

ГЕОЭКОЛОГИЯ/GEOECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.31> EDN: YBXPYI

ЗАВИСИМОСТЬ ЭКСХАЛЯЦИИ РАДОНА И ТОРОНА ОТ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ ПОЧВЕННОГО МОНИТОРИНГА

Научная статья

Апкин Р.Н.^{1,*}¹ Казанский государственный энергетический университет, Казань, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (renat.apkin[at]gmail.com)

Предложена: 06.05.2026; Принята: 04.06.2026; Опубликовано: 17.07.2026

Аннотация

В работе представлены результаты мониторинга объемной активности радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Rn) в почве на глубине 0,5 м в корреляции с изменениями метеорологических условий (температура, влажность, атмосферное давление). Установлено, что радон проявляет выраженную суточную динамику с относительной амплитудой колебаний 41,2%, обусловленную температурным градиентом между почвой и атмосферой. Выявлена отрицательная корреляционная связь ($r = -0,26$) между концентрацией радона и температурой воздуха, что свидетельствует об интенсификации эксхалации газа в дневные часы. В отличие от радона, торон характеризуется высокой нестабильностью (амплитуда 114,5%) и отсутствием значимых корреляционных связей с макрометеопараметрами ($R^2 < 1\%$), что объясняется его коротким периодом полураспада и зависимостью от локальных микроусловий диффузии. Атмосферное давление и влажность почвы в исследованный период оказали минимальное влияние. Полученные данные могут быть использованы для краткосрочного прогнозирования радиационного состояния приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова: радон, торон, почвенный воздух, эксхалация, корреляционный анализ, температурный градиент, множественная регрессия.

THE DEPENDENCE OF RADON AND THORON EXHALATION ON METEOROLOGICAL PARAMETERS BASED ON SOIL MONITORING DATA

Research article

Apkin R.N.^{1,*}¹ Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

* Corresponding author (renat.apkin[at]gmail.com)

Suggested: 06.05.2026; Accepted: 04.06.2026; Published: 17.07.2026

Abstract

The work presents the results of monitoring the volume activity of radon (^{222}Rn) and thoron (^{220}Rn) in soil at a depth of 0.5 m, in correlation with changes in meteorological conditions (temperature, humidity, atmospheric pressure). It has been established that radon exhibits pronounced diurnal dynamics with a relative amplitude of 41.2%, caused by the temperature gradient between the soil and the atmosphere. A negative correlation ($r = -0.26$) was identified between radon concentration and air temperature, indicating an intensification of gas exhalation during daylight hours. In contrast to radon, thoron is characterised by high instability (amplitude of 114.5%) and the absence of significant correlations with macrometeorological parameters ($R^2 < 1\%$), which is explained by its short half-life and dependence on local micro-diffusion conditions. Atmospheric pressure and soil moisture had a minimal influence during the studied period. The obtained data can be used for short-term forecasting of the radiation conditions in the surface layer of the atmosphere.

Keywords: radon, thoron, soil air, exhalation, correlation analysis, temperature gradient, multiple regression.

Введение

Радон (^{222}Rn) и торон (^{220}Rn) являются радиоактивными инертными газами, образующимися в почве при распаде урана и тория. Изучение их эманирования (эксхалации) важно для радиационного мониторинга, геодинимических исследований и оценки рисков для здоровья [1], [2]. Концентрация этих газов в почвенном воздухе подвержена суточным и сезонным колебаниям, определяемым метеорологическими факторами: температурой, давлением, влажностью.

Атмосферное давление – самый значимый фактор. Это главный «насос», управляющий потоком радона.

- Падение давления (Циклон): когда атмосферное давление резко падает, грунтовый воздух, содержащий радон, как бы «высасывается» из почвы. Создается эффект поршня. Это приводит к резкому росту концентрации радона в приземном слое воздуха и в подвалах зданий.

- Рост давления (Антициклон): высокое давление давит на поверхность почвы, запирая газ в глубине. Эксхалация снижается до минимума.

Температура воздуха и перепады (тяга).

