

УДК 550.37

НАБЛЮДЕНИЕ ИЗБЫТКА ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ АЭРОИОНОВ В ПОДЗЕМНЫХ ПОЛОСТЯХ

© 2022 г. Л. Б. Безруков^{1, *}, А. Ф. Громцева², В. П. Заварзина¹, И. С. Карпиков¹, А. С. Курлович¹,
Д. А. Лебедев², А. К. Межох¹, П. Ю. Наумов², С. В. Силаева¹, В. В. Синёв^{1, **}

¹Институт ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН), г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, г. Москва, Россия

*e-mail: bezrukov@inr.ac.ru

**e-mail: vsinev@inr.ac.ru

Поступила в редакцию 07.11.2020 г.

После доработки 16.05.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Приведены результаты измерений плотностей аэроионов обоих знаков в неветилируемой подземной лаборатории НИИЯФ МГУ, выполненных при помощи стационарной станции на базе модифицированного счетчика аэроионов Сапфир-3М. Решены проблемы точности относительных измерений плотностей аэроионов и стабильности измерений в условиях повышенной влажности подземных помещений. Изучалось пространственное распределение плотностей аэроионов и их изменчивость во времени. Повсеместно в лаборатории обнаружен избыток положительно заряженных аэроионов. Полученные данные свидетельствуют о наличии в подземной лаборатории слабого электрического поля, направленного вниз. Обнаружена зависимость плотностей аэроионов обоих знаков от величины атмосферного давления. Обнаружена корреляция плотностей аэроионов с активностью радона в воздухе лаборатории и показано, что ионизация воздуха альфа-частицами от распада радона и его дочерних элементов является основным источником аэроионов в замкнутых подземных полостях. Предложен вариант объяснения наличия избытка положительного заряда в подземных полостях.

DOI: 10.31857/S0016794022060025

1. ВВЕДЕНИЕ

Каждый исследователь, производящий измерения плотностей аэроионов обоих знаков в закрытых помещениях, наблюдает наличие избытка положительно заряженных аэроионов. Например, Mikiver [2017], Schiessling et al. [2018] наблюдали избыток положительно заряженных аэроионов как в подземных, так и в закрытых комнатах, расположенных выше уровня земли. В этих работах наблюдаемый избыток положительно заряженных аэроионов интерпретировался как проявление электрического эффекта. В работе [Безруков и др., 2018] также сообщается о регистрации избытка положительно заряженных аэроионов в неветилируемых подземных помещениях и предложена интерпретация этого явления как проявление избытка положительного заряда в земной коре.

В данной статье мы остановимся на методических проблемах, с которыми сталкивается исследователь при измерении плотностей аэроионов в подземных помещениях, и приведем данные измерения плотностей аэроионов обоих знаков в подземной лаборатории НИИЯФ МГУ в городе

Москве и в меднорудной шахте Пюхясалми (Ruhasalmi, Финляндия).

Измерения плотности аэроионов обоих знаков проводились при помощи счетчика аэроионов Сапфир-3М. Оказалось, что коммерческий экземпляр счетчика аэроионов Спафир-3М и его абсолютная калибровка, произведенная продавцом, не отвечают требованиям исследования избытка положительно заряженных аэроионов. Для ответа на вопрос, с какой точностью возможно измерять коэффициент униполярности счетчиком аэроионов Сапфир-3М, пришлось разработать собственную процедуру калибровки, которую мы опишем в данной статье. Также оказалось, что счетчик аэроионов Спафир-3М не предназначен для измерений во влажных закрытых подземных помещениях, был обнаружен эффект насыщения показаний счетчика во влажной среде. Вопросу важности разработки методики одновременных измерений плотности аэроионов *in situ* посвящена работа [Warden et al., 2019], в которой сообщается, что при повышенной влажности счетчик аэроионов входит в насыщение, и предлагается нагревать воздух перед входом в аспирационную

камеру. В опубликованной ранее работе [Безруков и др., 2018] сообщалось о решении этой проблемы методом нагрева аспирационной камеры целиком. Счетчик аэроионов с нагретой аспирационной камерой мы будем называть модифицированным.

Обычно, основным источником ионов в подземных помещениях рассматривается радон, накапливающийся в них. На плотность аэроионов в подземных полостях могут оказывать влияние электрические силы: силы равномерно распределенного в полости положительного заряда и наличие вертикального электрического поля в коре Земли. Такое электрическое поле изучалось в экспериментах на оз. Байкал [Коротаев и др., 2011, 2015]. Работа [Безруков и др., 2019] посвящена интерпретации этих экспериментов.

Целью статьи является иллюстрация существования избытка положительно заряженных аэроионов в закрытых подземных полостях.

2. СЧЕТЧИК АЭРОИОНОВ САПФИР-3М

Счетчик аэроионов Сапфир-3М предназначен для одновременного измерения плотностей положительных N_+ и отрицательных N_- аэроионов, содержащихся в исследуемом воздухе, со значением подвижности: $k \geq 0.4 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$.

Датчиком счетчика аэроионов является двойная аспирационная ионная камера. Через аспирационную камеру с помощью вентилятора прокачивается исследуемый воздух. В рабочем объеме камеры на ионы действует электростатическое поле, создаваемое источниками питания камеры. Ионы отклоняются в сторону собирающего электрода и оседают на нем в течение времени накопления заряда $T = 2 \text{ с}$. Все это время собирающий электрод аспирационной камеры и дополнительная емкость отсоединены от измерительной электроники при помощи реле Сапфира-3М (геркон) и заряжаются до некоторого напряжения U . По окончании времени накопления собирающий электрод и дополнительная емкость присоединяются на 2 с к измерительной электронике при помощи реле Сапфира-3М, и электрический заряд разряжается через входное сопротивление усилителя. Измеряется амплитуда возникающего импульса напряжения U и преобразуется в количество аэроионов в $\text{см}^3 \text{ с}$ использованием коэффициента $K(U)$. Полученное значение плотности аэроионов записывается в файл на диск персонального компьютера.

Плотность положительных N_+ аэроионов может быть выражена, при условии полного сбора на собирающий электрод всех аэроионов, затянутых в аспирационную камеру, следующим образом:

$$N_+ = \frac{2U_+C_+}{eWT}, \quad (1)$$

где U_+ – напряжение, накопленное на емкости C_+ за время измерения T ; C_+ – емкость части аспирационной камеры, накапливающая положительные аэроионы, плюс дополнительная емкость на электронной плате обработки сигнала; $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ К}$ – заряд электрона; W – объем воздуха, прокачиваемого через полное сечение аспирационной камеры за единицу времени.

Для N_- можно записать похожее на (1) соотношение:

$$N_- = \frac{2U_-C_-}{eWT}. \quad (2)$$

Емкости C_+ и C_- , были нами непосредственно измерены, и они оказались равными $72 \pm 1 \text{ пФ}$.

Аспирационная камера счетчика Сапфир-3М для потока воздуха разделена на две равные части. Одна для измерения N_+ , другая для измерения N_- . Поэтому в формулах (1) и (2) в числителе появляется цифра 2.

Все легкие ионы накапливаются на собирающем электроде, увеличивая напряжение на емкости C . При увеличении напряжения до величины более 1 В, часть ионов отталкивается и не попадает на собирающий электрод. Используя соотношение (1) получим, что $U = 1 \text{ В}$ соответствует плотность аэроионов, равная $1.18 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, если $C = 7.2 \times 10^{-11} \text{ ф}$; $W = 230 \text{ л мин}^{-1} = 3.83 \times 10^3 \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$; $T = 2 \text{ с}$.

