

УДК 551.521

ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ^{222}Rn В НАЗЕМНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ УСЛОВИЯХ

© 2024 г. Ю. М. Гаврилюк¹, А. М. Гангапшев^{1,2, *}, А. М. Гежаев¹, В. В. Казалов¹,
В. В. Кузьминов^{1,2}, А. Х. Хоконов^{1,3}, Р. А. Этезов¹

¹Институт ядерных исследований РАН, г. Москва, Россия

²Кабардино-Балкарский государственный университет им Х.М. Бербекова, г. Нальчик, Россия

³Адыгейский государственный университет, г. Майкоп, Россия

*E-mail: gangapsh@list.ru

Поступила в редакцию 24.10.2023 г.

После доработки 24.01.2024 г.

Принята к публикации 26.01.2024 г.

Приведены результаты измерений активности ^{222}Rn и его дочерних продуктов распада в воздухе подземных лабораторий Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (БНО ИЯИ РАН) на разных расстояниях от входа. Измерения проводились с помощью цилиндрической воздушной импульсной ионной ионизационной камеры. Показано, что содержание радона в потоке проветриваемого воздуха в пределах точности измерений не зависит от длины пройденного пути, но увеличивается скачком в местах расположения источников выхода подземных газов и воды. Рассмотрены различные механизмы обогащения воздуха радоном. Изложена методика исследования и приведены результаты измерений выхода радона из скального грунта стен подземного помещения. Приведены результаты измерения содержания радона в воде различных наземных и подземных источников с помощью низкофонового гамма-спектрометра на базе полупроводникового детектора (ППД) из сверхчистого германия.

Ключевые слова: подземные низкофонные лаборатории, фон от радона и дочерних продуктов, вариации содержания радона в воздухе, импульсная ионная ионизационная камера, выход радона из стен помещения, долговременный мониторинг.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724060059>, **EDN:** RGKIAL

1. ВВЕДЕНИЕ

В практике проведения низкофонных экспериментов заметное место занимает проблема выявления и устранения летучей компоненты радиоактивного фона, создаваемого распадами ^{222}Rn и его дочерних продуктов распада (д.п.р.) в воздушной среде. ^{222}Rn является промежуточным радиоактивным летучим изотопом радиоактивного ряда ^{238}U . Центральным элементом системы контроля фоновых характеристик воздушной среды является детектор активности радона. Оптимальным представляется детектор, использующий воздух в качестве рабочего вещества. Он должен обладать достаточно большим объемом для обеспечения высокой чувствительности и хорошим энергетическим разрешением для того, чтобы разделить пики α -частиц от распада ^{222}Rn и дочерних ^{218}Po , ^{214}Po и других α -активных изотопов, одновременно присутствующих в пробе.

Задача мониторинга содержания радона в воздухе, почве и воде является актуальной в различных областях науки, например, в эксперименте Дая Бэй (Daya Bay) по изучению осцилляции реакторных нейтрино [Chu, 2016], в подземных низкофонных лабораториях Конфранк (Canfranc Underground Laboratory), в которых проводятся эксперименты по поиску темной материи, безнейтринного двойного бета-распада и пр. [Amaré, 2022]. В геофизике и экологии эта задача является актуальной в различных работах по изучению зависимости вариации содержания радона в различных средах от различных геологических (вулканическая и сейсмическая активность, аномалии) и технологических процессов (АЭС, различные полигоны и пр.). В работе [Езимова, 2022] представлены результаты работы по локализации и изучению Четдинской радоновой аномалии. Методика измерений объемной активности радона для платформенных

областей представлена в работе [Удоратин, 2020]. Актуальной задачей является мониторинг содержания радона в поверхностной воде океанов [Chunqian, 2022]. В различных работах изучают вариации радона в воздухе или грунте с целью возможной сигнатуры как предвестник землетрясений (см., например, работы [Lagios, 2000; Zafirir, 2020]).

В Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН была разработана конструкция многонитяной высокочувствительной воздушной импульсной ионной ионизационной камеры большого объема (рабочий объем — 16 л) [Kuzminov, 2003]. Энергетическое разрешение камеры в условиях сниженных звукового и механического шумов достигало величины 3.9% для α -частиц с энергией 5.49 МэВ от распада ^{222}Rn . На ее основе был создан монитор и проведены первые продолжительные наблюдения за поведением содержания ^{222}Rn в воздухе наземной и подземной лабораторий БНО ИЯИ РАН [Gavrilyuk, 2011]. Среднее содержание радона в атмосферном воздухе на открытом пространстве, в воздухе наземной лаборатории в период февраль—март 2004 г. и подземной лаборатории КАПРИЗ (620 м от входа в штольню) в период октябрь 2004 г.—апрель 2005 г. было найдено равным $\sim 6 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$, $\sim 35 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ и $\sim 29 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ соответственно. С ростом температуры наружного воздуха в апреле содержание радона под землей стало увеличиваться ($\sim 42 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ среднее за апрель). Многонитяная камера обладала высоким уровнем микрофонных шумов, поэтому измерения в подземных лабораториях, оборудованных шумящими электроустановками, оказались некачественными и были остановлены. В результате дальнейшей работы, направленной на устранение выявленных недостатков, была разработана цилиндрическая воздушная импульсная ионная ионизационная камера (ЦВИК) с пониженным уровнем микрофонного шума [Gavrilyuk, 2015]. В лабораторных условиях ЦВИК имеет разрешение 1.7% для α -частиц с энергией 5.49 МэВ. С ее помощью проведен ряд измерений содержания ^{222}Rn в воздухе различных объектов БНО ИЯИ РАН. Результаты этой работы представлены ниже.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Блок-схема монитора для контроля содержания радона в воздухе с помощью ЦВИК представлена на рис. 1. Рабочий объем камеры составляет 3220 см^3 . Воздушный компрессор по трубопроводу через осушитель с силикигелем

и фильтр Петрянова закачивает пробу воздуха из обследуемого места в ЦВИК. Для полного замещения предыдущей пробы через камеру пропускается не менее 10 л воздуха нового отбора. Объем регулируется производительностью используемого ВК и временем его работы. После окончания продувки в течение некоторого интервала времени камера успокаивается и затем включается режим измерений. Рабочее напряжение на ЦВИК подается от высоковольтного источника ВВИ и не отключается во время продувки. Импульсы с камеры снимаются зарядо-чувствительным предусилителем (ЗЧУ). Режим работы Rn-монитора задается программно-релейной платой ARDUINO. Включение—выключение насоса (производительность $3.0 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$) производится через реле. Продувка осуществлялась в течение 240 с, успокоение ЦВИК — 60 с, измерение — 6900 с. После этого цикл повторяется. Время продувки и время измерения может варьироваться в зависимости от конкретных условий. Импульсы регистрируются цифровым осциллографом ЛА-н10-12USB с частотой оцифровки 1.56 МГц. Форма импульсов записывается в память персонального компьютера ПК. В работе использованы два идентичных монитора.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Мониторинг содержания ^{222}Rn в воздухе лабораторного помещения наземного корпуса

