

РАДОН В КАРСТОВОЙ ПЕЩЕРНОЙ СИСТЕМЕ КУЛОГОРСКАЯ — ВОДНАЯ — ТРОЯ (СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ СЕКТОР РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ): ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

А. В. Пучков¹, Е. Ю. Яковлев¹, С. В. Дружинин¹, С. А. Игловский¹, В. Э. Хватаев¹,
Ю. Н. Иванова²

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени
Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (Архангельск, Российская Федерация)

² Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 29 января 2026 г.

Для цитирования

Пучков А. В., Яковлев Е. Ю., Дружинин С. В. и др. Радон в карстовой пещерной системе Кулогорская — Водная — Троя (Северо-Западный сектор российской Арктики): первые результаты // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 2. — С. 215—223. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-215-223.

Статья посвящена первым результатам радиозоологических исследований пещерной системы Кулогорская — Водная — Троя (Пинежский округ Архангельской области). В воздухе пещеры Водная в осенний период выявлены высокие значения объемной активности радона, при этом зимний период характеризовался его практическим отсутствием, что объясняется естественной конвекцией воздушных масс за счет разницы в температуре воздуха в пещере и вне ее. Кроме того, выявлены контрасты в значениях плотности потока радона над пещерной системой и за ее пределами, которые могут быть обусловлены зонами разуплотнения перекрывающей толщи грунтов. Первые результаты исследований показали необходимость организации периодического радиационного мониторинга пещер с целью выявления наиболее благоприятных с точки зрения радиационной безопасности периодов посещения.

Ключевые слова: радон, карст, пещера, естественные радионуклиды, Арктика.

Введение

Пещеры — это уникальные природные среды, отличающиеся сложной системой лабиринтов и гротов, наличием подземных озер и рек, своеобразной биосферой, палеонтологическими и климатическими «архивами». По этим причинам пещеры всегда привлекали и привлекают по сегодняшний день внимание ученых, исследователей и туристов. В то же время пещеры — это еще и объекты повышенной опасности, обусловленной целым рядом причин: извилистостью лабиринтов, отсутствием света и визуальных ориентиров, обрывами, обвалами, вертикальными колодцами, скользкими глинистыми склонами, паводками и водой в сифонах, низкими температурами с крайне высокой влажностью, а также газовым составом воздуха. Последний фактор имеет особое значение с точки зрения санитарно-гигиенических

требований, поскольку в воздухе пещер в значительных количествах могут содержаться вредные для человека углекислый газ, сероводород, а также радиоактивный газ радон [1]. Содержание углекислого газа в пещерах может превышать его содержание в атмосфере до двух порядков. Например, в пещере Золушка концентрация углекислого газа отмечена на уровне до 50 000 ppm [2], что может привести к удушью и потере сознания. В Мацестинских пещерах в воздухе отмечается значительное превышение установленных нормативов содержания сероводорода (до 10 мг/м³) [3], что не позволяет находиться там без средств индивидуальной защиты. Другие газы, например водород, метан и гелий, зачастую встречаются в незначительных количествах.

Особый интерес вызывает встречающийся в пещерах радиоактивный газ радон, что связано с его ядерно-физическими параметрами и канцерогенными свойствами. Радон Rn — это «невидимый, не имеющий вкуса и запаха, тяжелый (в 7,5 раза тяжелее

воздуха) радиоактивный газ, который вносит самый большой вклад в среднюю дозу облучения населения из всех источников естественной радиации» [4]. Проблема радона в пещерах в мире в целом изучается достаточно давно, и в мировой научной базе накоплено значительное количество материалов по этой тематике [4; 6]. В естественных условиях ^{222}Ra образуется путем распада его материнского изотопа ^{226}Ra , входящего в цепочку радиоактивного семейства ^{238}U . После образования в геологической среде радон легко проникает через пористые среды или растворяется в грунтовых водах в результате процессов контакта воды с породой [7]. В пещерах основным источником радона считаются горные породы кристаллического фундамента, содержащие повышенные уровни радионуклидов семейства ^{238}U , в том числе и ^{226}Ra . Другими источниками радона могут быть вмещающие породы или глинистые отложения в самой пещере [4]. При этом независимо от источников поступления концентрация радона в воздухе пещеры может определяться рядом факторов, включая морфологические особенности пещеры, микроклимат (температура, влажность, вентиляционные особенности), пористость и трещиноватость окружающих пород, внешние метеорологические условия и т. д. [8].