Диапазон измерений счетчика Сапфир-3М составляет $10 \div 5 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$. Коэффициент $K(U)$ при плотностях, превышающих 10^5 см^{-3} , изменяется, учитывая не полный сбор аэроионов. Результаты измерений N_+ и N_- в подземных полостях находятся в пределах от 10^3 до $5 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$.

Условие полного сбора всех ионов, затянутых в аспирационную камеру, на собирающий электрод проверялось следующим образом. Исследовалась зависимость измеряемых плотностей положительных N_+ и отрицательных N_- аэроионов от электрического напряжения на отклоняющих ионы пластинах при стабильном источнике ионов в диапазоне от 10^3 до $5 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$. Эта зависимость не линейна, при напряжении выше 80 В величины N_+ и N_- перестают меняться, входят в насыщение. Стандартное значение напряжения в приборе Сапфир-3М составляет 160 В, следовательно, в этом диапазоне плотностей собираются все ионы. Следует отметить, что мы имели дело в этих опытах только с легкими ионами. Мы не ожидаем при измерениях в подземных полостях обнаружить тяжелые ионы. Поэтому мы будем исходить из того, что в подземных полостях при измерениях прибором Сапфир-3М все затянутые

в аспирационную камеру ионы попадают на собирающий электрод.

3. ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ ПЛОТНОСТИ АЭРОИОНОВ

При изготовлении счетчика Сапфир-3М на предприятии-изготовителе производят его настройку, устанавливая номинальные значения W , T и K прибора.

Затем измеряют погрешность измерения N_+ и N_- методом непосредственного сравнения с эталонным счетчиком аэроионов [ГОСТ Р 8.844 – 2013]. Эталон концентрации аэроионов имеется во ФГУП “ВНИИФТРИ”, и эталонные счетчики получают, калибруя их при помощи этого эталона. Сам эталон имеет определенную погрешность, и процедура калибровки увеличивает погрешность эталонного счетчика до 20% при доверительной вероятности 0.95 [ГОСТ Р 8.844 – 2013]. Процедура сравнения с эталонным счетчиком аэроионов [ГОСТ Р 8.844 – 2013], в свою очередь, увеличивает погрешность проверяемого счетчика, и в паспорте к нему появляется запись, что погрешность проверенного прибора не более 50% при доверительной вероятности 0.95.

Этот результат для наших исследований коэффициента униполярности в подземных полостях недостаточно информативен.

4. ПОГРЕШНОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрим коэффициент униполярности как пример относительных измерений. Его можно записать следующим образом, используя (1) и (2) и при условии, что $T_+ = T_-$, $C_+ = C_-$ (или достаточно близко):

$$\frac{N_+}{N_-} = \frac{U_+}{U_-}. \quad (3)$$

Если измерительная электроника в обоих каналах настроена одинаково, то погрешность измерения коэффициента униполярности окажется достаточно малой.

Настройка обоих каналов была проверена экспериментально. Для этого был изготовлен электронный блок управления (Блок), который располагался вне Сапфира-3М. Идея создания Блока заключалась в следующем: зарядить емкость C_+ положительного канала до точно известного напряжения и измерить это напряжение электронной положительного канала Сапфира 3-М. Затем зарядить емкость C_- отрицательного канала до точно такого же напряжения, но другой полярности, измерить это напряжение электроникой отрицательного канала Сапфира-3М и сравнить с данными измерения в положительном канале.

Блок включает: стабилизированный источник постоянного напряжения (аккумулятор), резисторный делитель напряжения, коммутатор и реле Блока, замыкание и размыкание контактов которого синхронизируется с размыканием и замыканием контактов реле (геркона) Сапфира-3М.

После включения Блока управления выбирается определенная величина положительного или отрицательного напряжения с помощью коммутатора и резисторного делителя напряжения. Затем через контакт реле Блока емкость C заряжается до выбранной величины напряжения в интервале времени, когда емкость C отсоединена контактом реле Сапфира-3М от измерительной электроники Сапфира-3М. Далее заряженная емкость C через контакт реле Блока управления отключается от резисторного делителя напряжения и через контакт реле Сапфира-3М подключается к электронике Сапфира-3М. При этом емкость C начинает разряжаться через входное сопротивление усилителя Сапфира-3М, и параметры образовавшегося импульса измеряются Сапфиром-3М. Один раз в 4 с фиксируются показания Сапфира-3М. Таким способом последовательно проверялась электроника Сапфира-3М как положительного, так и отрицательного каналов регистрации.

Оказалось, что в одном экземпляре счетчика Сапфир-3М отличие в показаниях положительного и отрицательного канала регистрации при заряде емкости одним и тем же напряжением не более 3% при доверительной вероятности 68%. Значит относительные величины и, в частности, коэффициент униполярности, измеряется с погрешностью не более 3%. Для другого экземпляра счетчика Сапфир-3М обнаружено систематическое отличие в 15%. Но введение поправки в измерение одного из каналов позволит также измерять относительные величины с погрешностью ~3% при доверительной вероятности 68%, что вполне достаточно для проведения исследований положительного избытка аэроионов в неветилируемых помещениях.

5. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ СЧЕЧИК АЭРОИОНОВ

При повышенной влажности показания счетчика аэроионов Сапфир-3М могут значительно изменяться. Для получения достоверных результатов измерений в условиях повышенной влажности подземных помещений было обнаружено, что периодически требуется прогревать аспирационную камеру счетчика феном для того, чтобы сохранять поверхность изоляторов аспирационной камеры в неизменном состоянии. В результате, коммерческий образец счетчика аэроионов был модернизирован путем помещения его аспирационной камеры в нагреватель. Нагреватель

повышает температуру камеры в работающем приборе на 10° выше температуры воздуха в исследуемом подземном помещении и помогает избавиться от оседания влаги на изоляторах.

Такая доработка коммерческого образца позволила создать автономную станцию для дистанционного долговременного наблюдения за плотностью аэроионов. Станция состоит из модифицированного счетчика аэроионов Сапфир-3М, источника бесперебойного питания и компьютера, соединенного с линией интернета. Создание такой автономной станции, позволяющей производить долговременные измерения плотностей аэроионов обоих знаков во влажных помещениях, открывает новые возможности в исследовании изменчивости плотностей аэроионов обоих знаков и зависимости их от различных факторов, а также позволит ответить на вопрос о знаке и величине плотности избытка заряда в грунте, окружающем подземное помещение.

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ПЛОТНОСТЯХ АЭРОИОНОВ В ПОДЗЕМНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ

Изучение плотностей аэроионов проводилось в различных местах. Здесь мы приведем данные, полученные в подземной лаборатории НИИЯФ МГУ (глубиной 12.7 м) и в меднорудной шахте Пюхясалми (Pyhäsalmi, Финляндия) до глубин порядка 1 км под плоской поверхностью. Повсеместно на разных глубинах (и даже в закрытых помещениях на поверхности земли) зарегистрирован избыток положительных аэроионов, плотность которого лежала в диапазоне 1000–10000 ионов/см³. Важно отметить, что нам не удалось найти ни одного подземного закрытого помещения, в котором отсутствует избыток положительного заряда (здесь мы сделаем важное уточнение: в этой статье мы приведем данные только для подземных помещений, не имеющих внутри себя искусственных интенсивных источников ионов).