Обработка информации, накопленной в ПК, осуществлялась в “off-line” режиме. При этом для каждого измерительного цикла строится энергетический спектр импульсов. При построении программно вводится коррекция на конечное время разряда зарядо-чувствительного предусилителя ЦВИК. Это позволяет устранить эффект размытия спектра за счет разной длительности фронта импульсов. В качестве примера такого восстановленного спектра может служить спектр амплитуд импульсов (амплитудный спектр) на рис. 2, набранный примерно за 3 часа. Измерения проводились в лабораторном помещении второго этажа наземного лабораторного корпуса (ЛК). На спектре видны линии ^{210}Po (5.297 кэВ), ^{222}Rn ($\sim 5.490 \text{ МэВ}$), ^{218}Po (6.003 МэВ), ^{214}Po (7.687 МэВ). Энергетическое разрешение линии 5.49 МэВ составляет 2.0%. Распады дочерних продуктов радона происходят, в основном, на катоде, куда они высаживаются электрическим полем камеры,

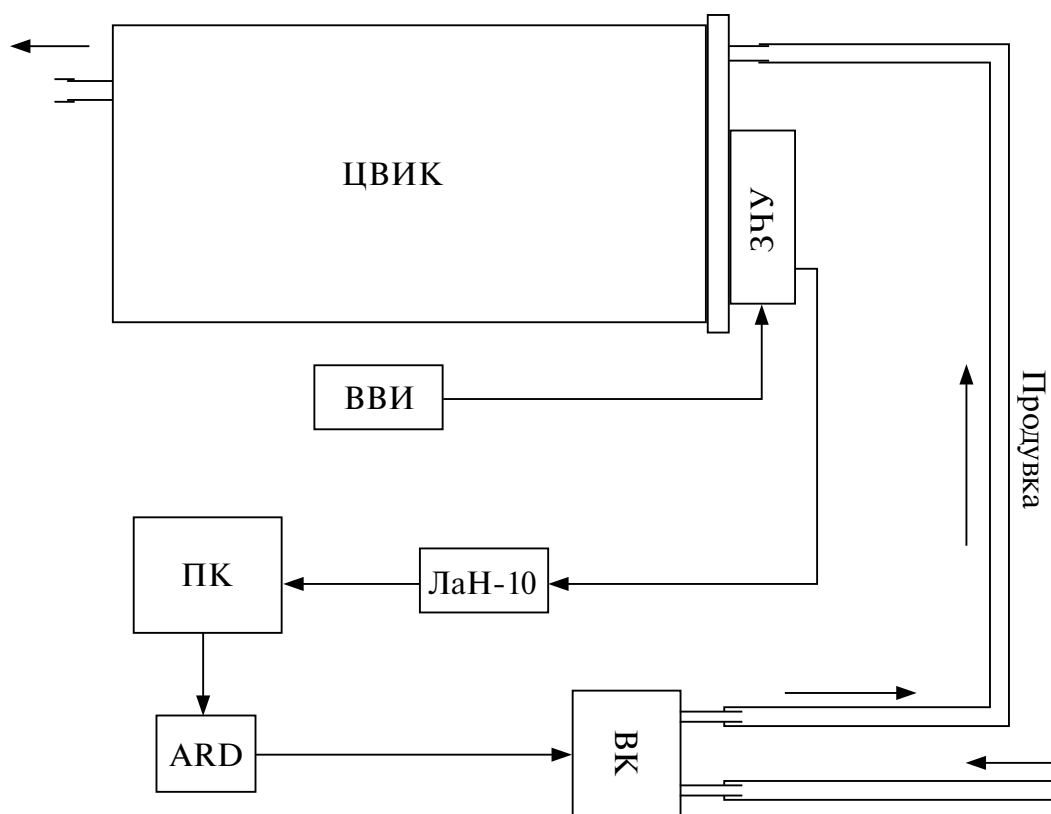


Рис. 1. Блок-схема монитора для контроля содержания радона в воздухе на базе цилиндрической воздушной импульсной ионизационной камеры: ЦВИК – ионизационная камера, ЗЧУ – зарядочувствительный преусилитель, ВВИ – высоковольтный источник питания, ПК – персональный компьютер, АРД – программно-релейная управляющая плата ARDUINO, ЦОС – цифровой осциллограф ЛА-н10-12РСІ, ВК – воздушный компрессор.

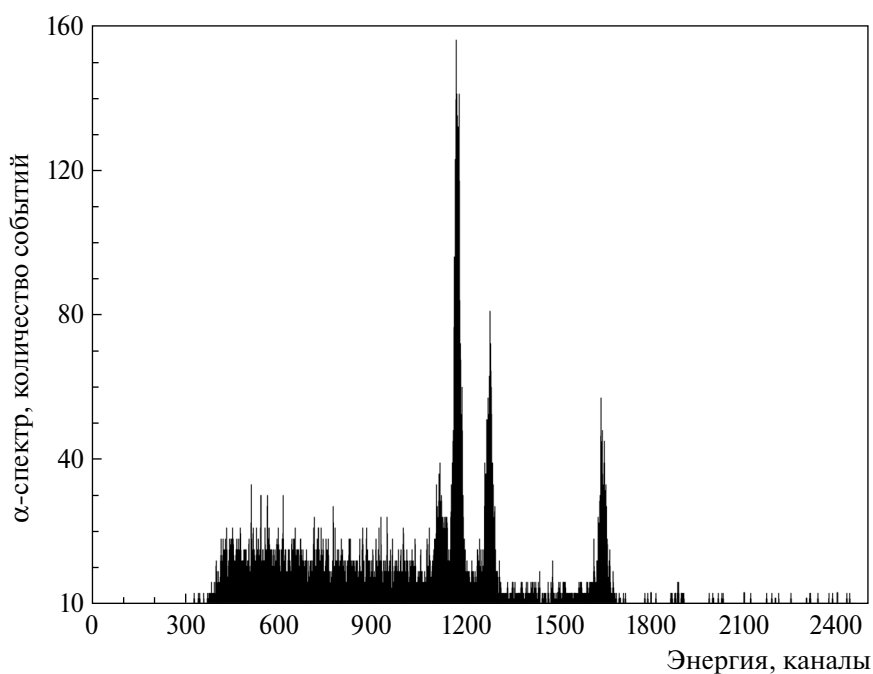


Рис. 2. Пример восстановленного амплитудного спектра импульсов, накопленного за 179 минут в измерениях содержания радона в воздухе наземного помещения.

поскольку их ионы заряжены положительно при рождении.

Для определения площади пиков из спектра вычитается подложка, а пики аппроксимируются гауссианами. Пример такого разделения приведен на рис. 3. Получившаяся площадь Rn-пика заносится в график. График изменения скорости счета Rn-монитора при измерении содержания радона в воздухе наземной лаборатории за период с 25 августа по 16 сентября 2020 г. приведен на рис. 4. Хорошо видны суточные вариации активности радона, связанные с изменениями режима проветривания в рабочее время и, возможно, с суточными атмосферными и приливными эффектами. Средняя за период измерений скорость счета составила 0.117 с^{-1} . При давлении 620 Торр (давление воздуха на высоте расположения БНО ИЯИ РАН) эффективность регистрации α -частиц с энергией 5.49 МэВ от распада ^{222}Rn , равномерно распределенного в объеме воздуха внутри камеры, равна 0.48 [Gavrilyuk, 2015]. С учетом объема и эффективности регистрации объемная активность радона в воздухе (A) может быть вычислена по результатам измерений в соответствии с соотношением $A = 0.647 \cdot N \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$, где N – количество импульсов за 1000 с под пиком 5.49 МэВ. Тогда соответствующая расчетная активность ^{222}Rn в лабораторном помещении составляет $75.7 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$. Как отмечалось во Введении, в этом же помещении

уже проводились измерения содержания радона с другой камерой в период с 26 февраля по 9 марта 2004 года. Было получено среднее значение объемной активности радона $\sim 35 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$. Новое значение согласуется со старым с учетом сезонного изменения содержания радона в воздухе.

