

О корреляциях концентрации углекислого газа, радона и плотности аэроионов

В неветилируемом подземном помещении в г. Москве, в подвале здания ведется эксперимент по изучению поведения подземных газов с помощью комплекса, разработанного в ИЯИ РАН. Анализ данных долгосрочного мониторингирования подземных газов радона и CO_2 , а также плотностей аэроионов показал их сильную корреляцию. Приведены данные за месяц работы комплекса в летние дни 2024 г. Анализируется два периода данных, характеризующиеся различными погодными условиями. Проведен корреляционный анализ временных рядов.

Н.Ю.Агафонова¹, А.А.Афонин⁶,
В.В.Ашихмин¹, Л.Б.Безруков¹,
Н.М.Буднев⁵, Е.А.Добрынина¹,
Р.И.Еникеев¹, Ю.Н.Ерошенко¹,
С.В.Ингерман¹, В.В.Казалов¹,
В.М.Колесников¹, А.К.Межох¹,
В.П.Моргалюк³, Л.В.Паньков⁴,
В.Б.Петков¹, В.В.Синев^{1,2},
И.Р.Шакирьянова¹,
В.Ф.Якушев¹

¹ Институт ядерных исследований РАН, г. Москва

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

³ Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, г. Москва

⁴ НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, г. Иркутск

⁵ ФГБОУ ВО «Иркутский Государственный Университет», физический факультет, г. Иркутск

⁶ НТМ «Защита», г. Москва

Ключевые слова: радон, углекислый газ, аэроионы, корреляционный анализ.

1 Введение

Изучение подземных газов является полигоном для исследования различных геофизических задач, в частности, земного электричества, дегазации Земли, взаимодействия плит. Существует также прикладной аспект исследований, который включает в себя опасность избытка положительных аэроионов, углекислого газа (CO_2), метана (CH_4) и вопросы обеспечения безопасности людей, работающих под землей в шахтах и штольнях при поиске месторождений нефти и водородсодержащих газов.

В общем подземные газы, почвенные и глубинные, могут включать углекислый газ, водяной пар, азот, метан и другие газы в меньших количествах. Обзоры по проблеме почвенных газов можно найти в работах [1,2], о глубинных и вулканических газах – в [3] и в [4]. Газы в порах грунтов могут находиться в свободном, адсорбированном, заземленном и растворенном состоянии. Свободные газы содержатся в сообщающихся порах грунта, их количество зависит от открытой пористости грунта и степени его водонасыщения [6].

Радон (Rn) – это радиоактивный газ, который образуется в результате распада урана в почве и горных породах. Допустимая концентрация радона в жилых помещениях не должна превышать 100 Бк/м³ [20].

Углекислый газ (CO_2), помимо глубинного происхождения, является продуктом дыхания живых организмов и разложения органики, а также может поступать из почвы, где он накапливается в результате метаболической активности микроорганизмов [15]. Влажность может способствовать большей биологической активности, что может привести к увеличению концентрации углекислого газа. Влажные почвы могут удерживать больше углекислого газа, который затем может мигрировать в подвал через трещины и поры в фундаменте. Исследования показывают, что уровни CO_2 могут превышать 1000 ppm в плохо вентилируемых помещениях, что связано с ограниченной вентиляцией и накоплением газов из окружающей среды [16]. Это может негативно сказываться на здоровье человека, вызывая головные боли, усталость и другие симптомы [17].

Аэроионы (ионы) Ion (I_p , I_m) – это частицы воздуха, образующиеся в процессе ионизации, несущие положительный или отрицательный заряд. Это могут быть как атомы, так и молекулы или их комплексы, либо аэрозольные частицы. Первые исследования со времен Чижевского [18] показали важность исследования концентраций аэроионов в помещении, и они, так же как и концентрация радона, регламентированы СанПин [20]. Высокая влажность способствует образованию более крупных и долгоживущих кластеров ионов, а сухость воздуха может приводить к их быстрой нейтрализации и снижению концентрации.

Таким образом, физические параметры, такие как температура, давление и влажность, оказывают значительное влияние на свойства газов в подземных помещениях. Температура влияет на скорость диффузии газов: с увеличением температуры скорость диффузии возрастает, что может привести к более равномерному распределению газов в воздухе помещения [21]. Давление также играет важную роль: изменения атмосферного давления могут способствовать миграции газов из почвы в помещение. Высокая влажность может привести к образованию конденсата, который может задерживать газы и способствовать их накоплению [22].

В этой статье анализируются данные комплекса, описанного в разделе 2, который разработан в ИЯИ РАН [9], [23]. Комплекс находится в закрытом подземном помещении (подвале) и в непрерывном режиме измеряет концентрацию углекислого газа, радона и плотности аэроионов.

Приведены диапазоны и точности измеряемых комплексом параметров. В разделе 3 приводятся результаты измерений за 1 месяц наблюдений, характеризующиеся различным поведением временных рядов, изменение которых мы связываем с влажностью и температурой воздуха на поверхности и в подземном помещении. Наши выводы подкрепляются корреляционными матрицами, приведенными в 4 разделе, между всеми измеряемыми параметрами воздуха и газов. Цель статьи – описать особенное поведение скорости изменения концентрации ионов, радона и углекислого газа при некоторой комбинации температуры наружного воздуха и воздуха в подземном помещении Института ядерных исследований (г. Москва).

2. Описание комплекса

В невентилируемом подземном помещении, в подвале здания на глубине 4 метров с 2022 г. ведется эксперимент по изучению поведения подземных газов с помощью комплекса Троицк-1.5, разработанного в ИЯИ РАН.

Измерительный комплекс Троицк-1.5 предназначен для измерения в непрерывном режиме основных составляющих параметров атмосферного воздуха: температуры, влажности, атмосферного давления, плотностей аэроионов, уровня CO_2 . Комплекс подключается к ноутбуку с выходом в интернет. Его программное обеспечение дает возможность подключения любых датчиков, имеющих аналоговый выход, или датчиков с цифровым выходом, имеющих библиотеку в системе Arduino аппаратно-программных средств построения и прототипирования простых систем, моделей и экспериментов в области электроники, автоматики, автоматизации процессов и робототехники, основанной на базе использования микроконтроллера.