- Холодный воздух (зима): в отапливаемых зданиях возникает мощная тяга (эффект дымохода). Теплый воздух поднимается вверх, создавая разрежение в нижней части здания (фундаменте). Это разрежение засасывает радон из грунта. Поэтому концентрация радона в доме зимой часто выше, чем летом, несмотря на промерзание грунта.

- Температурные инверсии: в безветренные холодные ночи слой холодного воздуха у земли, как крышкой, накрывает теплый воздух. Радон, выходящий из почвы, скапливается в этом приземном слое, не рассеиваясь, что приводит к локальным максимумам концентрации [3], [4], [5].

Осадки и влажность почвы (эффект водяного замка).

- Дождь (запирание): вода заполняет поры в верхнем слое почвы. Растворимость радона в воде низкая, но вода создает водонепроницаемый экран («капиллярный замок»). Пока грунт мокрый сверху, радон не может выйти наружу — происходит накопление газа под слоем воды.

- Просыхание (прорыв): как только верхний слой подсыхает, весь накопленный за период дождя радон вырывается наружу (часто наблюдается вечером после дождливого дня).

- Промерзание (Ледяная корка): мерзлая почва и снег действуют как изолятор, почти полностью блокируя эксхалляцию.

Ветер.

- Обдув здания: ветер, ударяя в стену дома, создает область повышенного давления с наветренной стороны и пониженного (разрежение) с подветренной и на крыше. Это разрежение усиливает отсос радона из подполья и подвала (аэродинамическая тяга).

- Вентиляция грунта: сильный ветер над поверхностью почвы создает турбулентность, которая ускоряет диффузию радона из верхних слоев почвы (увеличивает конвективный массоперенос) [6], [7], [8], [9].

Цель данной работы — на основе экспериментальных данных выявить характер и тесноту связей между концентрацией радона и торона и ключевыми метеопараметрами, оценить стабильность изотопов и построить прогнозные регрессионные модели для данного случая.

Методы и принципы исследования

Летом (15-16 августа) 2023 года были проведены измерения объемной активности радона в почвенном воздухе на территории с. Кояново Пермского края. Объемная активность радона в почвенном воздухе измерялась на глубине 0.5 м. Измерения проводились с помощью прибора производства фирмы SARAD GmbH (Германия) RTM 1688-2 Geo Station [10], который представляет собой стационарную систему для измерения концентрации радона в почвенном воздухе.

Работа этого прибора основана на полупроводниковом методе измерения в сочетании с электростатическим осаждением продуктов распада радона на детектор. Кроме концентрации радона, прибор измеряет концентрацию торона, атмосферное давление, температуру и влажность измеряемой среды. Благодаря высокой чувствительности и альфа спектроскопическому анализу, время реакции прибора близко к физическому пределу, даже в случае низких концентраций радона. Работа прибора обеспечивается специальной компьютерной программой Radon Vision Software, которая позволяет обрабатывать полученные данные.

Для измерения почвенного газа (вместо внутренней измерительной камеры как у большинства приборов подобного типа) используется подключаемый отдельный зонд с измерительной камерой. Корпус зонда выполнен из высококачественной стали, диаметр его составляет 80 мм. Наряду с измерительной камерой радона, в устройство интегрированы сенсоры температуры и влажности. Малое время отклика, при резком изменении концентрации газа, достигается наличием большой силиконо-диффузионной мембраны. Зонд подключается через кабель длиной до 10 метров к аналоговому датчику радона. Этот датчик рассчитывает текущую концентрацию радона и вырабатывает на выходе аналоговый сигнал. При измерении радона (торона) зонд зарывается в грунт на выбранную глубину.

Измерения проводились автоматически в течение суток (с 20:30 до 19:00 следующего дня) с шагом 30 минут, всего получено 46 замеров следующих параметров:

- Концентрация радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Rn), Бк/м³;
- Температура и влажность почвенного воздуха на глубине 0,5 м;
- Температура, влажность и атмосферное давление приземного воздуха;
- Расчётные разности температур и влажностей между средой и почвой [11].