Хотя радон в пещерах в мире в целом исследуется давно, в России изученность данного вопроса остается крайне неравномерной и фрагментарной, что не может не удивлять с учетом огромных территорий и геологического разнообразия страны. Наиболее изученные регионы страны — Средний и Южный Урал (Кунгурская ледяная пещера, Капова пещера), Краснодарский край и Карачаево-Черкесия (Хостинские и Воронцовские системы), Алтай (Тавдинские пещеры), Крым (пещеры на плато Чатыр-Даг). При этом Сибирь, Дальний Восток, Камчатка и Курилы, Поволжье и Северный Урал, Северо-Запад России остаются слабо изученными или не изученными вовсе [6; 9—11]. Здесь особо выделяется Архангельская область, где расположен крупнейший в Европе массив гипсового карста, основную часть которого занимает пещерная система Кулогорская — Водная — Троя.

Таким образом, целью данного исследования является рекогносцировочное определение радиационных параметров (объемной активности и плотности потока радона, радионуклидного состава глинистых отложений) пещеры Водная, входящей в состав пещерной системы Кулогорская — Водная — Троя Пинежского района Архангельской области.

Материалы и методы

Пещерная система Кулогорская — Водная — Троя заложена в гипсово-ангидритовой толще мощностью около 30 м в зоне Пинежного-Кулойского субмеридионального разлома. Пещерные ходы вытянуты преимущественно в северо-западном и субмеридиональном направлениях и развиты по тектоническим трещинам и трещинам напластования. Мощность перекрывающих пещеры отложений со-

ставляет от 3 до 12 м [12]. Геологическое строение района исследования достаточно подробно описано в работе [13], авторы которой проводили сейсмические исследования над этой же пещерной системой.

Исследование объемной активности радона в пещере Водная и плотности потока радона над ней, а также оценка радионуклидного состава отдельных проб глинистых отложений из этой пещеры проводились в октябре и декабре 2025 г. Объемная активность радона (ОАР) измерялась 6—7 октября 2025 г. (3 точки измерения) и 3 декабря 2025 г. (5 точек измерения). Плотность потока радона (ППР) над пещерой Водная и за ее границами была измерена в 21 точке по профилю примерно 1 км. Измерения ППР проводились 6—7 октября 2025 г. в сухую и теплую погоду (температура окружающего воздуха 13—15°C, относительная влажность 45—51%, атмосферное давление 763 мм рт. ст.). Кроме того, в пещере Водная были отобраны 3 пробы глинистых отложений для определения радионуклидного состава и физико-химических параметров. Общая схема исследований с указанием точек проведения измерений представлена на рис. 1 (схема расположения пещер приведена согласно [14]).

Измерения ОАР и ППР проводились с применением измерительного комплекса для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» (производитель ООО «НТМ Защита») непосредственно на месте отбора проб. Метод основан на электростатическом осаждении заряженных ионов ^{218}Po из отобранной пробы воздуха на поверхность полупроводникового детектора с последующим усилением образующихся электрических импульсов при взаимодействии альфа-частиц с материалом детектора и их обработкой встроенным компьютером. Пределы допускаемой относительной погрешности при измерениях ППР и ОАР составляли не более 30% при доверительной вероятности 0,95.

Определение радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K проводилось с применением низкофонового полупроводникового гамма-спектрометра ORTEC (США) на основе коаксиальных детекторов GEM10 из особо чистого германия (HPGe) с цифровым анализатором. В качестве геометрии измерения был выбран сосуд Маринелли объемом 1 л.