Аппаратная часть комплекса включает в себя:

- датчики температуры, влажности, давления, уровня CO_2 , собранные в едином боксе;
- выносной датчик температуры, влажности, давления;
- два высокоточных термодатчиков с датчиком аэроионов на базе счетчика Сапфир-3М;
- блок микроконтроллеров для обработки сигналов с датчиков.

Программная часть измерительного комплекса объединяет комплекс программ [программа 1, программа 2], переводящих сигналы данных от датчиков посредством микроконтроллеров в соответствующие текстовые файлы для их последующей обработки, а также программ, организующих работу системы. Связь аппаратной части комплекса с компьютером осуществляется посредством стандартного соединения через имеющиеся в них стандартные USB разъемы.

Для анализа данных 2024 г., записывающихся Комплексом Троицк-1.5, использовались данные датчиков температуры (T), влажности (H) и давления (P), расположенных на полу помещения; данные с датчика измерения концентрации углекислого газа (CO_2) и с одного из модифицированных счетчиков Сапфир-3М (C_{Ion}), измеряющих плотность положительных и отрицательных аэроионов [9].

Частота измерения T [в градусах Цельсия], H [в %], P [в мм рт. ст.] составляет 1 секунду, концентрации CO_2 [в 0,01% или $1 \times 100 \text{ ppm}$] – 5 секунд, плотности аэроионов C_{Ion} [число частиц $\times 10^3 / \text{см}^3$] – 4 секунды.

В дополнение к комплексу в подвале находился радиометр радона и торона Альфафад (C_{Rn}), измерения производилось раз в 60 минут C_{Rn} [в Бк/м³]. Показания с Альфафада списывались на съемный носитель при непосредственном доступе в подвал.

Комплекс записывал данные с февраля 2024 по декабрь 2024. В некоторые периоды времени проводились наладки режимов работы программного обеспечения и различных измерений при изменении местоположения комплекса.

К основным особенностям измерений в подвале концентрации углекислого газа, радона и плотности аэроионов можно отнести их резкое падение при открывании двери в подвал и медленное нарастание концентрации при закрытии двери.

Приведем средние значения параметров воздуха при закрытой и открытой двери (установление равновесия происходит за время около 12 часов). В табл.1 представлены характеристики в зимне-весенний период измерений.

Табл.1. Среднесуточные значения параметров воздуха в подвале и на поверхности в период с 01 по 15 мая 2024 г.

	Закрытая дверь	Открытая дверь – воздухообмен
CO ₂	(10±2)×100 ppm	(4±1)×100 ppm
C _{Ion} (C _{Ip} , C _{Im})	(15±5)×10 ³ /см ³	(2±1)×10 ³ /см ³
C _{Rn}	(2000±700) Бк/м ³	(100±50) Бк/м ³
T _{in}	(23±1) °C	(21±1)°C
H _{in}	(42±4)%	(32±4)%
H _{out}	20–80%	
T _{out}	от 0 до +12°C	

Открывание двери в подвал характеризуется резким падением концентраций газов и ионов (см. правую колонку табл.1). За 20–30 минут их величины становятся в разы меньше, а некоторые – близкими к атмосферным значениям.

3. Временные ряды за май 2024 года

Стабильная работа комплекса позволяет наблюдать изменение концентрации углекислого газа, радона и плотности ионов при различных атмосферных условиях в помещении и на поверхности. Приведем результаты измерений комплекса в подвале за период, в котором наблюдалась смена поведения временных рядов. Это период непрерывной работы комплекса за май 2024 г.

На рис.1А, 1Б показаны временные ряды данных за май 2024 г. с бином, усредненным за 1 час. Видны два характерных периода с 1 по 20 мая (П1) и с 21 по 31 мая (П2). Провал в середине временных рядов с 15.05 по 17.05 – это период, во время которого была открыта дверь и подземные газы свободно выходили из подвала.

После 20 мая характер поведения временных рядов изменился: наблюдаются явные резкие суточные колебания углекислого газа, радона и плотности аэроионов. Такое поведение рядов наблюдалось весь июнь и июль 2024 г. Амплитуда модуляций C_{Rn} и C_{Ions} достигает 30%, C_{CO2} – 12%. Максимум вариаций приходится на примерно 7 часов, минимум – примерно на 19 часов (МСК).

Определить фазу и период модуляции временного ряда можно используя метод наложения эпох. Метод основывается на разбиении временного ряда на бины, кратные некоторому периоду T (эпохи). Амплитуда в одинаковых бинах суммируется и делится на количество периодов. В результате все эпохи (T) накладываются друг на друга, а амплитуды усредняются.