3.2. Мониторинг содержания ^{222}Rn в воздухе герметичной скважины на расстоянии 4000 м от входа в подземный комплекс

Поверхность штольни “Главная” и помещений подземных рабочих лабораторий Обсерватории покрыта бетоном средней толщиной ~ 40 см. Незакрытыми остаются некоторые второстепенные помещения, запасные выборки под новые лаборатории и большой участок штольни “Вспомогательная”. В некоторых местах подземного комплекса за время существования возникли источники газа и воды. Эти родники могут являться источниками радона, если в стенках накопительных полостей присутствует значимое количество родительского ^{238}U и слагающие породы имеют достаточно высокий коэффициент выхода газа через трещины. Для оценки величины возможного выхода радона из породы были проведены специальные измерения. Измерительная установка размещалась в зале подземной низкофоновой лаборатории НЛГЗ-4900 [Gavrilyuk, 2013].

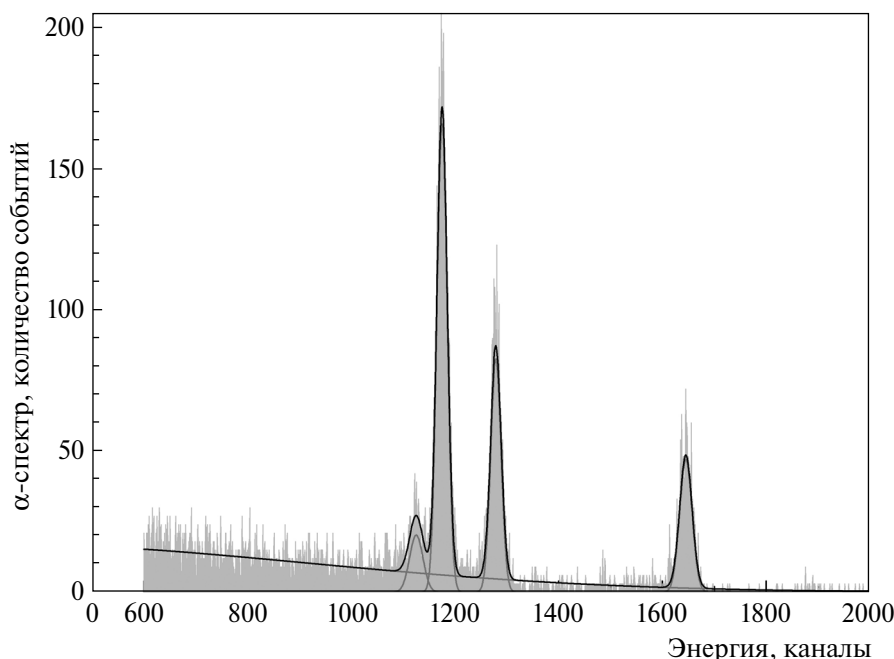


Рис. 3. Пример разделения амплитудного спектра на подложку и пики.

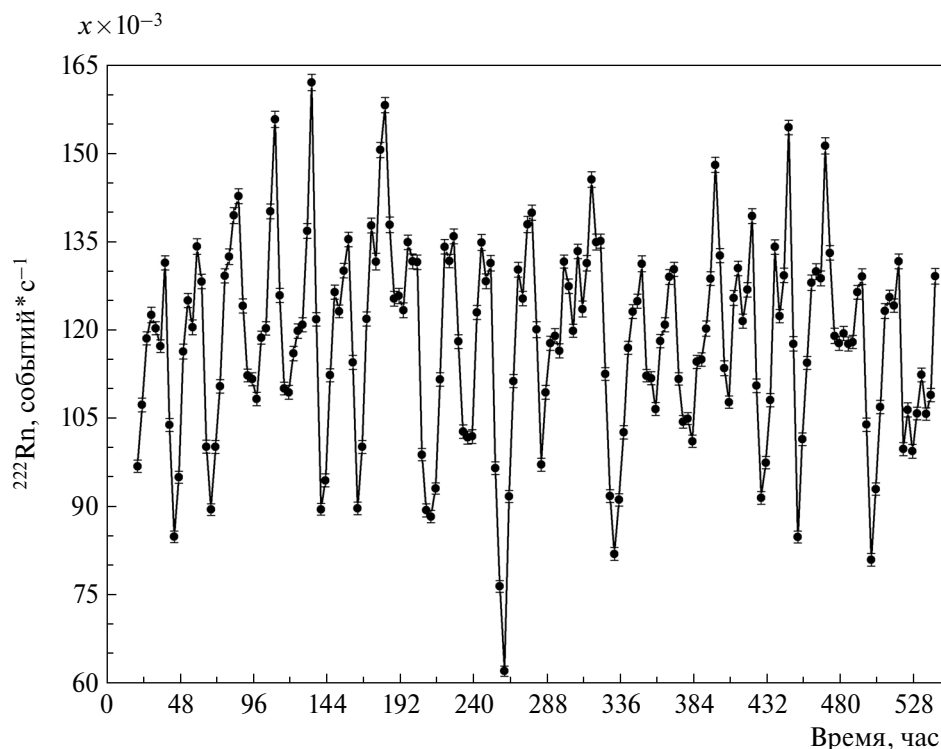


Рис. 4. Вариации скорости счета ^{222}Rn в одной из комнат наземной лаборатории в период с 28 августа по 16 сентября 2020 г.

Горизонтальная контрольная скважина (шурф) диаметром 10 и длиной 450 см [объем ~ 35.3 л] была забурена в скальной стенке “Дальней геофизической лаборатории” (ДГЛ), расположенной в боковом штреке штольни “Вспомогательная” на расстоянии ~ 4000 м от входа в штольню [Gavriluk, 2012]. Горловина скважины закрыта герметичной пробкой. Через пробку внутрь шурфа заведены прямая и обратная металлопластиковые трубы диаметром 15 мм (12 мм — диаметр внутренний) и длиной 150 м, соединяющие скважину с монитором в лаборатории НЛГЗ-4900. Объем трубок составляет ~ 33.9 л. Разнесение монитора и контрольной скважины было вызвано неблагоприятными условиями работы аппаратуры в ДГЛ.