На рисунке 1 приведено фото автономной Станции, расположенной в подземной неветилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ на глубине 12.7 м. Под потолком расположен модифицированный счетчик ионов Сапфир-3М. Он прокачивает воздух через аспирационную камеру горизонтально в направлении вдоль стены. В правом нижнем углу виден цифровой термометр, измеряющий температуру нагреваемой аспирационной камеры счетчика ионов и температуру окружающего воздуха. Температура воздуха в лаборатории равна 19°C , температура аспирационной камеры работающего прибора составляла 29°C . Результаты измерений передаются по линии интернета в лабораторию, расположенную на поверхности. Видно, что стены лаборатории влажные. В лабо-

ратории в летний период работает осушитель, который включается каждые 8 мин и поддерживает влажность $\sim 55\%$.

На рисунке 2 приведено фото модифицированного счетчика ионов Сапфир-3М, расположение которого показано на рис. 1. На дисплее счетчика видны значения измеренных концентраций: отрицательно заряженных аэроионов $N_- = 2.69 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ и положительно заряженных аэроионов $N_+ = 3.09 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$. Это пример однократного измерения за время 4 с. За это время аэроионы собираются из объема в 3.8 л воздуха. Наблюдаемый здесь коэффициент униполярности равен $N_+/N_- = 1.15$. Но это не характерная величина коэффициента униполярности для данного расположения счетчика, так как фото было сделано в момент монтажа стенда, и двери в лабораторию были открыты. Однократные измерения плотностей аэроионов сильно флуктуируют. Мы считаем, что эти флуктуации связаны с одномоментным появлением большого количества ионов от распада радона или его дочерних атомов в непосредственной близости к аспирационной камере. Также флуктуации могут отражать тот факт, что ионы и радон поступают в лабораторию порциями, т.е. приносятся пузырьками газа из окружающего грунта.

На рисунке 3 приведено фото счетчика ионов Сапфир-3М в подземной лаборатории Центра подземных исследований (CUPP) университета Оулу (Oulu, Финляндия) в медной шахте Пюхясалми (Pyhäsalmi) на глубине 1440 м в слабо вентилируемом помещении размером $5 \times 6 \times 6 \text{ м}^3$. Здесь воздух прокачивается через аспирационную камеру в направлении из центра лаборатории перпендикулярно к стене. На дисплее счетчика видны значения измеренных концентраций: отрицательно заряженных аэроионов $N_- = 2.66 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ и положительно заряженных аэроионов $N_+ = 4.18 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$. Наблюдаемый здесь коэффициент униполярности равен $N_+/N_- = 1.57$. Опять отметим, что это однократное измерение за время 4 с.

На верхней части рис. 4 приведена зависимость плотности аэроионов обоих знаков от времени. Показаны результаты измерения с 17 до 25 октября 2021 г. в подземной неветилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ глубиной 12.7 м. Счетчик был расположен у потолка. Расположение счетчика показано на рис. 1. Все данные усреднены в интервале 10 мин. Пунктирная кривая серого цвета показывает плотность аэроионов положительного заряда. Черная штриховая кривая — отрицательного заряда. Сплошная кривая черного цвета — зависимость атмосферного давления от времени. На нижней части рис. 4 приведена зависимость коэффициента униполярности



Рис. 1. Фото автономного стенда по долговременному наблюдению за избытком положительно заряженных аэроионов, расположенного в подземной неветилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ глубиной 12.7 м. Под потолком расположен модифицированный счетчик ионов Сапфир-3М.

от времени. Работал осушитель с периодом 8 мин и обеспечивал влажность 55%.

На графике видно, что регистрируется избыток аэроионов положительного заряда для объема, расположенного у стены и у потолка лаборатории. Для утверждения, что избыток регистрируется повсеместно в подземной лаборатории, важно измерить величину избытка в других объемах лаборатории.

На верхней части рис. 5 приведена зависимость плотности аэроионов обоих знаков от времени. Показаны результаты измерения с 15 ч 10 октября до 14 ч 13 октября 2021 г. в подземной неветилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ глубиной 12.7 м. Здесь от 18 ч 11 октября и до 18 ч 12 октября 2021 г. измерения плотности аэроионов проводились на уровне пола, а в остальное время — под потолком в положении, показанном на рис. 1. Данные усреднены в интервале 10 мин. Пунктирная кривая серого цвета показывает плотность аэроионов положительного заряда. Черная штриховая кривая — отрицательного заряда.

На нижней части рис. 5 приведена зависимость коэффициента униполярности от времени. Работал осушитель с периодом 8 мин.

На верхней части рис. 6 приведена зависимость плотности аэроионов обоих знаков от времени в подземной неветилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ на глубине 12.7 м. Здесь от 18:25 до 18:43 21 апреля 2022 г. измерения плотности аэроионов проводились на уровне центра лаборатории у стены, и счетчик ионов забирал воздух в направлении вдоль стены. В момент 18:43 счетчик был дистанционно повернут на 90° и далее стал забирать воздух из центра лаборатории. Данные приведены без усреднения. Пунктирная кривая серого цвета показывает плотность аэроионов положительного заряда. Черная штриховая кривая — отрицательного заряда. На нижней части рис. 6 приведена зависимость коэффициента униполярности от времени. Осушитель не работал, влажность составляла 53%.

Везде и всегда наблюдался избыток аэроионов положительного заряда: на уровне пола, под по-



Рис. 2. Фото модифицированного счетчика ионов Сапфир-3М, расположение которого показано на рис. 1. На дисплее счетчика видны значения измеренных концентраций: отрицательно заряженных аэроионов — $2.69 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ и положительно заряженных аэроионов — $3.09 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$.

толком, в центре лаборатории и в центре у стены. Мы ожидали, что из-за перемешивания воздуха (в лаборатории работают вентиляторы приборов, в частности, вентилятор Сапфира) мы можем не увидеть разницы в показаниях у пола и у потолка. Однако разница наблюдается. Это означает, что перемешивание воздуха не достаточно быстрое по сравнению с диффузией и дрейфом зарядов и ионов. Разная величина плотности аэроионов отрицательного знака под потолком и на уровне пола объясняется наличием слабого электрического поля Земли, направленного вниз, которое заставляет рожденные отрицательные ионы дрейфовать к потолку, там накапливаться и рекомбинировать или участвовать в процессе обмена ионами на границе воздух — грунтовые воды. Рожденные (или пришедшие из окружающего грунта) в подземной лаборатории положительные аэроионы (точнее положительный заряд) распространяются главным образом за счет диффузии, скорость которой выше скорости диффузии отрицательных аэроионов. Этим объясняется равенство

плотностей положительных аэроионов у потолка и у пола. Также мы наблюдаем действие электрических сил отталкивания для ионов положительного избытка — их меньше на периферии по сравнению с их концентрацией в центре (рис. 6), так как силы отталкивания на периферии больше. Отрицательных ионов в центре также больше, так как на них действует электрическая сила притяжения к положительным ионам. Высокая диффузионная подвижность положительного заряда во влажной среде приводит к стремлению положительного заряда выравнять концентрацию положительного заряда в объеме лаборатории. В нашем случае для положительного заряда это основной эффект, а действие электрических сил на положительный заряд слабее. Заметим, что был повторен опыт с дистанционным поворотом счетчика через несколько дней, когда повысилась влажность. В результате наблюдалась для положительных ионов значительно меньшая разность, что соответствует представлению об увеличении подвижности положительных ионов при повы-



Рис. 3. Фото серийного счетчика ионов Сапфир-3М, расположенного в подземной лаборатории Центра подземной физики частиц (CUPP) университета Оулу (Финляндия) в медной шахте Пюхясалми (Puhäsalmi) на глубине 1440 м. На дисплее счетчика видны значения измеренных концентраций: отрицательно заряженных аэроионов – $2.66 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ и положительно заряженных аэроионов – $4.18 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$.