Данные измерений, а также данные разности температуры и влажности между параметрами почвенного воздуха и атмосферного воздуха представлены в таблице 1. Метеопараметры атмосферного воздуха были взяты из архива метеостанции Пермь/Большое Савино (аэропорт).

Таблица 1 - Результаты измерений в почвенном воздухе радона, торона и метеорологических параметров

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.31.1>

Время часы:минуты	Радон Бк/м ³	Торон Бк/м ³	Температура на глубине почвы 0,5 м, °С	Влажность почвенного воздуха на глубине 0,5 м, %	Атмосферное давление, мм рт. ст.	Температура атмосферного воздуха, °С	Влажность атмосферного воздуха, %	Разница температур между атмосферным и почвенным воздухом, °С	Разница влажности между атмосферным и почвенным воздухом, %
20:30	12653,7	531	16	93,7	748	25	54	9	-39,7
21:00	11315	991,3	15,7	94	748	23	61	7,3	-33
21:30	15431,7	915	15,5	95	748	22	65	6,5	-30
22:00	13419,7	442,7	15,5	95	748	22	57	6,5	-38

Время часы:минуты	Радон Бк/м ³	Торон Бк/м ³	Температура на глубине почвы 0,5 м, °С	Влажность почвенного воздуха на глубине 0,5 м, %	Атмосферное давление, мм рт. ст.	Температура атмосферного воздуха, °С	Влажность атмосферного воздуха, %	Разница температур между атмосферным и почвенным воздухом, °С	Разница влажности между атмосферным и почвенным воздухом, %
22:30	16158,3	975	15,5	95	748	19	73	3,5	-22
23:00	16617	496,7	15,5	95	748	19	68	3,5	-27
23:30	14271,3	823	15,5	95,3	748	19	68	3,5	-27,3
0:00	17227,7	628,3	15,5	96	748	17	73	1,5	-23
0:30	14428,7	576,7	15,2	96	748	18	73	2,8	-23

Время часы:минуты	Радон Бк/м ³	Торон Бк/м ³	Температура на глубине почвы 0,5 м, °С	Влажность почвенного воздуха на глубине 0,5 м, %	Атмосферное давление, мм рт. ст.	Температура атмосферного воздуха, °С	Влажность атмосферного воздуха, %	Разница температур между атмосферным и почвенным воздухом, °С	Разница влажности между атмосферным и почвенным воздухом, %
1:00	14769	655,3	15	96	748	17	73	2	-23
1:30	13611,7	815,3	15	96	748	17	73	2	-23
2:00	15860,7	488	15	96	748,3	17	73	2	-23
2:30	14904,7	744,3	15	96	748	15	82	0	-14
3:00	14542	695	15	96	748	16	77	1	-19

Время часы:минуты	Радон Бк/м ³	Торон Бк/м ³	Температура на глубине почвы 0,5 м, °С	Влажность почвенного воздуха на глубине 0,5 м, %	Атмосферное давление, мм рт. ст.	Температура атмосферного воздуха, °С	Влажность атмосферного воздуха, %	Разница температур между атмосферным и почвенным воздухом, °С	Разница влажности между атмосферным и почвенным воздухом, %
3:30	15377	1269	15	96	748	15	77	0	-19
4:00	15997,7	864,7	15	96	748,3	15	82	0	-14
4:30	15114,7	730,7	15	96	749	15	77	0	-19
5:00	16327,7	949,3	15	96	749	14	82	-1	-14
5:30	12781,3	696,3	15	96	749	14	82	-1	-14

Время часы:минуты	Радон Бк/м ³	Торон Бк/м ³	Температура на глубине почвы 0,5 м, °С	Влажность почвенного воздуха на глубине 0,5 м, %	Атмосферное давление, мм рт. ст.	Температура атмосферного воздуха, °С	Влажность атмосферного воздуха, %	Разница температур между атмосферным и почвенным воздухом, °С	Разница влажности между атмосферным и почвенным воздухом, %
6:00	13322,7	685,7	15	96	749	14	82	-1	-14
6:30	15990,7	815,3	15	96,7	749	15	82	0	-14,7
7:00	14802,3	604	15	97	749	16	83	1	-14
7:30	13310	960,7	15	97	749	18	73	3	-24
8:00	14082	1174	15	97	749	19	68	4	-29