Измерения проводились в период с 24 января по 27 июля 2020 г. График изменения скорости счета представлен на рис. 5. В процессе измерений были обнаружены и решены несколько методических вопросов, влияющих на качество измерений при проведении длительных исследований. Возрастание скорости счета в начале каждой новой серии измерений, начатой после перерыва, связано с установлением равновесия в измерительном объеме. В установившемся режиме на интервале времени 13–33 день площадь

радонового гауссиана составляет величину 474 ± 12 имп./1000 с. До начала этих измерений была измерена величина собственного фона замкнутой системы с исключенной контрольной скважиной. Фоновая площадь радонового пика составила величину 34 ± 1 имп./1000 с. Используя приведенные значения, можно рассчитать удельную активность радона в рабочем воздухе камеры (Ау), возникшую за счет выхода радона из стенок скважины: $A_y = (474 - 34) \cdot 0.647 = 285 \pm 8$ Бк/м³. Для определения скорости выхода радона из стенки скважины следует пересчитать полученную удельную активность на активность рабочего объема контрольной скважины. Предполагаем, что достигнуто равновесие между выходом радона и его распадом. При пересчете учитывалось, что начальный кусок скважины длиной 20 см закрыт уплотнением. Тогда объем $V_{\text{к.с.}} = 33.8$ л, площадь стенок $S_{\text{к.с.}} = 13\,587$ см². Полная активность радона, родившегося в скважине, $A_{\text{к.с.}} = A_y \cdot (V_{\text{к.с.}} + V_{\text{тр.}} + V_{\text{кам.}})/1000 = 0.285 \cdot 70.92 = 20.2 \pm 0.6$ Б, откуда скорость выхода радона из скального грунта s равна $s = A_{\text{к.с.}}/S_{\text{к.с.}} = 14.9 \pm 0.4$ с⁻¹·м⁻². При пересчете не учитывалось возможное влияние шероховатостей стенки на величину скорости выхода Rn.

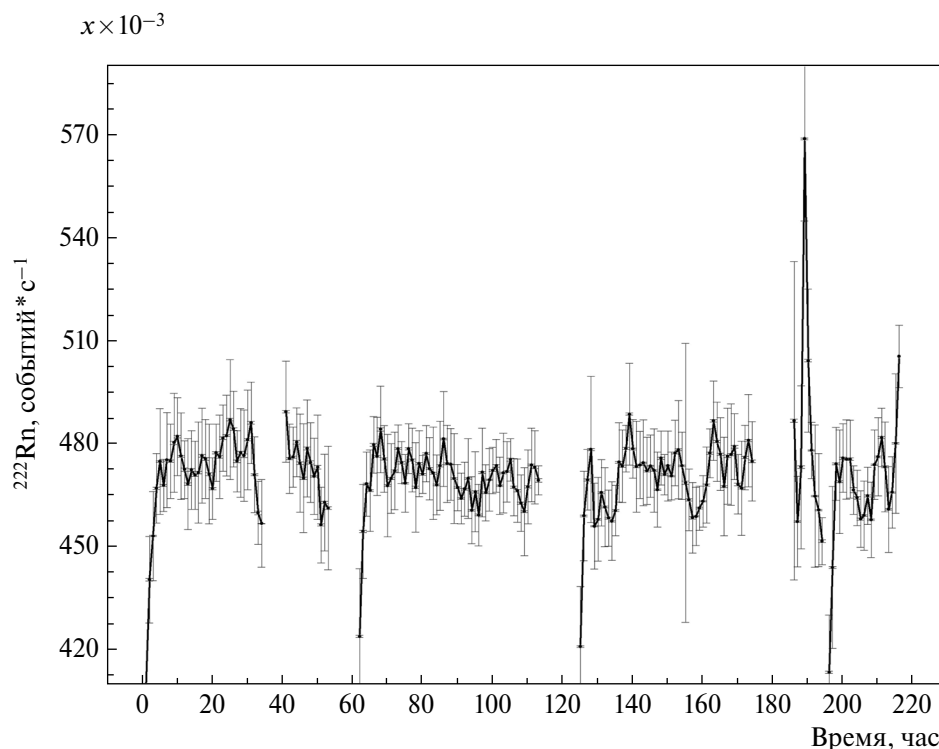


Рис. 5. Вариации скорости счета ^{222}Rn из контрольной скважины в период 24.01.2020 г. – 27.07.2020 г.

3.3. Мониторинг содержания ^{222}Rn в потоке воздуха вдоль штольни “Главная”

Мониторинг содержания ^{222}Rn в потоке воздуха штольни “Главная” проводился в период с 19 января по 25 февраля 2021 г. при размещении двух мониторов в стационарных лабораториях, распределенных по длине штольни. Среда приводится в движение вентилятором, высасывающим воздух из штольни “Вспомогательная”. Для измерений использовались помещения низкофоновых лабораторий (1) – “Ника” (400 м от входа, “Ближняя НФ”), (2) – “КАПРИЗ” (620 м), (3) – “ОГРАН” (1420 м), (4) – “НЛГЗ-4900” (3700 м) [Gavrilyuk, 2012]. Схема расположения лабораторий показана на рис. 6.

При измерении содержания радона в наружном воздухе (0 м) монитор располагался в ЛК, а забор воздуха осуществлялся снаружи здания через вынесенную трубку. Полученные графики скорости счета за 10^3 с приведены на рис. 7. Верхняя зависимость получена на мониторе М1, нижняя – на М2. В разные интервалы времени измерения проводились в разных точках штольни. На графиках участки данных для конкретных точек ограничены вертикальными отрезками прямых. Горизонтальные отрезки прямых на выделенных интервалах представляют средние

значения скорости счета под пиком 5.49 МэВ для данной точки. Из графиков видно, что содержание радона в воздухе во всех контрольных точках испытывает вариации с большой амплитудой. В интервале времени 230–500 ч от начала измерений мониторы были разнесены по длине штольни на максимальное расстояние. Монитор М2 тестировал воздух в точке (1) штольни “Главная”, М1 – в точке (4). Видно, что характер вариации содержания радона в воздухе штольни на разных расстояниях совпадает.

Статистическая ошибка средних значений не превышает 5–10%. Однако амплитуда вариаций значительно превосходит ее. Поэтому неопределенность, вносимая вариациями, может быть выражена в виде случайной ошибки. Заданные в такой форме средние значения в зависимости от расстояния между входом в штольню и точкой измерения представлены на рис. 8. Из данных видно, что содержание радона в потоке воздуха на протяжении 0–1420 м в пределах ошибок не меняется. А на отрезке 1420–3700 м содержание увеличивается примерно в 3 раза. Такое поведение можно объяснить, если предположить, что в штольне между отметками 1420 и 3700 м имеются точечные источники радона. Для проверки этого предположения на отметках 2000, 2600, 2800, 3000, 3400 м были взяты пробы воздуха