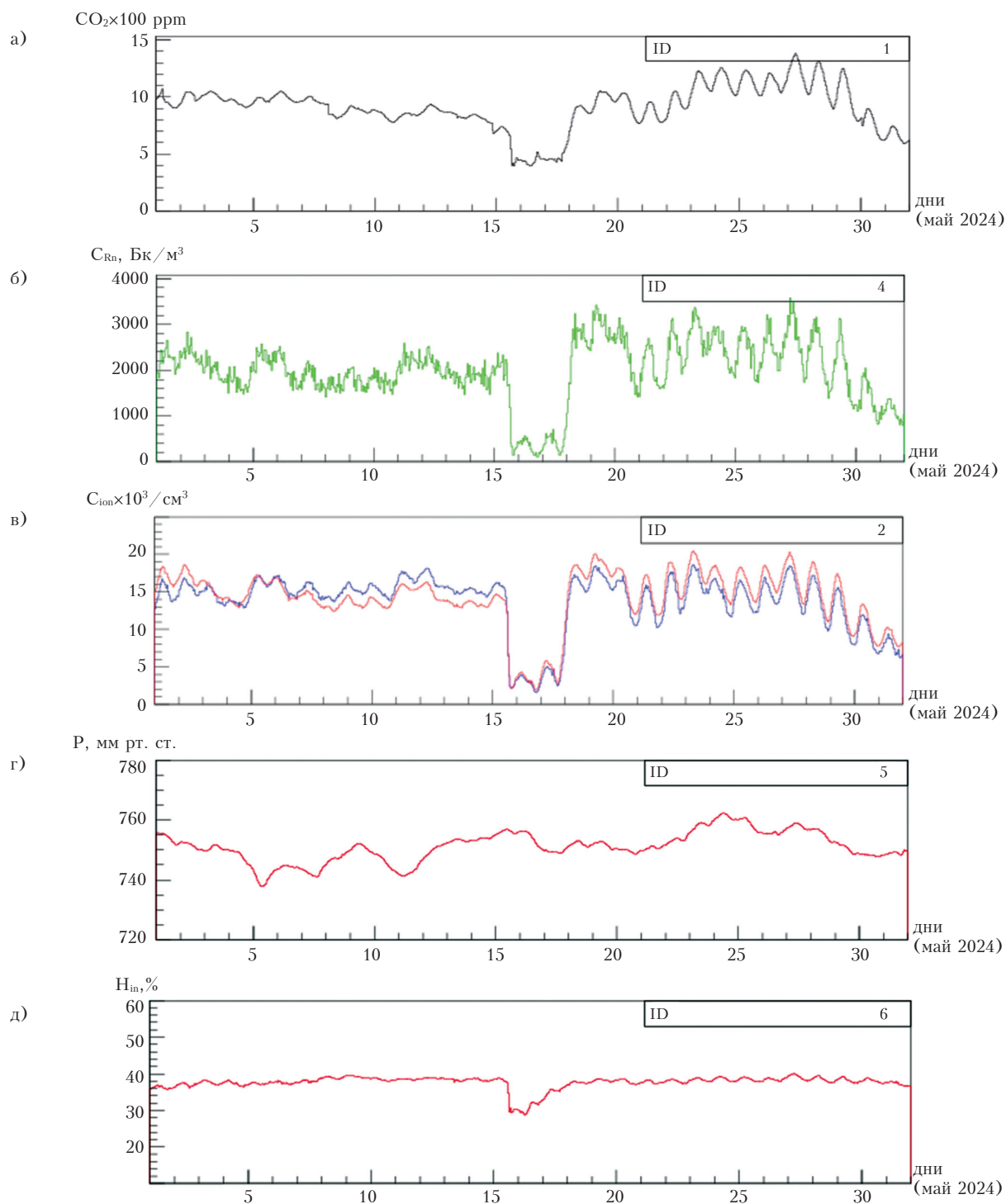


Рис.1А. Временные ряды измерений комплекса Троицк-1.5, установленного в подвале нового здания ИЯИ РАН: а) концентрация углекислого газа; б) концентрация радона; в) плотность отрицательных (синяя гистограмма) и положительных (красная гистограмма) аэроионов; г-д) давление, влажность.

Гистограммы, полученные методом наложения эпох для плотности аэроионов и концентрации углекислого газа, показаны на рис.2. Аппроксимируя гистограмму косинусоидальным законом $F(t) = P3 + P1 \times \cos[2\pi(t - P2)/T]$, мы определяем среднюю концентрацию $P3 = 14,8 \times 10^4$ см⁻³ и

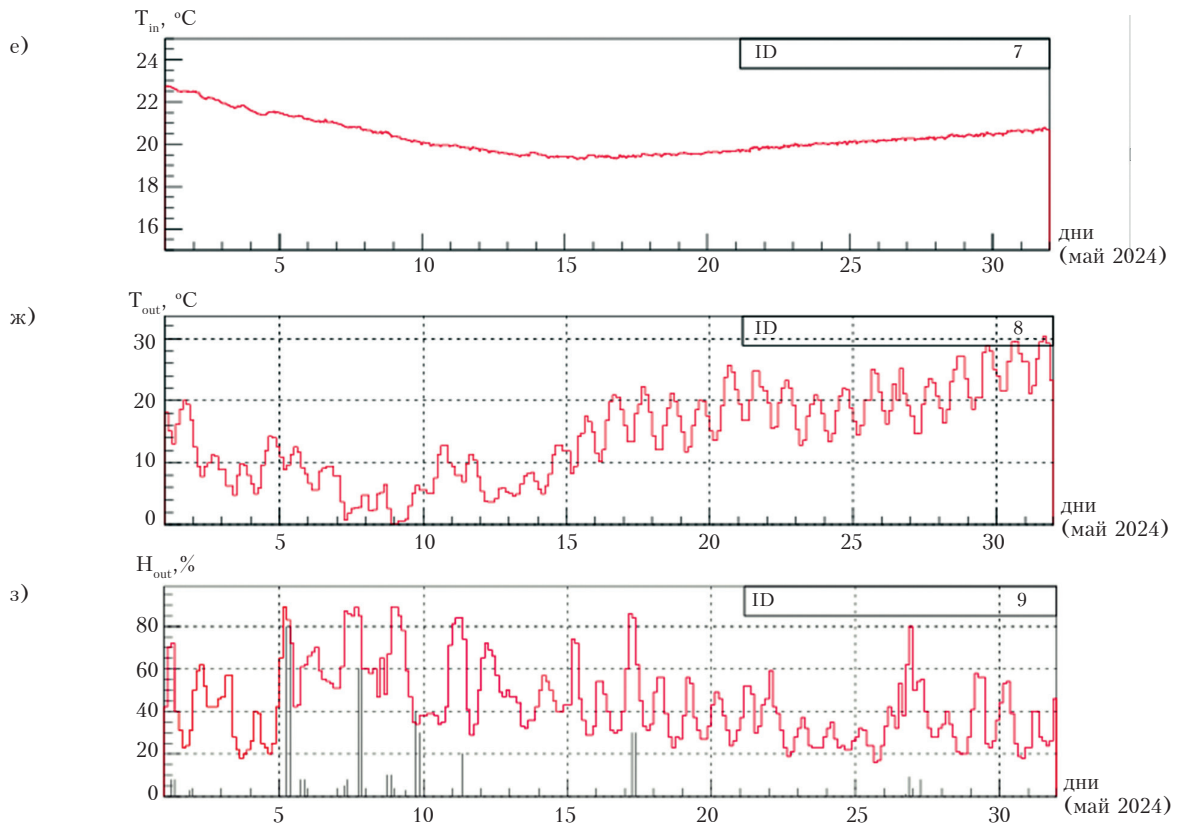


Рис.1Б. Временные ряды измерений комплекса Троицк-1.5, установленного в подвале нового здания ИЯИ РАН: е) температура внутри подвала, ж-з) температура и влажность воздуха снаружи.