Время часы:минуты	Радон Бк/м ³	Торон Бк/м ³	Температура на глубине почвы 0,5 м, °С	Влажность почвенного воздуха на глубине 0,5 м, %	Атмосферное давление, мм рт. ст.	Температура атмосферного воздуха, °С	Влажность атмосферного воздуха, %	Разница температур между атмосферным и почвенным воздухом, °С	Разница влажности между атмосферным и почвенным воздухом, %
8:30	13604,7	637,3	15	97	749	21	64	6	-33
9:00	14388,7	1095,7	15	97	749	22	65	7	-32
9:30	14350,3	605,3	15	97	749	24	57	9	-40
10:00	14467	632	15	97	749	25	57	10	-40
10:30	14049	671	15	97	749	26	51	11	-46

Время часы:минуты	Радон Бк/м ³	Торон Бк/м ³	Температура на глубине почвы 0,5 м, °С	Влажность почвенного воздуха на глубине 0,5 м, %	Атмосферное давление, мм рт. ст.	Температура атмосферного воздуха, °С	Влажность атмосферного воздуха, %	Разница температур между атмосферным и почвенным воздухом, °С	Разница влажности между атмосферным и почвенным воздухом, %
11:00	11419,3	766,3	15	97	749	27	51	12	-46
11:30	13928	652,7	15	97	749	29	40	14	-57
12:00	14041,7	792,3	15	97	749	30	38	15	-59
12:30	15103	924,3	15	97	749	30	33	15	-64
13:00	13350,3	1295,3	15	97	749	31	31	16	-66

Время часы:минуты	Радон Бк/м ³	Торон Бк/м ³	Температура на глубине почвы 0,5 м, °С	Влажность почвенного воздуха на глубине 0,5 м, %	Атмосферное давление, мм рт. ст.	Температура атмосферного воздуха, °С	Влажность атмосферного воздуха, %	Разница температур между атмосферным и почвенным воздухом, °С	Разница влажности между атмосферным и почвенным воздухом, %
13:30	13677,7	751,3	15	97	749	30	35	15	-62
14:00	13824,3	1114,3	15	97	749	31	29	16	-68
14:30	13581	736	15	97	749	32	27	17	-70
15:00	13419,3	465,3	15	97	749	31	29	16	-68
15:30	15250,3	670,7	15	98	749	32	27	17	-71

Время часы:минуты	Радон Бк/м ³	Торон Бк/м ³	Температура на глубине почвы 0,5 м, °С	Влажность почвенного воздуха на глубине 0,5 м, %	Атмосферное давление, мм рт. ст.	Температура атмосферного воздуха, °С	Влажность атмосферного воздуха, %	Разница температур между атмосферным и почвенным воздухом, °С	Разница влажности между атмосферным и почвенным воздухом, %
16:00	14362	622,7	15	98	749	31	29	16	-69
16:30	12493,3	618,3	15	98	749	31	29	16	-69
17:00	13706,7	1341,7	15	98	748,3	32	27	17	-71
17:30	14444	806,3	15	98	749	32	29	17	-69
18:00	13479,7	553,3	15	98	748,3	31	31	16	-67

Время часы:минуты	Радон Бк/м ³	Торон Бк/м ³	Температура на глубине почвы 0,5 м, °C	Влажность почвенного воздуха на глубине 0,5 м, %	Атмосферное давление, мм рт. ст.	Температура атмосферного воздуха, °C	Влажность атмосферного воздуха, %	Разница температур между атмосферным и почвенным воздухом, °C	Разница влажности между атмосферным и почвенным воздухом, %
18:30	12399,3	883	15	98	748,3	31	31	16	-67
19:00	15643,7	626,3	15	98	748,3	30	33	15	-65

Статистическая обработка полученных данных включает:

1. Расчёт коэффициентов корреляции Пирсона (r);
2. Построение уравнений линейной и множественной регрессии;
3. Вычисление коэффициента детерминации (R^2);
4. Расчёт абсолютной ($A = C_{\max} - C_{\min}$) и относительной ($A_{\text{rel}} = A/C_{\text{mean}} \times 100\%$) амплитуд;
5. Проверку статистической значимости корреляций при $n = 46$ ($r_{\text{крит}} \approx 0,29$, $\alpha = 0,05$).