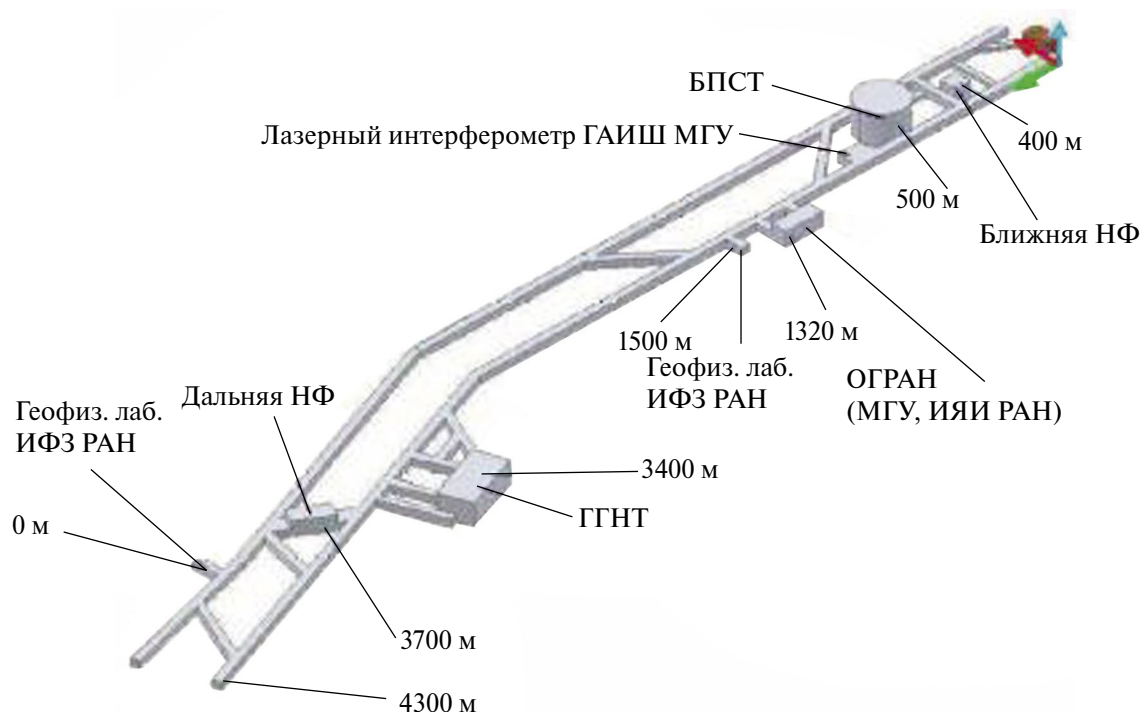


Рис. 6. Схема расположения подземных сооружений БНО ИЯИ РАН. Точке (1) соответствует указатель “Ближняя НФ”, точке (2) – “Лазерный интерферометр ГАИШ МГУ”, точке (3) – “ОГРАН”, точке (4) – “Дальняя НФ”.

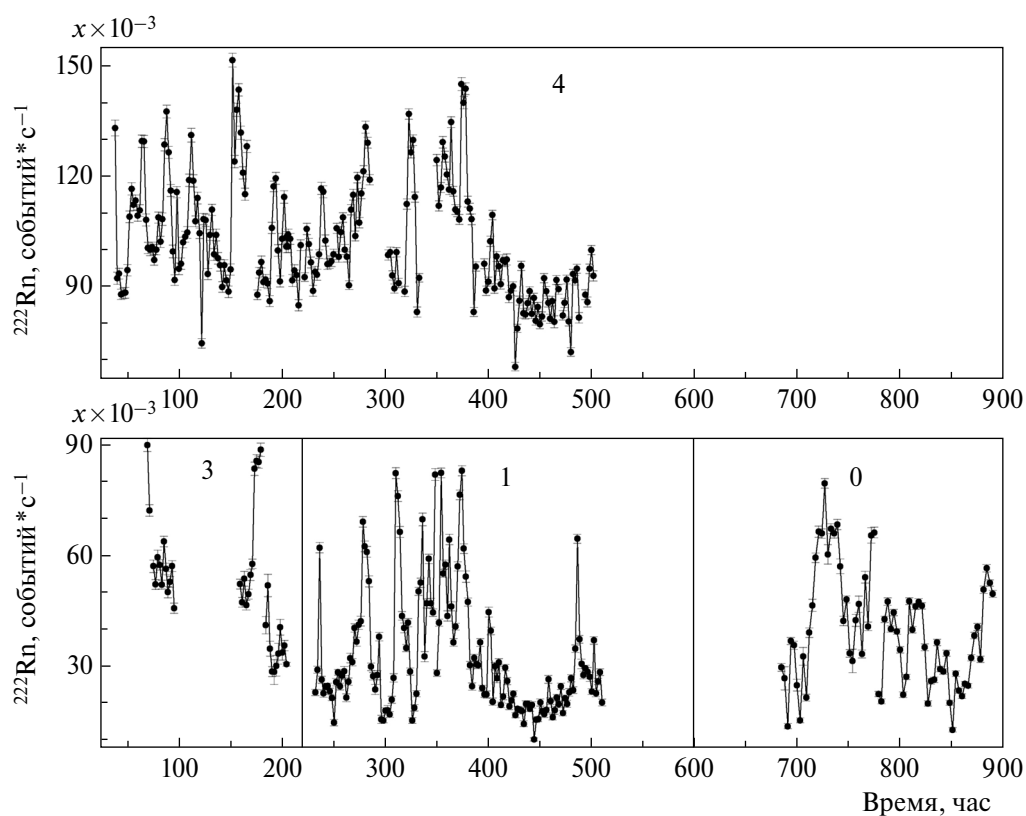


Рис. 7. Вариации скорости счета ^{222}Rn в потоке воздуха в штольне “Главная”: (0 м) – наружный воздух; (1) – “Ника” (400 м от входа), (3) – “ОГРАН” (1420 м), (4) – “НЛГЗ-4900” (3700 м). Верхняя зависимость получена на мониторе М1, нижняя – на мониторе М2.

непосредственно в объем ЦВИК, использованной в качестве переносного пробоотборника. Измерения проводились в оптимальных для работы аппаратуры условиях в точках (3) или (4). Поскольку измерения были единичными, в качестве систематической ошибки полученных данных использована ошибка значений в точке (1).

Из рис. 8 видно, что до расстояния 3400 м содержание радона в воздухе изменяется мало, хотя в стенах штольни на расстояниях выше 2600 м имеются небольшие выходы подземных газов и воды. Скачок содержания радона в воздухе наблюдается на расстояниях выше 3500 м, где расположены основной и вспомогательные входы в лабораторию галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ) [Gavrilyuk, 2012]. В стенах входных помещений ГГНТ имеются две газо-водяных течи с дебетом воды $\sim 2 \text{ л} \cdot \text{ч}^{-1}$ каждая. Кроме этого существует еще один возможный источник радона. Для поддержания температурного режима в лабораторных помещениях ГГНТ применяется кондиционированный воздух. Для его подготовки используется водяной кондиционер, в котором поток входного воздуха проходит через завесу капель холодной воды для очистки от пыли и через водяной теплообменник для охлаждения. Полный расход воды составляет $\sim 4 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$. Теплообменник питается

питьевой водой из подземной скважины. Вода сливается в открытую канавку, расположенную вдоль стенки штольни. На протяжении первых нескольких десятков метров вода интенсивно перемешивается и контактирует с воздухом. Выходящий из воды радон будет давать вклад в радоновую активность проходящего воздуха. Величина этого вклада зависит от содержания радона в воде и интенсивности газообмена. Содержание радона в воде было измерено на низкофоновом гамма-спектрометре на базе полупроводникового детектора из сверхчистого германия (ППД) по γ -активности дочернего изотопа ^{214}Bi . В зачет принимались данные, поступившие через три часа после отбора пробы для устранения влияния распадов ^{214}Bi с неизвестной предысторией. Описание ППД и методика измерений изложена в работе [Моллаева, 2023]. Были отобраны две пробы: 1) в месте слива воды в канавку, 2) на расстоянии 75 м ниже по течению. Результаты представлены в таблице. В пробе (1) активность радона оказалась равной $12.1 \pm 0.2 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$, в пробе (2) — $4.6 \pm 0.1 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$. Поскольку в сливной трубе кондиционера вода занимает только часть сечения, радон может выходить в воздушный слой над струей воды. Поэтому для определения полного содержания радона в питьевой воде и динамики его поведения при движении по водоводу были проведены