шении влажности. Для отрицательных ионов влияние повышения влажности практически не заметно.

Рисунок 6 интересен также тем, что здесь данные приведены без усреднения, т.е. каждая точка соответствует времени собирания зарядов в течение 2 с. Видны характерные флуктуации. При усреднении эти флуктуации уменьшаются. Видно, что при усреднении за 10 мин они практически пропадают.

Рисунок 7 показывает влияние работы осушителя на плотность аэроионов. Осушитель располагается на полу и включается с периодом 8 мин в зимнее время. Осушитель обеспечивал влажность в 55%. На рисунке 7 показана подробно часть рис. 4 от 18:00 до 20:30 18 октября 2021 г. Измерения плотности аэроионов проводились под потолком в подземной неветилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ. Здесь данные усреднены в интервале минуты (по 15 измерениям). Пунктирная кривая серого цвета соответствует положительному заряду. Черная штриховая кривая – отрицательному заряду. Периодическое изменение плотности аэроионов отрицательного знака определяется работой осушителя с периодом 8 мин. На полу скапливается радон, и рожденные у пола отрицательные аэроионы успевают сдрейфовать

вверх за счет электрического поля Земли за время, значительно меньшее 8 мин. Плотность же положительно заряженных аэроионов на рис. 7 не реагирует на работу осушителя несмотря на высокую подвижность положительного заряда во влажной среде. Это наблюдение можно объяснить тем, что у потолка мы не имеем дело с положительными ионами, сдрейфовавшими снизу против поля, а имеем дело с ионами тока положительного заряда, текущего с потолка вниз, в пол. Если наблюдать влияние работы осушителя на уровне центра лаборатории, то мы обнаружим изменения в плотности аэроионов обоих знаков. Этот опыт подтверждает, что в конденсированной фазе растворяется радон и удаляется из лаборатории.

На рисунке 8 также показана зависимость плотности аэроионов обоих знаков от времени. Измерения проводились с 03 до 19 декабря 2021 г. в подземной неветилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ глубиной 12.7 м. Измерения проводились у потолка. Все данные усреднены в интервале 10 мин. Пунктирная кривая серого цвета соответствует плотности аэроионов положительного заряда. Черная штриховая кривая – отрицательного заряда. Сплошная кривая – зависимость атмосферного давления от времени. Полыми квадратиками показаны результаты измерения

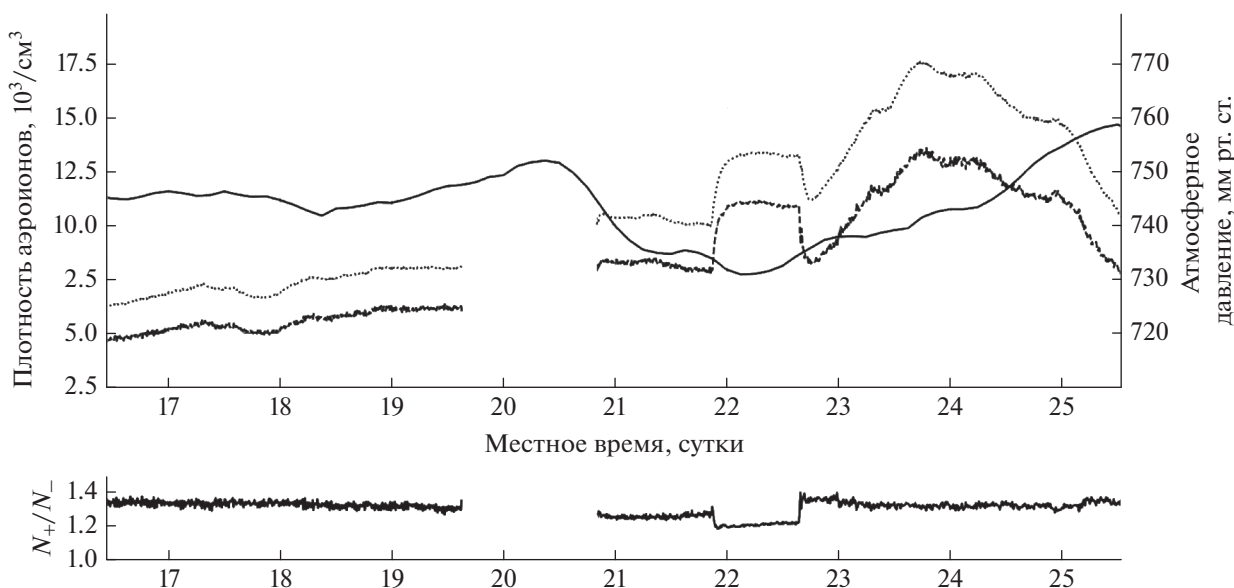


Рис. 4. Зависимость плотности аэроионов обоих знаков от времени. Измерения проводились с 17 до 25 октября 2021 г. в подземной невентилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ глубиной 12.7 м. Расположение счетчика показано на рис. 1. Данные усреднены в интервале 10 мин. Пунктирная кривая серого цвета – плотность аэроионов положительного заряда. Черного цвета – отрицательного заряда. Сплошная кривая черного цвета – зависимость атмосферного давления от времени.

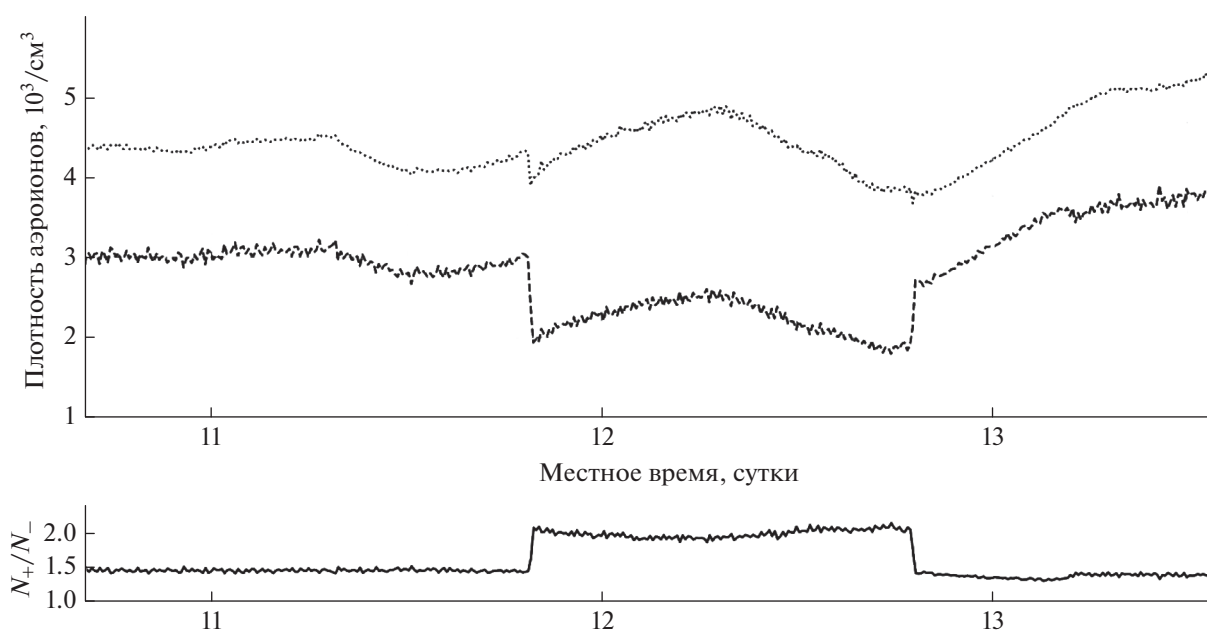


Рис. 5. Зависимость плотности аэроионов обоих знаков от времени. Здесь от 18 ч 11 октября и до 18 ч 12 октября 2021 г. измерения плотности аэроионов проводились на уровне пола, а в остальное время под потолком подземной невентилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ на глубине 12.7 м. Данные усреднены в интервале 10 мин. На верхней части рисунка пунктирная кривая серого цвета – плотность аэроионов положительного заряда; черная штриховая кривая – отрицательного заряда. Флуктуации данных определяются периодической работой осушителя с периодом 8 мин. На нижней части рисунка приведена зависимость коэффициента униполярности от времени.