Основные результаты

3.1. Анализ временной динамики

Наибольшие концентрации радона наблюдались в ночные и утренние часы (22:30–05:00) при минимальной температуре воздуха (14–17°C). С прогревом воздуха до 30–32°C после 12:00 концентрация радона устойчиво снижалась (рис. 1). Торон демонстрировал хаотичные кратковременные всплески (например, в 3:30, 13:00, 17:00) без чёткой привязки к суточному ходу температуры.

Периоды наиболее интенсивной эксхалляции (выхода газа из почвы):

- Утренний пик (07:30 – 11:30): концентрация радона упала с 14 802 до 11 419 Бк/м³ при росте температуры воздуха на 11°C и падении влажности — эффект «теплового насоса».
- Вечерний выброс (18:00 – 18:30): падение радона с 13 479 до 12 399 Бк/м³ на фоне максимально прогретой почвы и начинающегося охлаждения атмосферы.

3.2. Корреляционный анализ

Для радона (^{222}Rn):

- С температурой воздуха: слабая отрицательная связь ($r = -0,26$) — при потеплении концентрация в почве снижается (усиление конвекции).
- С атмосферным давлением: связь практически отсутствует ($r = 0,08$).
- С влажностью воздуха: слабая положительная связь ($r = 0,22$).
- С влажностью почвы: слабая отрицательная ($r = -0,16$) – заполнение пор водой вытесняет газ или блокирует накопление.

Для торона (^{220}Rn):

- Все коэффициенты корреляции с метеопараметрами не превышают $|r| > 0,15$, что статистически незначимо ($r < r_{\text{крит}}$).
- Поведение торона определяется локальной генерацией в радиусе нескольких сантиметров от датчика из-за периода полураспада 55,6 с.

3.3. Регрессионные модели и коэффициент детерминации

Модель для радона:

$$Rn = 189507,5 - 279,0 \times T_{\text{атм}} - 67,8 \times H_{\text{атм}} - 220,3 \times P_{\text{атм}}$$

$R^2 = 0,1837$ — метеопараметры объясняют около 18,4% вариаций радона. Каждый градус потепления воздуха снижает концентрацию радона примерно на 279 Бк/м³. Рост давления на 1 мм рт. ст. снижает концентрацию на 220 Бк/м³ («прижимающий» эффект).

Модель для торона:

$$Tn = -18399,2 - 1,2 \times T_{\text{атм}} - 0,5 \times H_{\text{атм}} - 25,7 \times P_{\text{атм}}$$

$R^2 = 0,0037$ — связь практически отсутствует (<0,4%), прогнозирование невозможно.

Обсуждение

Таблица 2 - Амплитуда колебаний и стабильность

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.31.2>

Газ	C_{mean} Бк/м ³	$C_{\min}$ Бк/м ³	$C_{\max}$ Бк/м ³	Абсолютная амплитуда A	Относительная амплитуда A_{rel} , %
Радон	14353,4	11315,0	17227,7	5912,7	41,2
Торон	785,4	442,7	1341,7	899,0	114,5

Относительная амплитуда торона почти в три раза выше, что указывает на его крайне низкую стабильность и подтверждает различную природу транспорта изотопов.

Проверка статистической значимости

При $n = 46$ критическое значение коэффициента Пирсона $r_{\text{крит}} \approx 0,29$ ($\alpha = 0,05$).



- Для радона $|r_{\text{тем}}| 0,29 > 0,26 = |$ — корреляция с температурой находится на грани значимости, требуется большая выборка для подтверждения.
- Для торона все $|r| 0,15 > |$ — связи статистически незначимы, колебания носят случайный характер относительно метеороусловий.

Заключение

В процессе исследования получены следующие результаты.