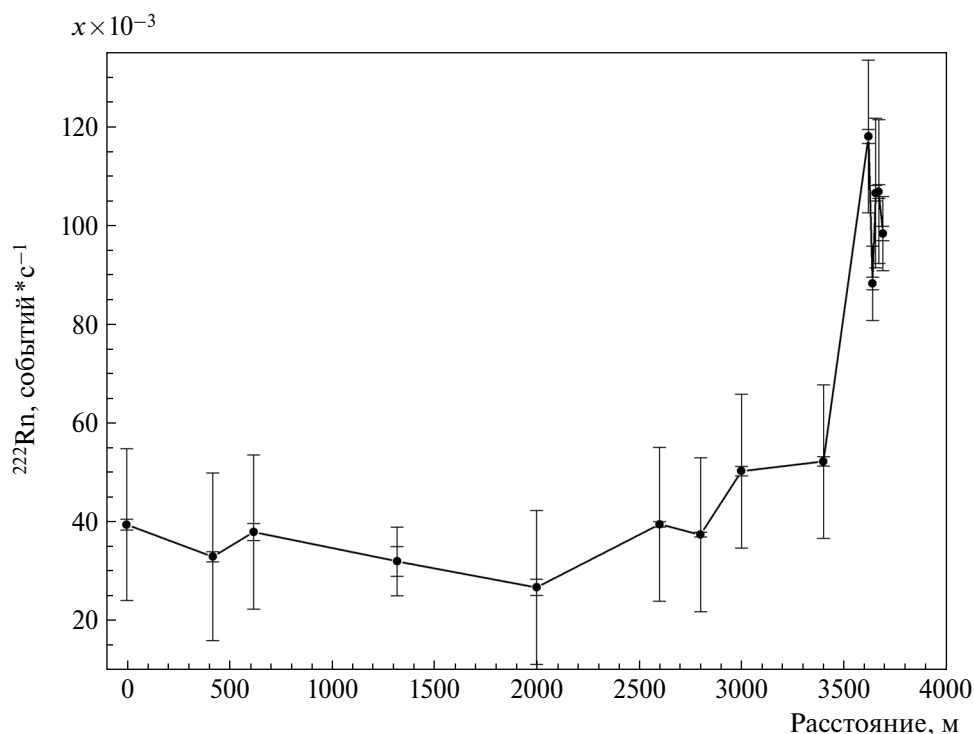


Рис. 8. Изменение содержания ^{222}Rn в воздухе вдоль штольни «Главная».

измерения с пробами воды, взятыми из крана в камере “НИКА” (проба 3), промежуточной накопительной емкости (проба 4) и на водозаборе (проба 5). Из сравнения результатов следует, что содержание радона мало меняется при движении воды по герметичному водоводу при давлении ~3 атм. Поэтому на входе в теплообменник кондиционера содержание радона в воде будет таким же, как в пробе 3. Следует учитывать, что часть радона из пробы 3 могла выйти из воды с микропузырьками воздуха, образующимися при сбросе давления во время отбора пробы.

На рис. 9 для иллюстрации возможностей установки с ППД приведен спектр (1) излучения от воды пробы 1. Объем этой и других проб составляет 170 см³. Здесь же приведен спектр (2) фона.

Для оценки возможного вклада радона из воды настенных течей ГГНТ вода из них также была измерена на ППД в пробах 6 и 7. С учетом

небольшой скорости истечения можно сделать вывод, что подобные течи могут давать относительно небольшой вклад в возрастание активности радона в воздухе. При полном выходе радона из воды, расходуемой кондиционером, можно ожидать увеличение активности радона в воздухе на величину ~50 Бк·м⁻³ с учетом объема проходящего воздуха. По-видимому, этот источник является основной причиной возрастания содержания радона в воздухе на отметке 3600 м в штольне “Главная”.

4. СЕЗОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ РАДОНА В ВОЗДУХЕ ШТОЛЬНИ

Как видно из рис. 8, содержание радона в проточном подземном воздухе на большом участке штольни практически не отличается от содержания радона в воздухе открытого пространства. Поэтому для наблюдения за сезонными

Активность ²²²Rn в пробах воды из различных источников Обсерватории

Источники воды	Параметры	Площадь пика 609 кэВ, (сб.)	Время измер. (ч)	Начальная активность ²²² Rn в воде (Бк/кг)
1. Вода из сливной трубы кондиционера ГГНТ		4520	101.2	12.1 ± 0.2
2. Вода из канавы перед воротами ГГНТ (75 м ниже (1))		1712	101.2	4.6 ± 0.1
3. Вода из-под крана в подземной камере “НИКА”		6369	69	22.3 ± 0.3
4. Вода из верхней емкости		9389	106	24.5 ± 0.3
5. Вода с водозабора		8637	99	23.4 ± 0.3
6. Вода со стены перегрузочной камеры ГГНТ		530	54	2.5 ± 0.1
7. Вода со стены склада ГГНТ		542	51	2.4 ± 0.1
8. Березовый сок		24.5	139	0.04 ± 0.01
9. Вода из реки Баксан		99	78.8	0.31 ± 0.03
10. Вода из речки Губасанты		125	182.8	0.20 ± 0.02
11. Придорожный родник (200 м от остановки Нейтрино в сторону Эльбруса)		5880	185.6	10.5 ± 0.1
12. Родник возле котельной БНО		2180	166.5	4.3 ± 0.1
13. Нарзан “Нейтрино”		7698	69	27.1 ± 0.3
14. Собственный фон установки		15	1776	0.021 ± 0.005

Примечания: объем (V) пробы для всех образцов V = 170 мл, эффективность (ε) регистрации квантов 609 кэВ – ε = 0.019. Коэффициент ветвления (γ) для линии 609 кэВ – γ = 0.4549.

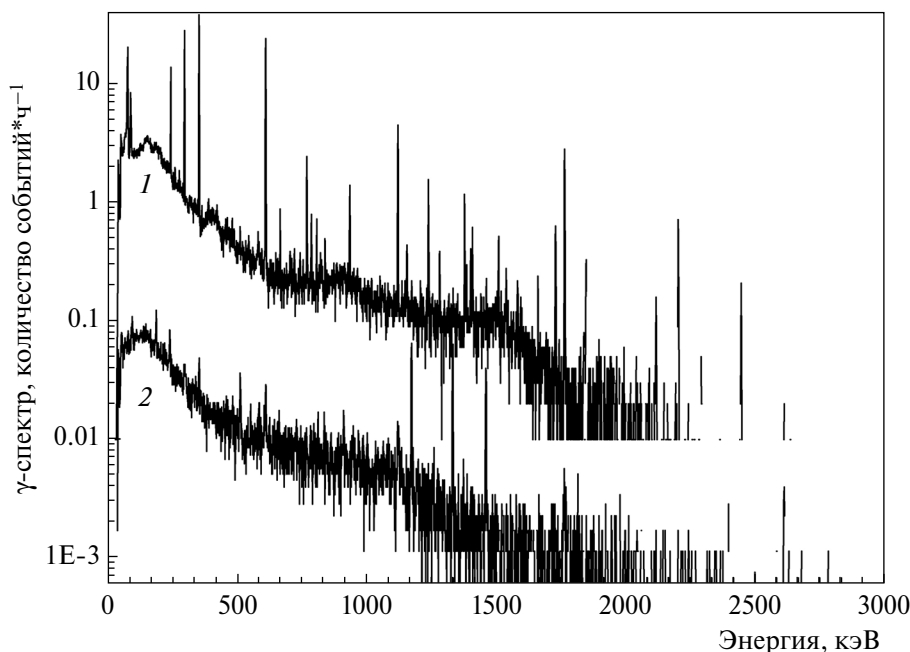


Рис. 9. Спектр излучения от пробы воды (1) в сравнении со спектром фона детектора (2).