(10,6)×100 ppm для ионов и CO_2 , а также величину вариации: $\delta = P1/P3 = 16\%$ и 10% , и фазу (максимум вариации для периода $T = 24$ ч = 1440 мин): $\varphi = P2 = 495 \pm 15$ и 455 ± 5 мин, для ионов и CO_2 , соответственно. Варьируя эпоху T , например от 1380 мин = 23 ч до 1560 мин = 26 ч, можно найти максимальную амплитуду временного ряда в зависимости от периода. То есть мы

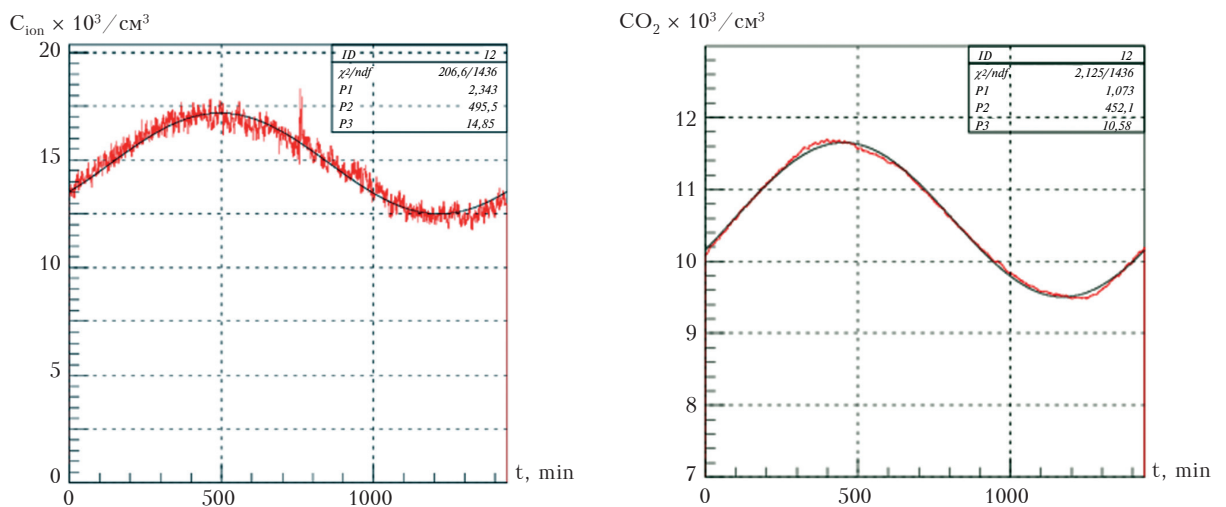


Рис.2. Вариации плотности ионов C_{ion} (слева) и концентрации углекислого газа CO_2 (справа), полученные методом наложения эпох за период с 18 по 23 мая 2024 г. Кривые – фитирующие функции вида $F(t) = P3 + P1 \times \cos[2\pi(t-P2)/T]$.

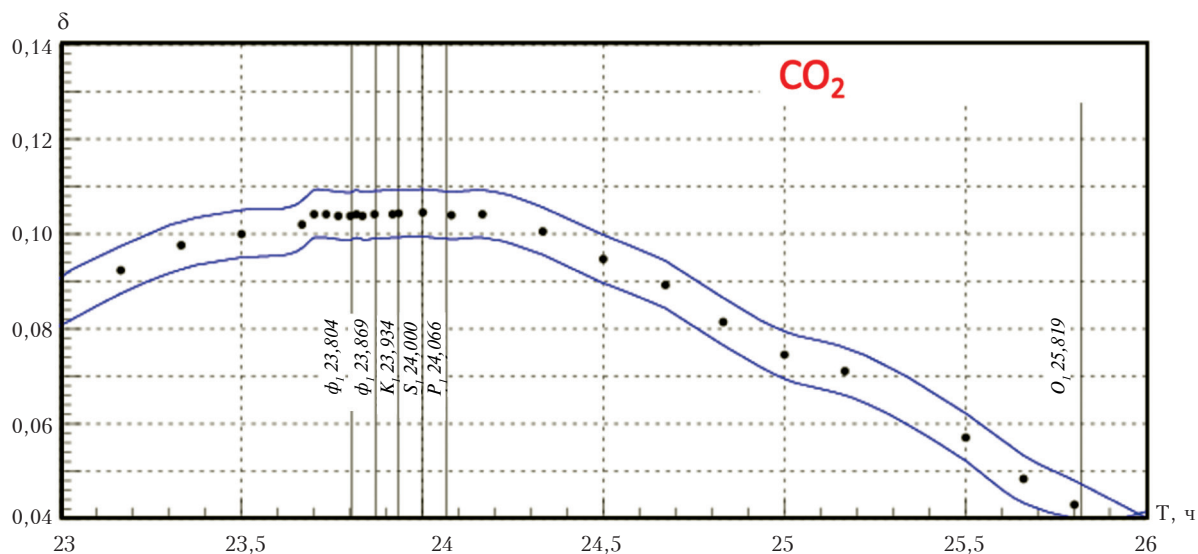


Рис.3. Определение амплитуды с диапазоном ошибок (синие кривые) вариаций концентрации углекислого газа в зависимости от выбранной эпохи (периода T , в часах). Прямыми линиями отмечены значения приливных волн по Мельхиору [13].

