pp. 76–85. DOI: 10.21285/0130-108X2016-56-3-76-85. (In Russ.)
2. Bondar I.V., Gordeev N.A. The Neotectonic Stress–Strain State of the Southern Side of the Kandalaksha Graben. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2022. Vol. 86. No. 6. pp. 870–882. DOI: 10.31857/S2587556622060036. (In Russ.)
3. Gulabyants L.A. A new approach to solving the problem of protecting buildings from radon. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 3-2. pp. 3–8. (In Russ.)
4. Zaalishvili V.B., Biryulin S.V., Kozlova I.A., Melkov D.A., Yurkov A.K. Anomalies of radon volumetric activity before earthquakes in various seismically active regions. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003. (In Russ.)
5. Karpenko E.I., Sanzharova N.I., Spiridonov S.I., Serebryakov I.S. Radioecological situation in the area of the former “Almaz” uranium mining enterprise. *Radiation and Risk*. 2009. Vol. 18. No. 4. pp. 73–81. (In Russ.)
6. Marenny A.M., Tsapalov A.A., Miklyaev P.S., Petrova T.B. Patterns of formation of the radon field in the geological environment. Moscow. Pero. 2016. 394 p. (In Russ.)
7. Mashkovtsev G.A., Konstantinov A.K., Miguta A.K., Shumilin N.V., Shchetochkin V.N. Uranium of the Russian subsoil. Moscow. VIMS. 2010. 850 p. (In Russ.)
8. Panov A.V. Radioecological problems in the site of the former Lermontov Production Association “Almaz” for mining and processing of uranium ore. Review. *Radiation and Risk*. 2023. Vol. 32. No. 1. pp. 131–153. DOI: 10.21870/0131-3878-2023-32-1-131-153. (In Russ.)
9. Titov A.V., Shandala N.K., Isaev D.V., Semenova M.P., Seregin V.A., Belskikh Yu.S., Ostapchuk T.V., Chernobaev A.S. Assessment of the Public Radiation Protection and Economic Activity Safety in the Area of the Developed Uranium Deposit. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2020. Vol. 65. No. 2. pp. 11–6. (In Russ.)
10. Belsley D.A., Kuh E., Welsch R.E. Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of collinearity. New York. John Wiley & Sons. 2005. 320 p.
11. Bena E., Ciotoli G., Petermann E., Bossew P., Ruggiero L., Verdi L., Huber P., Mori F., Mazzoli C., Sassi R. A new perspective in radon risk assessment: Mapping the geological hazard as a first step to define the collective radon risk exposure. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 912. Art. No. 169569. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169569.
12. Di Carlo C., Ampollini M., Antignani S., Caprio M., Carpentieri C., Caccia B., Bochicchio F. Extreme reverse seasonal variations of indoor radon concentration and possible implications on some measurement protocols and remedial strategies. *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 327. Art. No. 121480. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121480.
13. Miklyaev P.S., Petrova T.B., Shchitov D.V., Sidyakin P.A., Murzabekov M.A., Tsebro D.N., Marennyy A.M., Nefedov N.A., Gavriliev S.G. Radon transport in permeable geological environments. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 852. Art. No. 158382. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158382.
14. Moreno V., Bach J., Font L., Baixeras C., Zarroca M., Linares R., Roque C. Soil radon dynamics in the Amer fault zone: an example of very high seasonal variations. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. Vol. 151. Pt. 1. pp. 293–303. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.10.018.
15. Neda T., Dosa A. Seasonal variations of radon activity concentration in mofettes from Harghita and Covasna Counties, Romania. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2024. Vol. 273. Art. No. 107389. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107389.
16. Perrier F., Bourges F., Girault F., Lartiges B., Bonnet S., Genty D., Denele Y., Regard V., Regnier E., Bouquerel H., Lei Bo, Rivet Th., Losno R. Radon-222 signatures of atmospheric dynamics in the Pech Merle Painted Cave, France: Consequences for management and conservation. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 949. Art. No. 174648. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174648.
17. Petermann E., Bossew P., Kemski J., Gruber V., Suhr N., Hoffmann B. Development of a high-resolution indoor radon map using a new machine learning- based probabilistic model

and German radon survey data. *Environmental Health Perspectives*. 2024. Vol. 132. Issue 9. Art. No. 97009. DOI: 10.1289/EHP14171.

18. Pulliam H.R., Embury C.M., Rempe M.P., Okelberry H.J., Rice D.L., Coutant A.T., Glesinger R., Wilson T.W., Taylor B.K. Chronic radon exposure is associated with developmental alterations to neural and behavioral indices of cognitive control. *NeuroImage*. 2025. Vol. 321. Art. No. 121524. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2025.121524.

19. Schmidt P. Proof of the radiological remediation success at former uranium mining and milling sites (WISMUT sites) in Germany. In: 4th Europ. IRPA Congr. Geneve, Switzerland. June 23–27. 2014.

20. Seber G.A.F. *Linear regression analysis*. New York. Wiley and Sons. 1977. 465 p.

21. Sundal A.V., Valen V., Soldal O., Strand T. The influence of meteorological parameters on soil radon levels in permeable glacial sediments. *Science of The Total Environment*. 2008. Vol. 389. Issues 2–3. pp. 418–428. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.09.001.

22. Tallini M., Guerriero V., Nyberg A.A., Wyss R. et al. Selection of hydrosensitive to seismicity sites for radon monitoring in the Abruzzo aquifers (central Italy) within the European ArtEmis project. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C*. 2025. Vol. 141. Pt. 2. Art. No. 104127. DOI: 10.1016/j.pce.2025.104127.