Активность ^{226}Ra измерялась после герметизации счетных образцов и их выдержки в таком состоянии в течение 3—4 недель для достижения состояния равновесия членов радиоактивного ряда ^{238}U . Радионуклид ^{226}Ra определялся по дочерним продуктам его распада (ДПР) ^{214}Pb (351,93 кэВ с квантовым выходом 35,60%), ^{214}Bi (609,32 кэВ с квантовым выходом 45,49%, 1120,29 кэВ с квантовым выходом 14,92%, 1764,49 кэВ с квантовым выходом 15,3%). Радионуклид ^{232}Th и его активность определялись по его ДПР ^{212}Pb (238,63 кэВ с квантовым выходом 43,6%), ^{208}Tl (583,19 кэВ с квантовым выходом 85,0%, 2614,51 кэВ с квантовым выходом 99,75%). Радионуклид ^{40}K и его активность определялись по линии 1460,82 кэВ

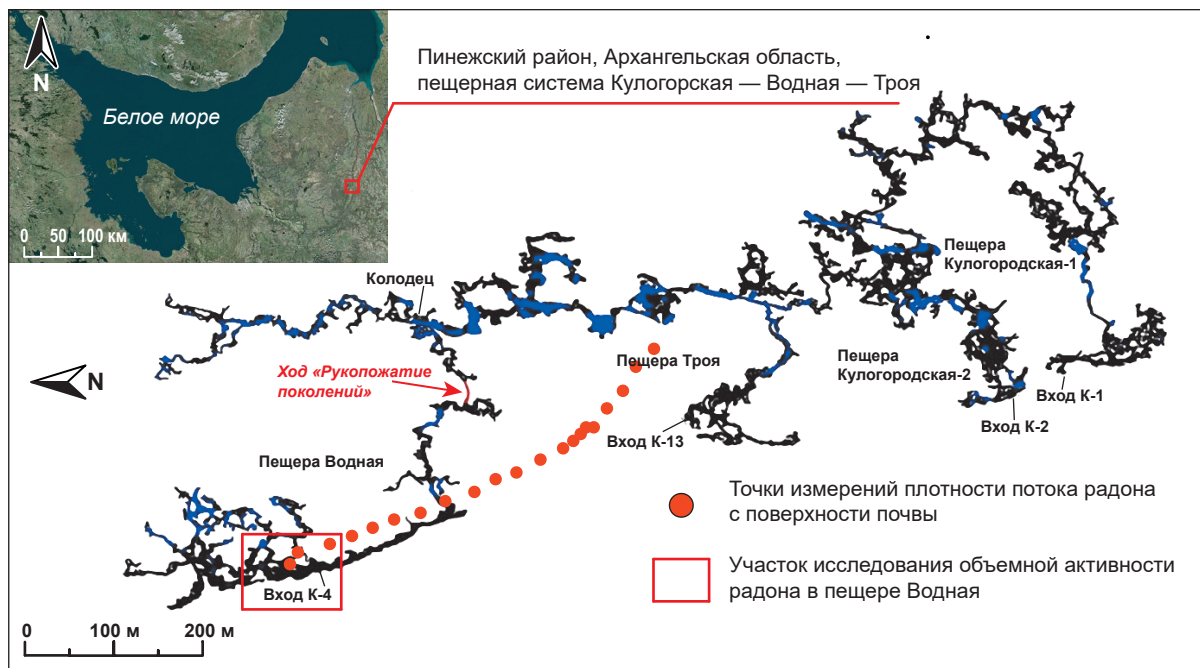


Рис. 1. Схема участка исследований и точки проведения измерений
Fig. 1. Scheme of the study area and measurement points

с квантовым выходом 10,66%. Минимально измеряемые активности при экспозиции $t = 18\ 000$ с для геометрии «Маринелли» в низкофоновом исполнении для детектора GEM10 для ^{226}Ra составили 0,3 Бк, для ^{232}Th — 0,2 Бк и для ^{40}K — 15,0 Бк.

Гранулометрический состав глинистых отложений определяли на виброситовом анализаторе «AS 200 control» (RETSCH). В пробах донных отложений также определяли физико-химические показатели, такие как содержание органического вещества, карбонатов (CO_3^{2-}) и золы. Подробное описание методик определения физико-химических показателей приведено в [15].

Результаты и обсуждения

Результаты измерений ОАР представлены на рис. 2. Схема пещеры Водная представлена согласно информационно-поисковой системе «Пещеры России» [16]. ОАР в пещере Водная измерялась в два этапа. Первый этап был проведен 7 октября 2025 г. Температура воздуха вне пещеры составляла около 15°C , а в привходовой части пещеры — не более 5°C . В дальних точках измерения температура не превышала $2\text{—}3^\circ\text{C}$. Значения ОАР варьировали от 6200 ± 1860 Бк/м³ (привходовая часть, точка R1) до 14800 ± 4440 Бк/м³ (левое крыло, примерно в 100 м от входа, точка R3).