определяем истинный период вариаций, не прибегая к методу Фурье анализа временных рядов (рис.3 для углекислого газа). Получено, что максимальная амплитуда вариаций изменения концентрации CO_2 и ионов приходится на 23,7–24,1 ч с максимумом около 8 ч.

4. Результаты корреляционного анализа

Для двух периодов времени $П1$ с 01 по 20 мая и $П2$ с 21 по 31 мая были вычислены коэффициенты корреляции Пирсона (r_{c1c2}), представляющие собой ковариацию двух переменных (наборов данных), деленных на произведение их стандартных отклонений.

На рис.4 приведены матрицы коэффициентов корреляции r_{c1c2} для всех различных комбинаций пар: температура, влажность, давление, CO_2 , плотность отрицательных и положительных ионов, концентрации радона и осадков.

Для обоих периодов характерны сильные корреляции концентрации углекислого газа, радона и плотности аэроионов между собой. Для второго периода $П2$ их корреляция становится очень сильной, а также возрастает их попарная корреляция с давлением и влажностью. В $П2$ также проявляется сильная антикорреляция газов CO_2 , C_{Rn} , C_{Ions} : C_{Im} , C_{Ip} с наружной температурой.

Корреляционные функции для пар « $CO_2 - C_{Im}$, C_{Ip} », « $CO_2 - C_{Rn}$ » и « C_{Im} , $C_{Ip} - C_{Rn}$ » были построены для $П1$ и $П2$ с использованием выражения:

$$K(dt) = \frac{\sum_j (C_1(t) - \bar{C}_1)(C_2(t+dt) - \bar{C}_2)}{(N-1)\sigma_{C1}\sigma_{C2}},$$

где: $\bar{C}_1 = \sum_j C_1/N$, $\bar{C}_2 = \sum_j C_2/N$, — средние двух временных рядов;

$\sigma_{C1} = \left[\sum_j (C_{1j} - \bar{C}_1)^2 / (N-1) \right]^{1/2}$, $\sigma_{C2} = \left[\sum_j (C_{2j} - \bar{C}_2)^2 / (N-1) \right]^{1/2}$ — выборочные дисперсии [10].

Сдвиг временного ряда давления выбирается произвольно. В нашем случае мы ищем возможные задержки dt от -15 до +15 ч. Корреляционные функции позволяют найти максимум коэффициента корреляции K от сдвига (dt).

В табл.2 приведены значения корреляционных функций при сдвиге $dt = 0$ для двух периодов. В этом случае коэффициенты $K(dt = 0)$ совпадают с коэффициентом Пирсона, который измеряет линейную корреляцию между двумя наборами данных. В третьем столбце приведен сдвиг, когда функция $K(dt)$ максимальна для второго периода. Этот сдвиг показывает, что сначала изменяется концентрация углекислого газа, а затем плотность ионов и уровень радона в подвале.

Табл.2. Значения коэффициентов корреляции из корреляционных функций.

	П1: 01.05.2024 – 15.05.2024	П2: 21.05.2024 – 31.05.2024	П2: dt для максимального $K(dt)$
$CO_2 - C_{Im}, C_{Ip}$	<0,2	0,9	0,5 – 1,0 ч
$CO_2 - C_{Rn}$	0,45	0,8	2,0 – 2,5 ч
$C_{Im}, C_{Ip} - C_{Rn}$	0,7	0,85	1,5 – 2,0 ч
$C_{Im}, C_{Ip} - \text{Давление}$	-0,25	0,35	-
$C_{Im}, C_{Ip} - \text{Влажность}$	0,27	0,35	-
$CO_2 - \text{Влажность}$	-0,7	0,35	-

Зависимость изменения уровня углекислого газа, радона и плотности ионов можно увидеть в графиках взаимного попарного поведения (рис.5).

Временные колебания концентрации ионов C_{ion} в воздухе от C_{Rn} (пренебрегая незначительным расхождением между положительными и отрицательными ионами и электростатическим осаждением ионов воздуха) обычно описывают, исходя из упрощенных моделей, например, используя квадратичную пропорциональность концентраций $C_{Rn} \sim C_{ion}^2$ или решая дифференциальное уравнение [11] и [12]). Уравнение, устанавливающее связь концентрации радона и плотности аэроионов в условиях подземной лаборатории, в общем виде можно написать:

$$dC_{ion}/dt = \alpha \times C_{Rn} - \beta \times C_{ion}^2 - \gamma \times C_{ion} + K(\text{другие параметры}), \text{ где } \alpha - \text{коэффициент ионизации,}$$