активности радона у пола лаборатории. Нижний рисунок – зависимость от времени коэффициента униполярности. Осушитель не работал, влажность составляла от 44 до 46%.

Обнаружена зависимость плотностей положительных и отрицательных аэроионов от атмосферного давления. Давление, показанное на рисунках 4 и 8, взято с сайта метеостанции Москвы.

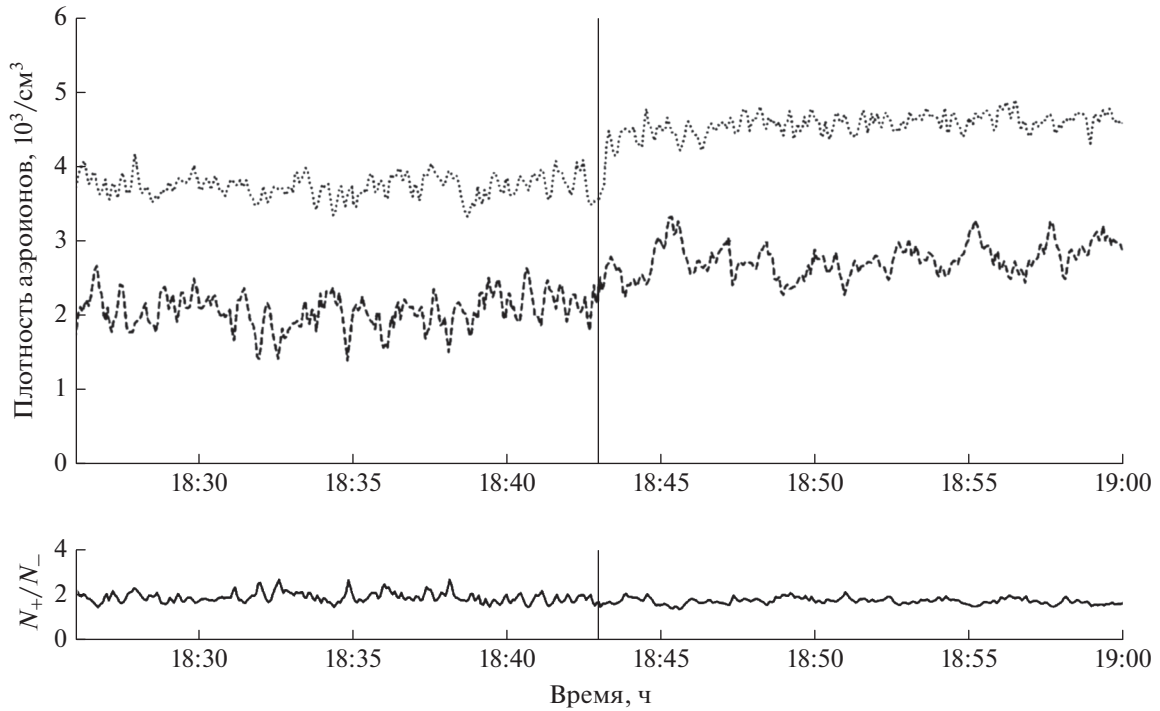


Рис. 6. На верхней части рисунка приведена зависимость плотности аэроионов обоих знаков от времени в подземной неветилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ глубиной 12.7 м. Здесь от 18:25 до 18:43 21 апреля 2022 г. измерения плотности аэроионов проводились на уровне центра лаборатории у стены, и счетчик ионов забирал воздух в направлении вдоль стены. В момент 18:43 счетчик был дистанционно повернут на 90° и далее стал забирать воздух из центра лаборатории. Данные приведены без усреднения. Пунктирная кривая серого цвета – плотность аэроионов положительного заряда. Черная штриховая кривая – отрицательного заряда. На нижней части рисунка приведена зависимость коэффициента униполярности от времени. Осушитель не работал.

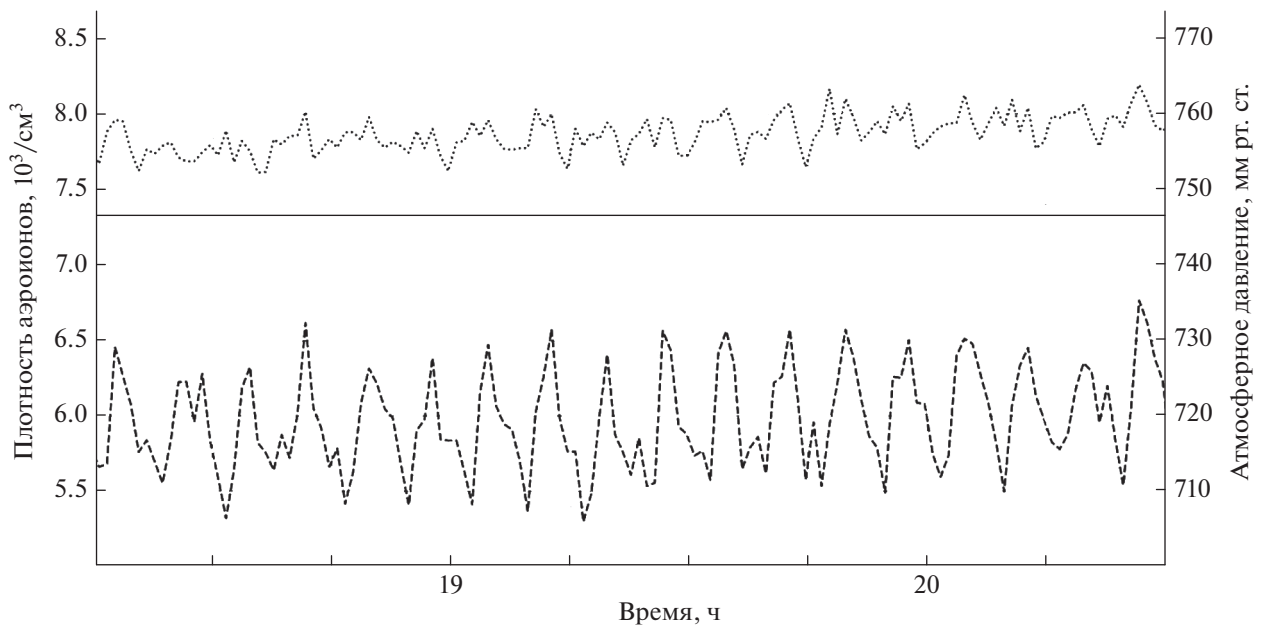


Рис. 7. Показана подробно часть рис. 4 от 18:00 до 20:30 18 октября 2021 г., чтобы продемонстрировать работу осушителя, расположенного на полу. Измерения плотности аэроионов проводились под потолком в подземной неветилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ глубиной 12.7 м. Данные усреднены в интервале одной минуты (по 15 измерениям). Пунктирная кривая серого цвета соответствует положительному заряду. Черная штриховая кривая – отрицательному заряду. Средняя сплошная кривая – зависимость атмосферного давления от времени. Периодическое изменение плотности аэроионов отрицательного знака определяется работой осушителя с периодом 8 мин.