На втором этапе (3 декабря 2025 г.) измерения были проведены уже в 5 точках. Температура воздуха вне пещеры составляла около -4°C , а в привходовой части пещеры — -1°C . В дальних точках измерения температура составляла $1\text{—}2^\circ\text{C}$. Результаты измерений показали околофоновые значения ОАР в диапазоне от менее 1 Бк/м³ в привходовой

части до 36 ± 11 Бк/м³. Несмотря на низкие значения, отмечается увеличение ОАР по направлению от входа в пещеру в более отдаленные ее части.

Резкий контраст в значениях ОАР в осенний и зимний периоды может быть связан с естественной конвекцией воздушных масс за счет разницы температур воздуха в пещере и вне ее. В зимний период пещерное пространство вентилируется атмосферным воздухом, что приводит к резкому снижению содержания радона в воздухе. Однако летом и осенью обогащенный радоном воздух перемещается из глубины пещеры наружу, о чем свидетельствуют результаты измерений ОАР в пещере. Похожая картина наблюдается и в других пещерах России и мира в целом. Так, радиоэкологические исследования в Кунгурской ледяной пещере показали высокий уровень эквивалентной равновесной объемной активности радона в летний период (от 1100 до 6653 Бк/м³) и околофоновый уровень в зимний период (от 11 до 56 Бк/м³) [6]. Авторы это явление также объясняют конвективной циркуляцией воздуха из-за разницы температур внутри горного массива и окружающей атмосферы (эффект дымохода). Высокие значения активности радона и отчетливая сезонность ее распределения наблюдаются в пещерах Болгарии. В [17] приведены результаты исследований 37 карстовых пещер Болгарии, содержание радона в которых варьировало в широких пределах от 100 до 13 000 Бк/м³. Основным фактором variability содержания радона авторы считают сезонные изменения в направлении и интенсивности вентиляции пещерного пространства. Помимо этого авторы выявили зависимость пиковых значений содержания радона в пещерах от сейсмической активности региона.

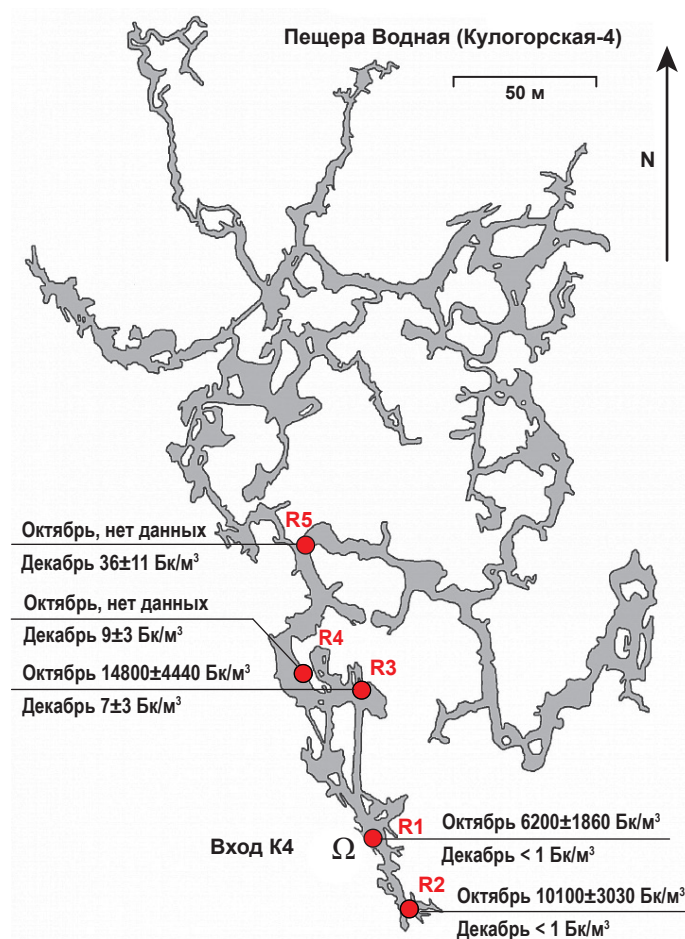


Рис. 2. Результаты измерений ОАР в пещере Водная
 Fig. 2. Results of RVA (radon volumetric activity) measurements in Vodnaya Cave