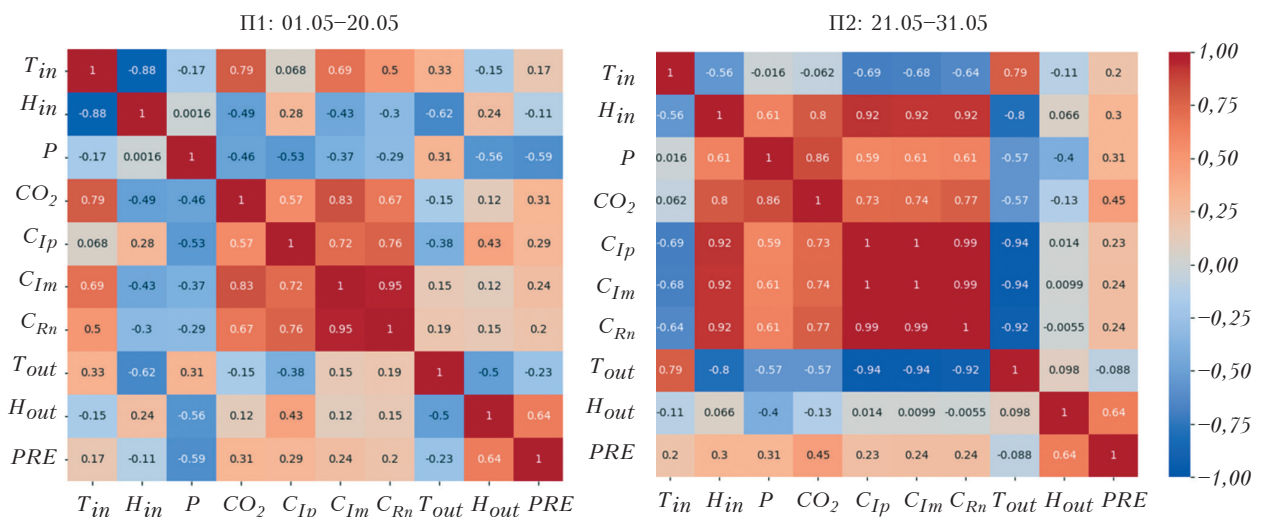


Рис.4. Матрицы коэффициентов корреляции r_{c1c2} для двух периодов временных рядов. T_{in} , T_{out} , H_{in} , H_{out} – температура и влажность внутри подвала и на поверхности; P – давление; CO_2 , C_{Rn} , C_{Im} , C_{Ip} – концентрации углекислого газа, радона и плотность аэроионов; PRE – количество осадков. Цвет – величина корреляции от синего (-1), до красного (+1), белый – нет корреляции (отсутствие линейной зависимости).

отражающий эффективность образования ионов при распаде радона, β – коэффициент рекомбинации ионов, γ – коэффициент удаления ионов (вентиляция, адсорбция), а также другие параметры: давление, влажность, температура, размер помещения и время установления равновесия.

Используя корреляции (рис.5) пар величин экспериментальных данных (а – концентрация радона и плотность ионов, б – концентрация радона и CO_2 , в – CO_2 и плотность ионов, г – влажность и CO_2 , мы можем дать их простую зависимость, аппроксимируя данные функцией с показателем близким к 1,5 ($y = k \cdot x^b$, b от 1,2 до 1,8).

Для пары $C_{Rn}-C_{ion}$ была найдена аппроксимирующая функция с коэффициентами $k = 2,9 \times 10^{-3}$ и $b = 1,4$.

Для пары $C_{Rn}-\text{CO}_2$ была найдена аппроксимирующая функция с коэффициентами $k = 31,8$ и $b = 1,8$.

Для пары $C_{ion}-\text{CO}_2$ была найдена аппроксимирующая функция с коэффициентами $k = 946,4$ и $b = 1,2$.

Для пары $H-\text{CO}_2$ – зависимость линейная. Единицы измерения величин в этих фитирующих формулах те же, что на осях графиков на рис.5.

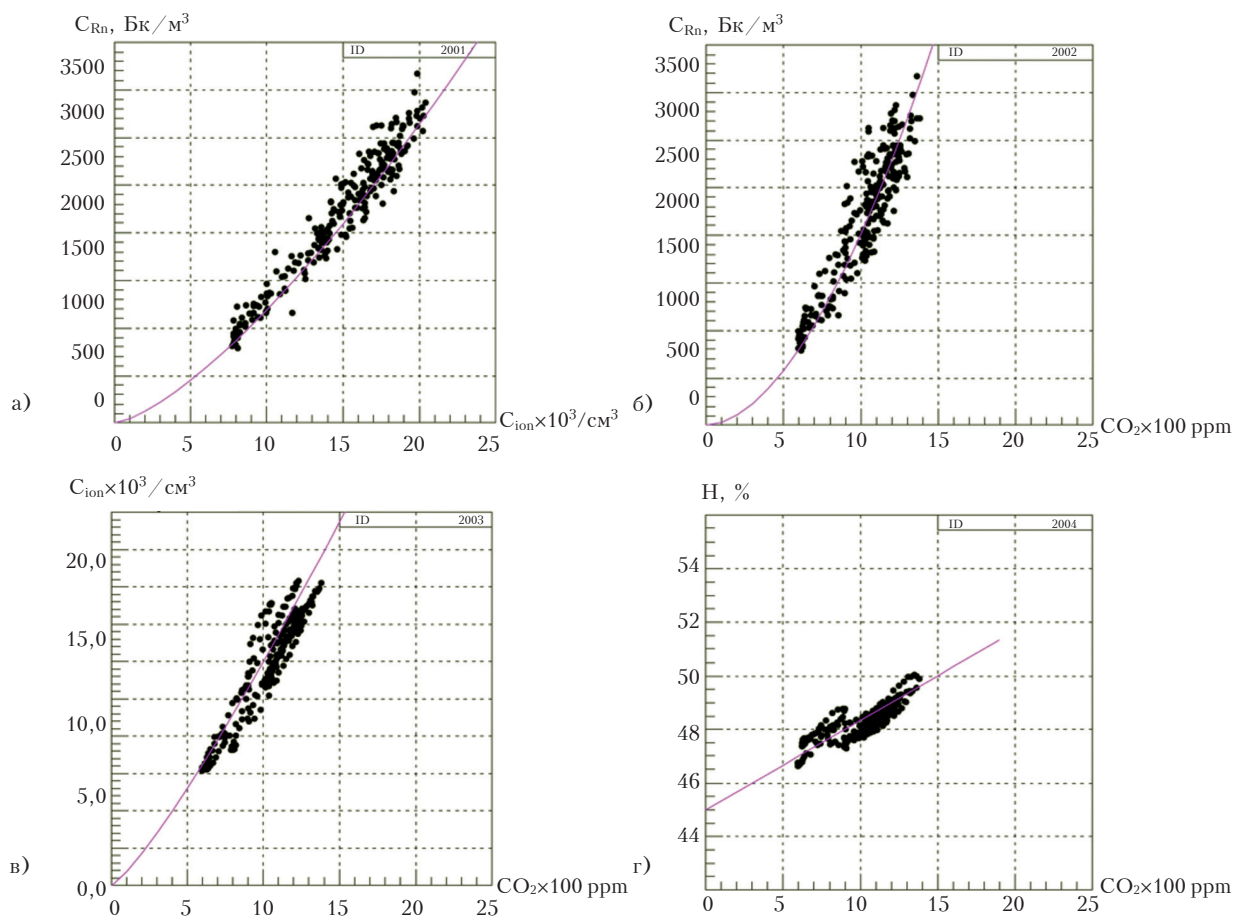


Рис.5. Зависимость изменения: а) концентрации радона и плотности ионов, б) концентрации радона и CO_2 , в) CO_2 и плотности ионов, г) влажности и CO_2 . Кривые – аппроксимация данных (см. пояснение в тексте).