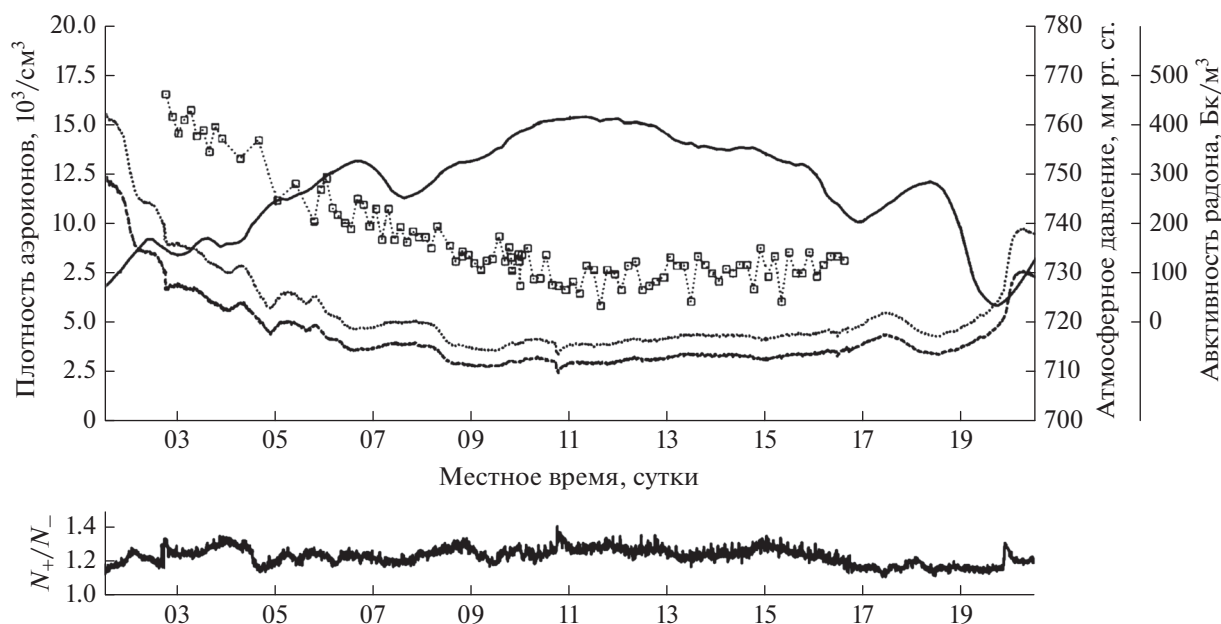


Рис. 8. Зависимость плотности аэроионов обоих знаков от времени. Измерения проводились с 03 до 19 декабря 2021 г. в подземной неветилируемой лаборатории НИИЯФ МГУ глубиной 12.7 м. Измерения проводились у потолка. Все данные усреднены в интервале 10 мин. Пунктирная кривая серого цвета – плотность аэроионов положительного заряда. Черная штриховая кривая – отрицательного заряда. Сплошная кривая – зависимость атмосферного давления от времени. Полыми квадратиками показаны результаты измерения активности радона у пола лаборатории. Нижний рисунок – зависимость от времени коэффициента униполярности. Осушитель не работал.

Оно приблизительно на 1% выше по сравнению с давлением, измеренным нами в лаборатории НИИЯФ МГУ, расположенной в наивысшей точке Москвы. При понижении давления мы наблюдаем возрастание плотностей аэроионов. Возрастание плотностей аэроионов наблюдается также и при возрастании давления после его падения. На рисунке 4 с 20:00 21 октября по 16:00 22 октября 2021 г. при быстром падении давления ниже 734 мм рт. ст. наблюдается быстрое увеличение плотностей аэроионов и быстрое возвращение плотностей к первоначальным значениям при повышении давления выше 734 мм рт. ст. На рисунке 8 также при понижении давления 20 декабря 2021 г. можно наблюдать быстрое увеличение плотностей аэроионов, а при повышении давления 02 декабря 2021 г. – быстрое уменьшение плотностей аэроионов.

Мы наблюдаем и другое явление, связанное с изменением давления: при возрастании давления выше 735 мм рт. ст. некоторое время наблюдается возрастание плотностей аэроионов, а затем понижение плотностей. Мы наблюдаем это явление на рис. 4 после 16:00 22 октября 2021 г.

Эти зависимости от давления могут быть поняты с привлечением процесса дегазации Земли, в котором носителем газа являются пузырьки газа. В состав газа пузырьков входит радон и гидроксоний. Пузырьки являются закрытой поло-

стью в земной коре и несут радон и избыток положительного заряда вверх. Если давление быстро падает ниже 735 мм рт. ст., то мы наблюдаем быстрое образование пузырьков и быстрый их выход из стен лаборатории. Эффект похож на открывание бутылки с газированной водой. Явление быстрого уменьшения плотностей аэроионов мы интерпретируем как процесс растворения радона в водной фазе при возрастании давления.

Часть пузырьков застревает в узких щелях. При последующем возрастании давления пузырьки уменьшаются в размере и могут пройти в узкую щель, поэтому мы продолжаем наблюдать некоторое время выход пузырьков.

На рисунке 8 также приведена зависимость активности радона от времени, измеренная прибором "Альфарад плюс". Видно, что активность радона коррелирует с плотностью аэроионов обоих знаков. Такая корреляция соответствует представлению о том, что ионизация воздуха альфа-частицами от распада радона и его дочерних элементов является основным источником ионов в замкнутых подземных полостях.

7. ПРОСТОЙ ОПЫТ

Здесь мы опишем опыт, демонстрирующий результат действия локального источника ионов внутри замкнутого помещения. Пусть прибор Сапфир-3М включен в просторном лаборатор-

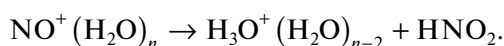
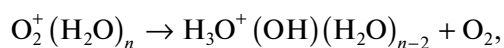
ном помещении на столе на втором этаже при выключенной вентиляции, закрытых окнах и дверях, наблюдатель не двигается. Подождем, когда установятся показания прибора. Установившееся значение плотности положительных аэроионов всегда больше плотности отрицательных. Направим поток водного пара из увлажнителя в область перед всасывающим воздухом отверстием счетчика аэроионов. Мы ожидали наблюдать увеличение плотности как положительных, так и отрицательных ионов. Однако наблюдается быстрое возрастание (в течение десятков секунд) плотности отрицательных аэроионов, а положительные ионы практически пропадают. Похожая картина возникает, если организовать достаточно интенсивный локальный источник радона.

Эта удивительная картина объясняется высокой скоростью диффузии (перемещения в пространстве) положительного заряда по сравнению с отрицательными аэроионами.

В случае испарения воды гидроксоний появляется из-за его постоянного присутствия в воде. При столкновении молекулы гидроксония с молекулой воды или с маленькой капелькой в воздухе велика вероятность перехода протона от молекулы гидроксония к молекуле воды. Это явление называется эстафетным механизмом Гротгуса (Grotthuss), который может заставить заряд двигаться даже против направления слабого электрического поля. Этот механизм объясняет быструю диффузию положительного заряда в водосодержащих средах по сравнению с диффузией отрицательных ионов.