колебаниями содержания радона в наружном воздухе были использованы данные от монитора, расположенного в точке (2). На рис. 10 представлена получившаяся временная зависимость за интервал 16.03.2021 г.—11.07.2022 г. Видно, что к концу июня среднее содержание радона в воздухе поднялось в ~ 4 раза. Представляет интерес систематизация процессов, приводящих к такому росту. На начальном участке временного интервала на территории Приэльбрусья, где расположена БНО ИЯИ РАН, еще лежит снег. Воздух имеет отрицательную температуру в диапазоне $-10 \dots -0$ °C. После 26 марта дневные температуры смещаются в область положительных значений. К началу мая склоны окружающих гор до высоты ~ 2500 м уже свободны от снега. В окружающем мире оживают деревья, происходит рост травы. Этот процесс сопровождается усилением переноса воды в виде растительных соков из почвы в надземную часть растений. Если в этой воде содержится радон, он будет выходить в воздух через большую поверхность листового покрова. Для проверки этого предположения на ППД было проведено измерение содержания дочернего ^{214}Bi в березовом соке. Результат представлен в таблице, проба 8. Видно, что содержание радона в этом образце незначительное. В летний период многократно увеличивается сток реки Баксан. Если в речной воде присутствует радон, он будет выходить в воздух в процессе интенсивного перемешивания

потока. Образец речной воды был также измерен на ППД. Результат представлен в таблице, проба 9. Кроме реки в окрестностях БНО ИЯИ РАН имеются ручьи и родники. Результаты измерения содержания радона в некоторых из них также представлены в таблице. Видно, что наибольшее содержание радона присутствует в пробах воды из родников. Вода из поверхностных источников является, в основном, талой водой из ледников, в которых содержание материнских изотопов радона очень мало. Поэтому в талой воде и радона мало. В зимний период вода из родников с большим содержанием радона при попадании в реку с существенно сократившимся сезонным стоком будет вызывать рост содержания радона на некотором отрезке речной воды по сравнению с теплым периодом. По мере удаления от места впадения содержание радона в воде будет снижаться за счет его выхода в воздух и он полностью выйдет из воды на первых сотнях метров в соответствии с (п.1) и (п.2) таблицы.

В теплый период года просыхает поверхность земли и открываются почвенные капилляры. По-видимому, процесс выхода радона через эти капилляры является главным источником радона в приземном воздухе на открытом пространстве. Обширные затяжные дожди будут приводить к вымыванию радона из атмосферы и закупорке капилляров. Поэтому содержание радона в воздухе будет уменьшаться. Большие кратковременные

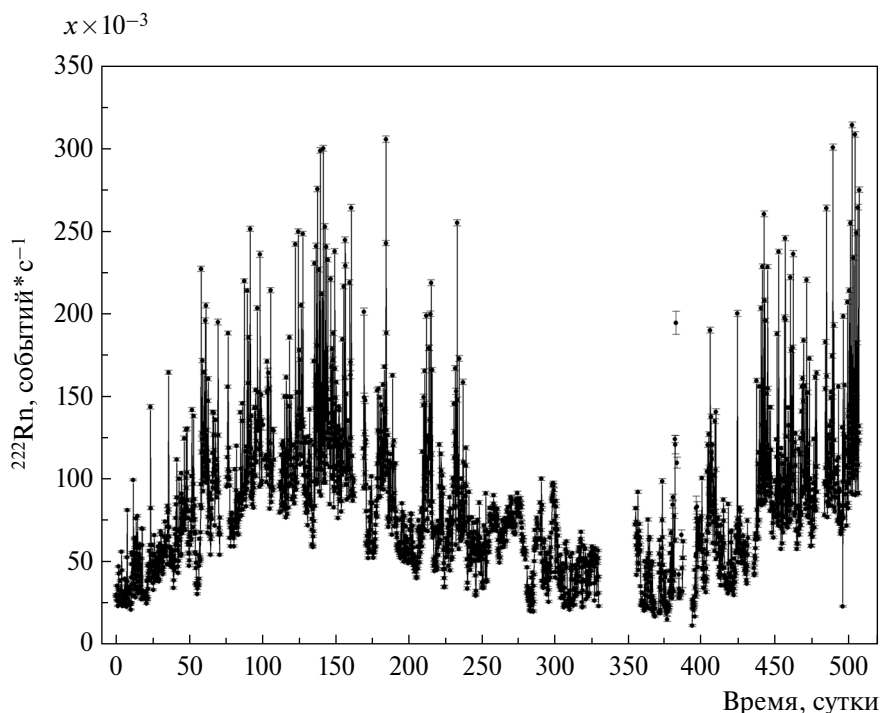


Рис. 10. Зависимость от времени содержания ^{222}Rn в воздухе штольни “Главная” на расстоянии 620 м от входа (точка (2)). Начало измерений — 16.03.2021 г.

выбросы активности радона могут быть вызваны принудительным извлечением газа из толщи земли порывами ветра, которые работают как насос. Созданное локальное приземное повышение содержания радона быстро рассеивается в результате перемешивания с принесенными относительно чистыми массами стороннего воздуха. Снижение содержания может происходить также во время сильных ветров, когда перемешиваются относительно чистые слои высотного воздуха и приземного воздуха, если содержание радона в принесенном приземном воздухе не превышает местных величин. Этот вопрос требует дополнительного изучения.

5. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показала практика работы с радоновым монитором, изготовленным на базе цилиндрической воздушной импульсной ионной ионизационной камеры, прибор обладает хорошими рабочими характеристиками и сохраняет их во время длительных (несколько месяцев) измерений. При умеренной влажности камера устойчиво работает даже без применения предварительной осушки рабочего воздуха, например, в зимний период. Детектор имеет пониженный уровень микрофонных шумов. Это позволило сохранить в помещениях

с различным уровнем вибрационных и акустических шумов высокое энергетическое разрешение (в пределах 1.5–2.0%) при регистрации энерговыделений 5.49 МэВ от α -частиц распада ^{222}Rn и его дочерних продуктов. Один монитор был использован для определения выхода радона с поверхности скального грунта. Было установлено, что скорость выхода радона с поверхности шурфа диаметром 10 см и длиной 430 см составляет $14.9 \pm 0.4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. Непрерывные наблюдения за содержанием радона в шурфе показали, что на протяжении ~200 дней вариации не превышали ~2%. Параллельное использование двух мониторов позволило провести одновременное измерение содержания радона в разнесенных точках подземной штольни. Сравнение результатов измерений показало, что выделение радона из бетонных стен штольни в пределах ошибок не вносит вклада в содержание радона в движущемся подземном воздухе, что совпадает с ожиданиями, рассчитанными в предположении, что скорость выхода радона из бетона такая же, как из скального грунта. До расстояния ~3400 м от входа в штольню содержание радона в этом воздухе мало отличается от содержания в наружном воздухе и испытывает синхронные с ним вариации, амплитуда которых может в 1.5–2.0 раза отличаться от среднего значения. На расстояниях выше 3400 м было обнаружено