1. Зависимость от метеофакторов: динамика концентрации почвенного радона в основном обусловлена суточным ходом температуры воздуха ($r = 0,26$). Отрицательная связь указывает на интенсификацию эксхалляции в дневные часы за счёт тепловой конвекции.
2. Стабильность изотопов: относительная амплитуда торона (114,5%) втрое превосходит амплитуду радона (41,2%). Торон не зависит от крупномасштабных атмосферных процессов и контролируется микроусловиями в точке измерения.
3. Влияние давления и влажности: атмосферное давление и влажность почвы в исследованный период дают минимальный вклад. Совокупность метеопараметров объясняет лишь 18,4% дисперсии радона ($R^2 = 0,1837$), что указывает на превалирующую роль геологических факторов (эманулирующая способность пород, микротрещиноватость).
4. Прогностическая ценность: полученное уравнение множественной регрессии для радона не является всеобщим и универсальным. Однако, по мнению автора, может применяться для краткосрочного прогноза почвенного радона в аналогичных условиях. Для торона построение прогноза на основе метеоданных невозможно.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Уткин В.И. Газовое дыхание Земли / В.И. Уткин // Соросовский Образовательный Журнал. — 1997. — № 1. — С.57–64.
2. Крисюк Э.М. Последствия воздействия на организм радона и продуктов его распада / Э.М. Крисюк // АНРИ. — 1996/97. — № 3 (9). — С. 16–24.
3. Яковлев Г.А. Влияния различных факторов на сезонные и суточные вариации радона в атмосфере / Г.А. Яковлев // Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития: сборник научных трудов международной научной конференции, г. Томск, 12–16 ноября 2018 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2018. — С. 288–289.
4. Андреев А.И. Вариации почвенного радона и плотности потока радона с поверхности почвы экспериментального полигона / А.И. Андреев, И.М. Тесленко, М.Б. Цыцарев // Вестник ТОГУ. — 2014. — № 3 (34) — С. 113–122.
5. Шулейкин В.Н. Радон почвенного и атмосферного воздуха и дегазация земли / В.Н. Шулейкин // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика — 2010. — Вып. 1 (1). — URL: <https://oilgasjournal.ru/2009-1/1-rubric/shuleikin.html> (дата обращения: 06.05.2026).
6. Шулейкин В.Н. Водород, метан, радон и молниевые разряды облако-земля / В.Н. Шулейкин // Актуальные проблемы нефти и газа. — 2018. — Вып. 3 (22). — URL: <http://oilgasjournal.ru> (дата обращения: 06.05.2026).
7. Рыжакова Н.К. Пространственная и временная изменчивость объемной активности радона в почвенном воздухе / Н.К. Рыжакова, В.С. Яковлева, Т.М. Кустышева // Росс. геофизический журнал. — 2004. — Вып. 33–34. — С. 110–113.
8. Токарева А.Ю. Сравнительная характеристика радоноопасности территорий некоторых геоморфологических структур Западно-Сибирской низменности / А.Ю. Токарева, Г.С. Алимова // Успехи современного естествознания. — 2019. — № 12. — С. 347–352.
9. Яковлева В.С. Моделирование влияния состояния и изменчивости атмосферы и литосферы на плотность потоков радона и торона с поверхности земли / В.С. Яковлева // Известия Томского политехнического университета. — 2010. — Т. 317. — № 2. — С. 162–166.
10. SARAD GmbH. — URL: <https://www.sarad.de/index.php> (accessed: 06.05.2026).
11. Удоратин В.В. Методика измерений объемной активности радона для платформенных областей / В.В. Удоратин, Ю.Е. Езимова, А.Ш. Магомедова // Физика Земли. — 2020. — № 4. — С. 132–143.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Utkin V.I. Gazovoe dikhaniye Zemli [The Earth's Gas Breathing] / V.I. Utkin // Sorosovskii Obrazovatel'nyi Zhurnal [Soros Educational Journal]. — 1997. — № 1. — P.57–64. [in Russian]