Положительные комплексы, в которых нет гидроксония, нейтрализуются большим количеством присутствующих отрицательных ионов, не покинувших наш объем из-за малой подвижности. Отметим, что в работах [Mikiver, 2017; Schiessling et al., 2018] замечен эффект увеличения плотности отрицательных аэроионов при увеличении влажности, но объяснение этого эффекта не приводится.

В случае радона в нашем объеме за счет ионизации в ряду других рождаются аэроионы O_2^+ и NO^+ , которые реагируют с атмосферной влагой, образуя комплексные ионы. Далее происходит реакция внутри этих комплексных ионов, сущность которой состоит в том, что положительно заряженные ионы кислорода и окиси азота отнимают электрон от водорода воды, образуя гидроксоний [Viggiano and Arnold, 2017]:



Этот процесс протекает очень быстро, и в результате во влажной среде диффундирует не сама молекула гидроксония, а положительный заряд.

Этот простой опыт показывает, что положительные аэроионы (точнее, положительный заряд) распространяются во влажной среде главным образом за счет диффузии, скорость которой выше скорости диффузии отрицательных аэроионов.

8. ПРОСТЫЕ ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ

Ионы в подземных полостях рождаются преимущественно из-за распада ^{222}Rn , накапливающегося в воздухе полости у пола, и его дочерних элементов, в основном осевших на пол. Также ионы обоих знаков рождаются из-за наличия влаги в воздухе помещения и от гамма-излучения, выходящего из стен. Радон – тяжелый газ, подхватывается легкими газами-носителями, которые поступают в полость в виде пузырьков. Пузырьки образуются в поровой водной среде, которая насыщена растворенными газами. Пузырьки приносят не только радон, а также и ионы, перешедшие в газовую фазу при образовании и развитии пузырьков в поровой водной среде, например, гидроксоний. Роль процессов испарения и конденсации на границе между поровой водной средой стен и газовой атмосферы полости также может проявиться.

В реальных условиях полость находится в слабом электрическом поле коры Земли, которое вызывает дрейф ионов, рожденных в полости и привнесенных в полость. Теллурический ток (и промышленные токи заземления) обтекают полость, так как сопротивление воздуха значительно выше сопротивления влажного грунта, и создают дополнительное электрическое поле в полости, направленное в направлении тока.

Стены подземной полости несут электрический заряд, величина и знак которого является предметом исследования. Если заряд равномерно распределен в грунте вокруг полости, то на ион, находящийся внутри полости, действует результирующая сила от этого заряда грунта, равная нулю.

Далее мы будем рассматривать плотности отрицательных ионов N_- и положительных ионов N_+ в некотором воздушном объеме нашей лаборатории.

Уравнения для плотностей ионов могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dN_-}{dt} &= Q_- - a_{ii}N_-N_+, \\ \frac{dN_+}{dt} &= Q_+ - a_{ii}N_-N_+, \end{aligned} \quad (4)$$

где $Q = Q_\gamma + Q_{Rn} + Q_{Po} + Q_{H_2O} + Q_{in} - Q_{out}$ – скорость генерации в единице объема ионов (индексы \pm не показаны) за счет гамма-излучения породы (Q_γ), α -частиц от распада ^{222}Rn (Q_{Rn}), его дочерних элементов (Q_{Po}), за счет взаимодействия паров воды (Q_{H_2O}), а также скорость входа ионов в выделенный объем (Q_{in}) из окружающего пространства и скорость выхода из выделенного объема (Q_{out}), что важно в случае наличия дрейфа во внешнем электрическом поле, быстрой диффузии положительного заряда и наличия внешнего источника ионов, $\alpha_{ii} = 1.4 \times 10^{-6} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ [Аверин и др., 1976] – коэффициент ион-ионной рекомбинации в воздухе при нормальных условиях.

Радон при распаде выделяет альфа-частицу с энергией $E = 5.489 \text{ МэВ}$ [Аверин и др., 1976]. На образование пары ионов в воздухе альфа-частица расходует 34.7 эВ [Аверин и др., 1976]. Следовательно, при распаде ^{222}Rn рождается 1.58×10^5 пар ионов. Два дочерних элемента радона (^{218}Po и ^{214}Po) также испускают при своем распаде по альфа-частице в течение короткого времени после распада радона, они рождаются в виде ионов, которые быстро обрастают молекулами воды, падают на пол, где и распадаются. Образовавшиеся ионы частично рекомбинируют. Процессы с образованием аэрозолей не рассматриваются, так как их концентрация в исследуемых нами помещениях была мала.

Сделаем оценку ожидаемых плотностей аэроионов для стационарного случая $dN_-/dt = 0$ и сравним с экспериментальными данными. Тогда

$$Q_- = Q_+ = \alpha_{ii} N_- N_+. \quad (5)$$

Рассмотрим идеализированный простейший случай, когда $Q = Q_{Rn} + Q_{Po}$, отсутствуют дрейф и диффузия аэроионов и перемешивание $Q_{in} = Q_{out} = 0$. Из рисунка 8 возьмем для анализа два момента времени 00:00 03 декабря и 00:00 11 декабря 2021 г. Измеренная активность радона для этих моментов равна 400 и 100 Бк/м³ соответственно. Рассмотрим объем у пола, так как активность радона измерена у пола. В этом случае дочерние элементы заведомо упадут на пол и половина их распадов не будет ионизировать воздух.

Из (5) получим для момента 00:00 03 декабря 2021 г. $N_- = N_+$ (03.12.2021) = $9.48 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$, из рис. 8 экспериментальные значения для этого момента $N_- = 7 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$, $N_+ = 9 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$. Для момента 00:00 11 декабря 2021г. получим $N_- = N_+$ (11.12.2021) = $4.75 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$, из рис. 8 экспериментальные значения $N_- = 3 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$, $N_+ = 4 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$. Сравнение оценки и экспериментальных данных показывает, что эти величины близки, но также очевидно, что приближение отсутствия дрейфа и диффузии аэроионов, принятое для

оценки, не выполняется в реальности. Эти эффекты играют значительную роль. Здесь мы сравниваем активность радона, измеренную у пола, с плотностями аэроионов, измеренными у потолка. Радон – тяжелый газ, с периодом полураспада 3.8 сут, поэтому он должен накапливаться у пола. Логично рассуждать, что мы регистрируем у потолка отрицательные аэроионы, сдрейфовавшие снизу, и можем ожидать, что их плотность окажется меньше нашей оценки из-за их рекомбинации за время дрейфа вверх. Похожее рассуждение можно применить и для положительного заряда, но он перемещается за счет диффузии из области большей концентрации против электрического поля. Сделанная оценка ожидаемой плотности аэроионов при известной активности радона показывает, что ионизация воздуха альфа-частицами от распада радона и его дочерних элементов является основным источником аэроионов в закрытых подземных полостях.

Оценим время жизни τ аэроиона в лаборатории. Для этого найдем решение уравнения (4) для N_- и условий: $N_-(t=0) = N_0$, $Q_-(t > 0) = 0$, $N_+(t > 0) = \text{const} = N_+$: $N_-(t)/N_0 = \exp(-t/\tau)$, где $\tau = 1/\alpha_{ii} N_+$. Подставив значение $N_+ = 4 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$, получим $\tau = 3$ мин. Мы видим, что время достаточно велико, чтобы аэроион, родившись у пола в электрическом поле величиной в доли вольта на метр имел шанс сдрейфовать на пару метров вверх.