5. Обсуждение и заключение

Во временных рядах концентрации углекислого газа, радона и плотности аэроионов обнаружен особенный период (П2: 20 мая – 30 июня 2024 г.), когда воздух в подвале не выходит из него при открывании двери, так называемый эффект «запертого помещения». В этот период на улице устанавливалась сухая и теплая погода с температурой больше 20 °С, воздух в подвале не перемешивается с внешним воздухом вследствие разности их плотностей, возникшей из-за разности температур воздуха в подвале и снаружи (дверь находится в верхней части подвала). Подвал после выключения зимнего отопления охлаждался и достиг температуры около 20 °С. Сухая и теплая погода ($T \sim 22$ °С) была всю вторую половину мая, а также и в летние месяцы 2024 г. Таким образом, эффект «запертого подвала» возникает при высокой температуре воздуха на поверхности, отсутствии дождя, то есть низкой наружной влажности и одновременно с низкой температурой в самом подвале.

Принцип циркуляции воздушных масс основан на разности температуры воздуха внутри (T_{in}) и снаружи (T_{out}) подвального помещения. Естественная циркуляция воздуха происходит за счет поступления холодного воздуха из окружающей среды (улица) с одновременным выходом наружу теплого воздуха из подвала. Чем больше температурная разница, тем быстрее обмен воздуха. Если же T_{out} выше T_{in} , то воздухообмена не происходит. Было замечено, что при открывании дверей в подвал уровень концентрации не уменьшался и характер поведения временных рядов не изменялся. Простое открытие дверей не дает обычного проветривания подвала. Радон и углекислый газ не выходит из помещения, что делает опасным длительное пребывание в подвале в жаркую и сухую погоду.

В этот же период П2 между парами « $\text{CO}_2 - C_{lm}$, C_{lp} », « $\text{CO}_2 - C_{Rn}$ » и « C_{lm} , $C_{lp} - C_{Rn}$ » определены корреляционные функции, которые показали их сильную корреляцию ($>0,76$). Это говорит об их связи в источнике их происхождения или о едином влиянии на выход этих газов из грунта. Слабая корреляция между парами « C_{lm} , $C_{lp} - \text{Влажность}$ » и « $\text{CO}_2 - \text{Влажность}$ » показывает отсутствие влияния влажности и давления на выход газов. Корреляция « C_{lm} , $C_{lp} - \text{Давление}$ » умеренная (0,55), в отличие от найденной в работе [14]. Более сильную корреляцию с давлением можно увидеть на больших масштабах (5–10 дней) характерного времени движения атмосферных фронтов.

Наш анализ временных рядов концентрации газов CO_2 , Rn и плотностей аэроионов не исключает суточных лунно-солнечных вариаций этих газов в диапазоне (10–16)% с максимумом амплитуды вариаций, приходящейся на 8 ч утра.

Известно [24], что на выход газов влияет температура воздуха. При повышении температуры растворимость углекислого газа в воде уменьшается, а влажные стены при испарении воды могут привести к высвобождению CO_2 , и тем самым будет увеличиваться его концентрация. Обычно максимальная температура в приземном слое достигается к середине дня (около 15 ч), а в грунте к 18 ч. С другой стороны, уровень CO_2 из-за уменьшения фотосинтетической активности (уменьшение поглощения CO_2 ночью и его выделения растениями и микроорганизмами) увеличивается ночью и рано утром [25]. Наши измерения показали максимальную концентрацию газов в районе 7–8 часов утра, что говорит о другой динамике выхода и перемещения газов.

Таким образом, понимание динамики подземных газов и факторов, влияющих на их концентрацию, является ключевым для оценки качества воздуха в подвалах и обеспечения радиационной безопасности их использования.

Литература

1. B. Wang, P.E. Brewer, H.H. Shugart, M.T. Lerdau, S.D. Allison, «Soil aggregates as biogeochemical reactors and implications for soil-atmosphere exchange of greenhouse gases—A concept», *Glob. Chang. Biol.*, vol. 25. pp. 373-385, 1999.
2. W. Chesworth, *Encyclopedia of Soil Science*, Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2009
3. P. Tobias Fischer, *Giovanni Chiodini, Chapter 45 – Volcanic, Magmatic and Hydrothermal Gases*, Editor(s): Haraldur Sigurdsson, *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)*, Academic Press, pp. 779-797, 2015.
4. W.F. Giggenbach, «Chemical Composition of Volcanic Gases». In: *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer: Berlin, Heidelberg, 1996.
5. A.G. Bannov, I.V. Trubin, I.K. Zakharov, E.A. Maksimovskiy, P.B. Kurmashov, «A critical review on soil gas analysis: modern technologies and problems», *Agronomy*, vol.14(10), 2374, 2024.
6. Соколов В.А. Геохимия природных газов. М.: Недра, 1971.
7. Агафонова Н.Ю., Колесников В.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 025663319, Российская Федерация. Программа для сбора и обработки информации в режиме реального времени с нескольких разных источников (prog_Troitsk_2.0.ps1): № 2025660511, заявл. 30.04.2025, опубл. 27.05.2025, бюл. 6, заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.
8. Агафонова Н.Ю., Колесников В.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663519, Российская Федерация. Программа унификации и объединения архивных баз данных от нескольких разных источников (Prog_Arxiv.ps1): № 2025660508, заявл. 30.04.2025, опубл. 28.05.2025, бюл. 6, заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.
9. Безруков Л.Б. и др. Наблюдение избытка положительных аэроионов в подземных полостях // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62, № 6. С. 755.
10. Ахиезер А.И., Пелетминский С.В. Методы статистической физики, М: Наука, 1977.
11. P. Kolar, Z. Curguz, «Air ions as indicators of short-term indoor radon variations», *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 99, pp. 179-185, 2015.
12. Аджиев А.Х., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В. Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 4, С. 452-461.
13. Мельхиор П. Земные приливы, М.: Мир, 1968. 482 с.
14. Безруков Л.Б. и др. Исследование задержанного пампинг-эффекта в подземной лаборатории методом корреляционного анализа концентраций радона и аэроионов // Геомагнетизм и аэрономия. 2024. Т. 64. № 1. С. 122-132.
15. L.A. Baker et al. «Sources and concentrations of carbon dioxide in residential buildings», *Indoor Air*, vol. 25(3), pp. 239-248, 2015.
16. D.W. Sullivan, et al. «Carbon dioxide levels in residential basements: A study of ventilation and air quality» *Building and Environment*, vol. 114, pp. 1-9, 2017.
17. M. Murray, et al. «Health effects of indoor carbon dioxide exposure: A review», *Environmental Health Perspectives*, vol. 126(2), 027001, 2018.
18. Чижевский А.Л. Ионизация воздуха как физиологически активный фактор атмосферного электричества. Доклад, прочитанный в общ-ве по изучению природы. Калуга: литограф, издание, 1919, 22 с.
19. Чижевский А.Л. К истории аэроионификации. М., 1930, 250 с.
20. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09.