Повышенный уровень содержания радона в пещере может быть связан с несколькими причинами. Как уже указывалось, горные породы кристаллического фундамента могут быть одним из основных источников поступления радона на поверхность через системы трещин и разломов. Согласно [13], «в верхних горизонтах осадочного чехла (палеозой, мезозой, кайнозой) Средне-Пинежского грабена Мезенской синеклизы зафиксированы проявления глубинных разломов, сопровождающиеся зонами повышенной трещиноватости». Однако глубина залегания фундамента в районе исследования находится в диапазоне от 800 м до 4 км [13; 18], что вызывает сомнения в поступлении радона на дневную поверхность от данного источника даже с учетом характерных для разломных зон высоких скоростей вертикального переноса радона (до 100 м/сут) их-за относительно короткого периода полураспада радона (3,8 сут). Другой причиной высоких уровней радона в пещере Водная может быть мезенский водоносный комплекс (диапазон глубин от 120 до 250 м). Соленые воды этого комплекса отличаются высокой минерализацией (до 30 г/л) и повышенными концентрациями изотопов урана и радия [19]. Кроме того, терригенные породы

венда и нижнего кембрия (250—800 м по [18]) могут характеризоваться повышенным содержанием естественных радионуклидов. Так, в [20] показано, что породы вендских отложений Золотицкого кимберлитового поля, расположенного в 130 км от участка исследования, характеризуются повышенными значениями активности ²²⁶Ra (до 63,3 Бк/кг), коэффициента эманации (до 29,1%) и уровня продуцирования радона (до 132,0 Бк/м³·ч).

Предположение о том, что источником радона в пещере Водная могут быть горные породы окружающей геологической среды, исключается в связи с тем, что карстовые породы не содержат радионуклиды естественных радиоактивных рядов или их активность близка к фоновым значениям [21]. Например, в Кунгурской ледяной пещере содержание ²²⁶Ra в известняках, гипсах и ангидридах варьирует в диапазоне от 6 до 16 Бк/кг [9]. Информации о содержании радиоактивных элементов в глинистом материале пещер, который может интенсивно накапливаться в периоды половодья, крайне мало. Поскольку глинистые отложения могут эффективно накапливать радионуклиды, в том числе за счет диффузии в межпакетное пространство глинистых минералов [22], вариативность активности естественных радионуклидов может изменяться в более широких диапазонах. Похожий вывод сделан и в [4], где показано, что в пещерах глинистые отложения, в которых содержание ²²⁶Ra в 20—40 раз выше, чем в известняках, могут играть важную роль

в накоплении радона в пещере. Проведенные исследования показали, что активность естественных радионуклидов в глинистых отложениях пещеры Водная низка и не превышает 37,9 ± 4,0 Бк/кг для ²²⁶Ra, 17,7 ± 2,1 Бк/кг для ²³²Th и 430 ± 42 Бк/кг для ⁴⁰K. При этом нами выявлены повышенные значения коэффициента эманации радона до 35%, что может обуславливать некоторый вклад в содержание радона в воздухе пещеры. Однако отсутствие радона в воздухе пещеры или его минимальные значения в зимний период ставят под сомнение вывод о вероятном влиянии глинистых отложений в накопление радона. Результаты измерений радиационных параметров проб глинистых отложений приведены в табл. 1.

Глинистые отложения пещеры Водной отличаются незначительным содержанием органического вещества (до 5,98%). Содержание тонкозернистой фракции (< 45 мкм) варьирует от 2,76% до 29,68%, что отчасти противоречит немногочисленным литературным данным. Так, глинистые отложения Кунгурской пещеры характеризуются повышенным содержанием фракций 5—50 мкм и < 2 мкм. Повышенные содержания тонкозернистых глинистых отложений показаны также для прибрежных пещер

острова Майорка, пещер в Македонии и т. д. [23]. Вероятно, именно низкие значения органического вещества и тонкозернистой фракции обуславливают невысокое содержание естественных радионуклидов в глинистых отложениях пещеры Водной. Результаты измерений физико-химических параметров проб глинистых отложений приведены в табл. 1 и 2.