возрастание содержания ^{222}Rn в воздухе. В результате изучения с помощью ППД содержания радона в различных водных источниках на территории лаборатории ГГНТ было установлено, что основным источником радона является питьевая скважинная вода, используемая в работе кондиционера и сливаемая после использования в открытую канавку. Радон, выходящий из воды, поднимает содержание этого газа в воздухе более чем в 2 раза, относительно среднего значения содержания в зимний период ($\sim 30 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$). Этот вклад можно исключить, если сброс воды на поверхность осуществить через герметичную канализационную трубу. Другая возможность заключается в использовании исходно чистой безрадоновой воды или воды, очищенной от радона на устройстве типа “градирня”. Проверка с помощью ППД воды из различных источников на поверхности показала, что повышенное содержание радона наблюдается в родниках и скважинах. В реке и ручье содержание радона в десятки раз ниже, чем в родниках. Одной из основных задач в проведенных исследованиях вариаций содержания радона в воздухе подземных лабораторий является оценка возможного влияния фона от распада радона на результаты подземных низкофоновых экспериментов. Поскольку все подобные эксперименты являются длительными, были проведены длительные наблюдения за поведением активности радона в воздухе на протяжении ~ 5 месяцев. Было установлено, что содержание радона в проточном подземном воздухе БНО ИЯИ РАН зависит от времени года и увеличивается с $\sim 30 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ в зимнее время до $\sim 100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ в летнее время. Если низкофоновая установка недостаточно экранирована от первичного или вторичного излучения, сопровождающего распад радона и его дочерних продуктов, то в показаниях детекторов может появиться фоновая годовая вариация искомого эффекта, связанная с вариациями содержания радона. В правильно сконструированной установке подобные эффекты могут быть устранены.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ ИЯИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Езимова Ю.Е., Удоратин В.В., Магомедова А.Ш. Четдинская радоновая аномалия (республика Коми): локализация и изучение // Геофизические исследования. 2022. Т. 23. № 4. С. 36–54.

Моллаева М.З., Темботова Ф.А., Ганганпиев А.М., Казалов В.В., Гежаев А.М. Содержание радионуклидов в хвое *Pinus sylvestris* L. в условиях Карачаево-Черкесской республики (Западный Кавказ) // Радиационная биология. Радиоэкология. 2023. Т. 63. № 4. С. 403–410.

Удоратин В.В., Езимова Ю.Е., Магомедова А.Ш. Методика измерений объемной активности радона для платформенных областей // Физика Земли. 2020. № 4. С. 132–143.

Amaré J., Bandac I., Blancas A., Borjabad S., Buisán, S. Cebrián S., Cintas D., Coarasa I., García E., Martínez M., Núñez-Lagos R., Oliván M.A., Ortigoza Y., Ortiz de Solórzano A., Pérez C., Puimedóna J., Rodríguez S., Salinas A., Sarsa M.L., Villar P. Long term measurement of the ^{222}Rn concentration in the Canfranc Underground Laboratory. arXiv:2203.13978v1 [physics.ins-det] 26 Mar 2022.

Li Chunqian, Zhao Shibin, Zhang Chenglun, Li Meng, Guo Jinjia, Dimova Natasha T., Yang Tong, Liu Wen, Chen Guangquan, Yu Huaming, Xu Bochao. Further refinements of a continuous radon monitor for surface ocean water measurements // Front. Mar. Sci. 2022. № 9. P. 1047126.

Chu M.C., Kwan K.K., Kwok M.W., Kwok T., Leung J.K.C., Leung K.Y., Lin Y.C., Luk K.B., Pun C.S.J. The radon monitoring system in Daya Bay Reactor Neutrino Experiment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2016. V. 808. P. 156–164.

Gavrilyuk Yu.M., Gangapshev A.M., Kuzminov V.V., Panasenko S.I., Ratkevich S.S. Monitoring the ^{222}Rn Concentration in the Air of Low-Background Laboratories by Means of an Ion-Pulse Ionization Chamber // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2011. V. 75. № 4. P. 547–551.

Gavrilyuk Yu.M., Gangapshev A.M., Gezhaev A.M., Ete-zov R.A., Kazalov V.V., Kuzminov V.V., Panasenkov S.I., Ratkevich S.S., Tekueva D.A., Yakimenko S.P. High-resolution ion pulse ionization chamber with air filling for the ^{222}Rn decays detection // Nucl. Instrum. and Meth. A. 2015. V. 801. P. 27–33.

Gavrilyuk Yu.M., Gangapshev A.M., Gezhaev A.M., Kazalov V.V., Kuzminov V.V., Panasenkov S.I., Ratkevich S.S., Smolnikov A.A., Yakimenko S.P. Working characteristics of the New Low-Background Laboratory (DULB-4900) // Nucl. Instrum. and Meth. A. 2013. V. 729. P. 576–580.

Kuzminov V.V. Ion-pulse ionization chamber for direct measurement of a radon concentration in the air // Physics of Atomic Nuclei. 2003. V. 66. № 3. P. 462–465.

Kuzminov V.V. The Baksan Neutrino Observatory // Eur. Phys. J. Plus. 2012. V. 127. P. 113.

Lagios E., Sideris G., Zervos F., Tsourlos P., Nicholson R.A., Ponomarev A., Salov B., Balassanian S., Petrosyan G., Bushati S., Lika O. Tectonic early warning system through real-time radon (Rn) monitoring: preliminary results of geophysical method for forecasting earthquakes. Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction. Kluwer Academic Publishers. 2000. P. 261–270.

Zafirir Hovav, Barbosa Susana, Levintal Elad, Weisbrod Noam, Yochai Ben Horin and Zalevsky Zeev. The Impact of Atmospheric and Tectonic Constraints on Radon-222 and Carbon Dioxide Flow in Geological Porous Media – A Dozen-Year Research Summary // Front. Earth Sci. 2020. № 8. P. 559298.

Variations of ^{222}Rn Content in Above- and Underground Conditions

Yu. M. Gavriluk^a, A. M. Gangapshev^{a,b,*}, A. M. Gezhaev^a, V. V. Kazalov^a,
V. V. Kuzminov^{a,b}, A. Kh. Khokonov^{a,c}, and R. A. Eteзов^a

^a*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

^b*Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, 360004 Russia*

^c*Adyghe State University, Maykop, 385000 Russia*

*e-mail: gangapsh@list.ru

Received October 24, 2023

revised January 24, 2024

accepted January 26, 2024

Abstract – The article presents the results of measuring ^{222}Rn activity and its daughter decay products in the air of underground laboratories of Baksan Neutrino Observatory, Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences (BNO INR RAS) at different distances from the entrance. The measurements were carried out with a cylindrical air pulse ionization chamber. It has been shown that the radon content in the flow of ventilated air, within the measurement accuracy, does not depend on the length of the path traveled, but increases abruptly in the locations of sources of underground gas and water emissions. Various mechanisms of air enrichment with radon are considered. The research methodology is presented, and the results of measurements of radon emission from the rocky soil of the walls of an underground room are presented. The results of measuring the radon content in water from various above- and underground sources using a low-background gamma spectrometer based on a semiconductor detector (SCD) made of ultrapure germanium are presented.

Keywords: underground low-background laboratories, background from radon and daughter products, variations in radon content in air, pulsed ionization chamber, radon emission from room walls, long-term monitoring