21. H. Fuchs, et al., «Influence of temperature on the diffusion of gases in indoor environments», *Journal of Building Performance*, vol. 10(1), pp. 1-10, 2019.
22. K. Ravindra, et al., «Impact of humidity on indoor air quality and health», *Environmental Science Technology*, vol. 54(15), pp. 9250-9260, 2020.
23. Агафонова Н.Ю., Безруков Л.Б., Еникеев Р.И., Добрынина Е.А., Ерошенко Ю.Н., Ингерман С.В., Карпиков И.С., Казалов В.В., Межох А.К., Синев В.В., Филимонова Н.А., Шакирьянова И.Р., Якушев В.Ф. Создание сети установок для регистрации аэроионов в подземных помещениях // В сборнике: Материалы IX Всероссийской научной конференции по атмосферному электричеству. Материалы конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 81-85.
24. V.V. Yurak, S.V. Fedorov, «Review of natural and anthropogenic emissions of carbon dioxide into the earth's atmosphere», *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 22, pp. 1-18, 2024.
25. Михайлов О.А., Загирова С.В., Гончарова Н.Н., Мигловец М.Н. Суточная динамика CO₂-газообмена в системе «болото–атмосфера» в период отсутствия активной вегетации растений // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2013. Выпуск 3(15). С. 35-40
26. E. Gorham, «Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming», *Ecol. Applic*, vol. 1, no 2, pp. 182-195, 1991.

On the Correlations Between the Concentration of Carbon Dioxide, Radon and the Density of Aeroions

Agafonova Natalia ¹, Afonin Aleksey ⁶, Ashikhmin Vsevolod ¹, Bezrukov Leonid ¹, Budnev Nikolay ⁵, Dobrynina Ekaterina ¹, Enikeev Rasim ¹, Eroshenko Yury ¹, Ingerman Svetlana ¹, Kazalov Vladimir ¹, Kolesnikov Valery ¹, Mezhokh Andrey ¹, Morgalyuk Vasily ³, Pankov Leonid ⁴, Petkov Valeriy ¹, Sinev Valeriy ^{1,2}, Shakiryanova Irina ¹, Yakushev Valeriy ¹

¹ Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

³ A.N. Nesmeyanov Institute of Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴ Applied Physics Research Institute, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

⁵ Irkutsk State University, Faculty of Physics, Irkutsk, Russia

⁶ NTM-Zchita LLC, Moscow, Russia

Abstract. An experiment to study the behavior of underground gases, using a system developed at the Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, is being conducted in an unventilated underground facility in Moscow, in the basement of a building. Analysis of long-term monitoring data for underground radon and CO₂ gases, as well as aeroion densities, revealed a strong correlation. Data for a month of the system's operation during the summer of 2024 are presented. Two data periods, characterized by different weather conditions, are analyzed in the article. A correlation analysis of the time series was conducted.

Keywords: radon, carbon dioxide, ions, correlation analysis.

Н.Ю.Агафонова (к.ф.-м.н., с.н.с.)¹, А.А.Афонин (к.ф.-м.н., директор уч. цент.)⁶, В.В.Ашихмин (м.н.с.)¹, Л.Б.Безруков (д.ф.-м.н., г.н.с.)¹, Н.М.Буднев (д.ф.-м.н., декан, с.н.с.)⁵, Е.А.Добрынина (к.ф.-м.н., н.с.)¹, Р.И.Еникеев (н.с.)¹, Ю.Н.Ерошенко (д.ф.-м.н., с.н.с.)¹, С.В.Ингерман (вед. инж.)¹, В.В.Казалов (к.ф.-м.н., с.н.с.)¹, В.М.Колесников (с.н.с.)¹, А.К.Межох (к.т.н., н.с.)¹, В.П.Моргалюк (н.с.)³, Л.В.Паньков (к.ф.-м.н., с.н.с.)⁴, В.Б.Петков (д.ф.-м.н., зав. фил.)¹, В.В.Синев (д.ф.-м.н., в.н.с.)^{1,2}, И.Р.Шакирьянова (н.с.)¹, В.Ф.Якушев (н.с.)¹

¹ Институт ядерных исследований РАН, г. Москва

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

³ Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, г. Москва

⁴ НИИ прикладной физики Иркутского госуниверситета, г. Иркутск

⁵ ФГБОУ ВО «Иркутский Гос. Университет», физический факультет, г. Иркутск

⁶ НТМ «Защита», г. Москва

Контакты: agafonova@inr.ru