2. Krisyuk E.M. Posledstviya vozdeistviya na organizm radona i produktov yego raspada [The effects of radon and its decay products on the body] / E.M. Krisyuk // ANRI. — 1996/97. — № 3 (9). — P. 16–24. [in Russian]
3. Yakovlev G.A. Vliyaniya razlichnikh faktorov na sezonnie i sutochnie variatsii radona v atmosfere [The Influence of Various Factors on Seasonal and Diurnal Variations in Atmospheric Radon] / G.A. Yakovlev // Energo-resursoeffektivnost v interesakh ustoychivogo razvitiya: sbornik nauchnikh trudov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, g. Tomsk, 12–16 noyabrya 2018 g. [Energy and Resource Efficiency for Sustainable Development: Proceedings of the International Scientific Conference, Tomsk, 12–16 November 2018] — Tomsk: Publishing House of TPU, 2018. — P. 288–289. [in Russian]
4. Andreev A.I. Variatsii pochvennogo radona i plotnosti potoka radona s poverkhnosti pochvi eksperimentalnogo poligona [Variations in soil radon and radon flux density at the soil surface of an experimental site] / A.I. Andreev, I.M. Teslenko, M.B. Tsitsarev // Vestnik TOGU [Bulletin of TSU]. — 2014. — № 3 (34) — P. 113–122. [in Russian]
5. Shuleikin V.N. Radon pochvennogo i atmosfernogo vozdukha i degazatsiya zemli [Radon in Soil and Atmospheric Air and Soil Degassing] / V.N. Shuleikin // Georesursi, geoenergetika, geopolitika [Georesources, Geoenergy, Geopolitics] — 2010. — Iss. 1 (1). — URL: <https://oilgasjournal.ru/2009-1/1-rubric/shuleikin.html> (accessed: 06.05.2026). [in Russian]
6. Shuleikin V.N. Vodorod, metan, radon i molnievie razryadi oblako-zemlya [Hydrogen, methane, radon and cloud-to-ground lightning discharges] / V.N. Shuleikin // Aktualnie problemi nefti i gaza [Current Issues in Oil and Gas]. — 2018. — Iss. 3 (22). — URL: <http://oilgasjournal.ru> (accessed: 06.05.2026). [in Russian]
7. Rizhakova N.K. Prostranstvennaya i vremennaya izmenchivost obemnoi aktivnosti radona v pochvennom vozdukh [Spatial and Temporal Variability of Radon Volume Activity in Soil Air] / N.K. Rizhakova, V.S. Yakovleva, T.M. Kustisheva // Ross. geofizicheskii zhurnal [Russian Geophysical Journal]. — 2004. — Iss. 33–34. — P. 110–113. [in Russian]
8. Tokareva A.Yu. Sravnitel'naya kharakteristika radonopasnosti territorii nekotorykh geomorfologicheskikh struktur Zapadno-Sibirskoi nizmennosti [A Comparative Analysis of Radon Hazards in Areas of Certain Geomorphological Structures of the West Siberian Lowland] / A.Yu. Tokareva, G.S. Alimova // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya [Advances in Modern Natural Sciences]. — 2019. — № 12. — P. 347–352. [in Russian]
9. Yakovleva V.S. Modelirovanie vliyaniya sostoyaniya i izmenchivosti atmosfery i litosfery na plotnost potokov radona i torona s poverkhnosti zemli [Modelling the influence of the state and variability of the atmosphere and lithosphere on the density of radon and thoron fluxes from the Earth's surface] / V.S. Yakovleva // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Tomsk Polytechnic University]. — 2010. — Vol. 317. — № 2. — P. 162–166. [in Russian]
10. SARAD GmbH. — URL: <https://www.sarad.de/index.php> (accessed: 06.05.2026).
11. Udoratin V.V. Metodika izmerenii obemnoi aktivnosti radona dlya platformennikh oblastei [A Method for Measuring Volumetric Radon Activity in Platform Regions] / V.V. Udoratin, Yu.E. Yezimova, A.Sh. Magomedova // Fizika Zemli [Earth Physics]. — 2020. — № 4. — P. 132–143. [in Russian]