9. ДИСКУССИЯ

Изначально мы рассчитывали обнаружить в подземных полостях избыток плотности отрицательно заряженных аэроионов, так как для атмосферного электрического поля земная кора является отрицательно заряженным электродом. Логика была следующей: если земная кора заряжена отрицательно, то стены подземной полости могут иметь отрицательный заряд. В воздухе подземной полости должно рождаться равное количество положительных и отрицательных аэроионов в процессе ионизации воздуха заряженными радиоактивными частицами и другими источниками. Положительно заряженные аэроионы при столкновении с отрицательно заряженными стенами должны рекомбинировать, и воздух полости должен обогащаться отрицательным зарядом, таким образом мы можем регистрировать в невентилируемых подземных полостях избыток отрицательных аэроионов. Мы же обнаружили обратное явление: воздух полости обогащен положительным зарядом. Этот эффект требует объяснения.

В работе [Безруков и др., 2018] предлагалась новая модель электрического поля Земли, которая базируется на альтернативной модели Земли: богатая водородом Земля и предсказывает наличие избытка положительного заряда в коре Зем-

ли, и наличие отрицательно заряженного слоя под корой Земли. Именно эта модель подтолкнула нас к началу экспериментального исследования плотностей аэроионов в закрытых помещениях в коре Земли. Результаты наших исследований, приведенные в данной статье, не противоречат модели электрического поля богатой водородом Земли. А именно, мы наблюдаем избыток положительного заряда в закрытых подземных помещениях, а также проявление наличия в коре Земли электрического поля, направленного вниз, наличия теллурического тока положительного заряда, текущего вертикально вниз. Все эти явления были предсказаны в работе [Безруков и др., 2018].

Основной задачей, для решения которой был создан модифицированный счетчик аэро-ионов, является измерение величины плотности избытка положительного заряда в грунте. Решению именно этой задачи будут посвящены наши дальнейшие исследования.

10. ВЫВОДЫ

1. Получена величина погрешности относительных измерений плотностей аэроионов (в частности, коэффициента униполярности) счетчиком аэроионов Сапфир-3М, равная 3%, что позволяет надежно обнаружить избыток положительно заряженных аэроионов в подземных полостях и изучать поведение этого избытка.

2. Дополнительный нагрев аспирационной камеры счетчика аэроионов Сапфир-3М позволил провести долговременные измерения в условиях повышенной влажности подземных полостей. Был создан модифицированный образец счетчика аэроионов Сапфир-3М, который в стандартном корпусе содержал компактный нагреватель и датчик температуры аспирационной камеры.

3. Приведены результаты исследования плотностей аэроионов в подземной лаборатории НИИЯФ МГУ и в медной шахте Пюхясалми. Во всех проведенных измерениях в невентилируемых подземных помещениях (в случае отсутствия интенсивного локального источника ионов в них) зарегистрирован избыток положительных аэроионов.

4. В невентилируемой подземной лаборатории НИИЯФ МГУ наблюдается зависимость плотности отрицательно заряженных аэроионов от вертикального расстояния от пола (накопление отрицательных ионов у потолка), что свидетельствует о наличии электрического поля в коре Земли, направленного вниз. Обнаружено отсутствие зависимости плотностей положительно заряженных аэроионов от расстояния от пола, при этом под потолком плотность положительных ионов остается выше плотности отрицательных.

5. Наблюдается зависимость плотности отрицательно заряженных аэроионов в горизонтальном направлении от расстояния от центра лаборатории до стены (накопление отрицательных ионов у центра), что является проявлением электрических сил притяжения положительных аэроионов, которые (при большой влажности) практически равномерно распределены по объему лаборатории, что свидетельствует об их большой подвижности. При этом всегда и везде плотность положительных ионов остается выше плотности отрицательных.

6. Обнаружена изменчивость во времени плотности как положительных, так и отрицательных аэроионов.

7. Обнаружена зависимость плотностей положительных и отрицательных аэроионов от атмосферного давления. Предложено объяснение этой зависимости на основе модели переноса радона и аэроионов в лабораторию пузырьками.

8. Экспериментально подтверждена корреляция плотностей аэроионов и активности радона в подземной полости. Оценка ожидаемой плотности аэроионов при известной активности радона показывает, что ионизация воздуха альфа-частицами от распада радона и его дочерних элементов является основным источником аэроионов в закрытых подземных полостях.

9. Предложен вариант объяснения избытка положительного заряда в подземных полостях как наличие избытка положительного заряда в коре Земли.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят академика И.И. Ткачёва за плодотворные дискуссии и поддержку, а также В.Б. Семикоза за возможность выступить на семинаре в ИЗМИРАН по теме данной статьи и за участие в дискуссии на этом семинаре. Большую помощь оказал Л.А. Кузьмичёв, предоставив возможность проводить измерения в подземной лаборатории НИИЯФ МГУ. Авторы выражают благодарность Тимо Энквист (Т.Т. Enqvist, Финляндия) за возможность сделать измерения в медной шахте Пюхясалми (Pyhäsalmi).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверин В.Г., Аронзон Б.А., Бабаев Н.С. и др. Таблицы физических величин. Справочник. Ред. И.К. Кикоин. М.: Атомиздат, 1008 с. 1976.
- ГОСТ Р 8.844 – 2013. Счетчики легких ионов. Аспирационные. Методика поверки. М.: Стандартинформ, 11 с. 2015.
- Безруков Л.Б., Заварзина В.П., Курлович А.С. и др. Об отрицательно заряженном слое электрического поля Земли // Докл. АН. Т. 480. № 2. С. 155–157. 2018. <https://doi.org/10.7868/S0869565218140050>

- Безруков Л.Б., Заварзина В.П., Карников И.С. и др. Интерпретация результатов измерения разности потенциалов в озере Байкал // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 5. С. 666–670. 2019. <https://doi.org/10.1134/S0016794019040059>
- Коротяев С.М., Шнеер В.С., Гайдаш С.П. и др. Эф-фект и предвестники землетрясения 27.08.2008 в вер-тикальной компоненте электрического поля в озере Байкал // Докл. АН. Т. 438. № 5. С. 683–686. 2011.
- Коротяев С.М., Буднев Н.М., Сердюк В.О. и др. Но-вые результаты мониторинга вертикальной компонен-ты электрического поля в озере Байкал на базе поверх-ность–дно // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 3. С. 406–418. 2015.
- Mikiver Andres. Supervisor: Joachim Schiessling. Mea-surements of Air Ion Concentrations and Electric Field Strengths for HVDC Applications. Master's Thesis 2017:204. Gothenburg, Sweden: Department of Materials and Manufacturing Technology. Chalmers University of Technology, 65 p. 2017. <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/251332/251332.pdf>
- Schiessling J., Mikiver A., Serdyuk Y.V. Dynamics of ion concentration in air affected by Applied DC electric field and humidity / 2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Cancun, Mex-ico, 21–24 October 2018. P. 207–210. 2018. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2018.8544836>
- Viggiano A.A., Arnold F. Ion chemistry and Composition of the Atmosphere. Handbook of Atmospheric Electrody-namics. V. I. Ed. Volland H. Boca Raton: CRC Press, P. 1–26. 2017. <https://doi.org/10.1201/9780203719503>
- Warden S., Bleier T., Kappler K. Long term air ion mon-itoring in search of pre-earthquake signals // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 186. P. 47–60. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.01.009>