По результатам исследований ОАР в пещере Водная в октябре 2025 г. отмечается превышение нормируемых значений, рекомендуемых Международной комиссией по радиологической защите в качестве уровней вмешательства (300 Бк/м^3) [24]. Сравнение с российскими нормативами в области радиационной безопасности на текущий момент проводить преждевременно, поскольку в документе [25] нормируется эквивалентная равновесная объемная активность радона (ЭРОА) в воздухе помещений зоны дыхания для производственных условий — 310 Бк/м^3 , а не объемная активность самого газа радона. В связи с широким интересом к пещерной системе Кулогорская — Водная — Троя с научной и рекреационно-туристической позиций возникает необходимость организации периодического радиационного мониторинга пещер для выявления наиболее благоприятных с точки зрения радиационной безопасности периодов посещения, когда ЭРОА в воздухе пещер наименьшая.

Результаты исследований ОАР в пещере Водная в октябре 2025 г. обусловили проведение измерений потоков радона с поверхности почвы над пещерной системой Кулогорская — Водная — Троя. Для этого в тот же период были проведены измерения ППР в 21 точке с шагом примерно 30—50 м. Измерения проводились в сухую и теплую погоду (температура окружающего воздуха 13—15°C, относительная влажность 45—51%, атмосферное давление 763 мм рт. ст.). Результаты измерений ППР представлены на рис. 3. Схема пещеры Водная представлена согласно информационно-поисковой системе «Пещеры России» с авторскими доработками [16]. Геопозиция пещерной системы на рис. 2 приведена на схеме Google Earth.

Таблица 1. Радиационные и физико-химические параметры глинистых отложений пещеры Водная

Table 1. Radiation, physical and chemical parameters of the clay deposits in Vodnaya Cave

Номер пробы	^{226}Ra , Бк/кг	^{232}Th , Бк/кг	^{40}K , Бк/кг	Коэффициент эманации радона, %
R2	37,9±4,0	17,7±2,1	420±41	35
R4	31,2±3,5	15,6±1,9	385±39	29
R5	32,2±3,4	15,5±1,9	430±42	33

Измерения показали, что ППР варьировала в диапазоне от 84 ± 25 до $443 \pm 132 \text{ мБк/м}^2/\text{с}$ со средним значением $200 \pm 61 \text{ мБк/м}^2/\text{с}$. Зона расположения пещеры отчетливо контрастирует по значениям ППР (до $443 \pm 132 \text{ мБк/м}^2/\text{с}$) с зоной за границами пещеры (до $245 \pm 73 \text{ мБк/м}^2/\text{с}$). Повышенные значения ППР над пещерой могут быть связаны с зонами разуплотнения перекрывающей толщи грунтов вследствие карстовых процессов, что создает условия для интенсивного переноса радона из полости пещеры. Согласно [6], карстовые полости пещерной системы заложены в неоднородной толще гипсов нижнепермского возраста мощностью около 20 м, перекрытой сильно трещиноватыми доломитами и рыхлыми четвертичными водно-ледниковыми отложениями. Выявленная закономерность, которой до сих пор в научной литературе не уделяется должного внимания, указывает на возможность применения радона в качестве трассера для обнаружения других зон разуплотнения, в том числе пещерных полостей. Следует отметить, что ввиду ограниченного объема выборки (незначительного количества точек опробования) полученная закономерность нуждается в дальнейшей верификации и уточнении на более обширном фактическом материале.

Выводы

В рамках настоящей работы авторы провели рекогносцировочные исследования содержания радона в воздухе и естественных радионуклидов в глинистых отложениях пещеры Водная, входящей в состав пещерной системы Кулогорская — Водная — Троя Пинежского района Архангельской

Таблица 2. Гранулометрический состав глинистых отложений пещеры Водная

Table 2. Granulometric composition of the clay deposits in Vodnaya Cave

Номер пробы	Физико-химические параметры, %		Гранулометрический состав, %							
	Зольность	Органическое вещество	10 мм	2 мм	1 мм	500 мкм	250 мкм	100 мкм	45 мкм	< 45 мкм
R2	95,51	4,49	0,00	21,84	22,39	12,25	9,74	9,32	7,95	16,50
R4	96,84	3,16	0,00	18,85	8,27	11,35	19,79	18,36	20,63	2,76
R5	96,24	3,76	6,00	6,86	10,16	7,98	10,16	13,19	15,96	29,68

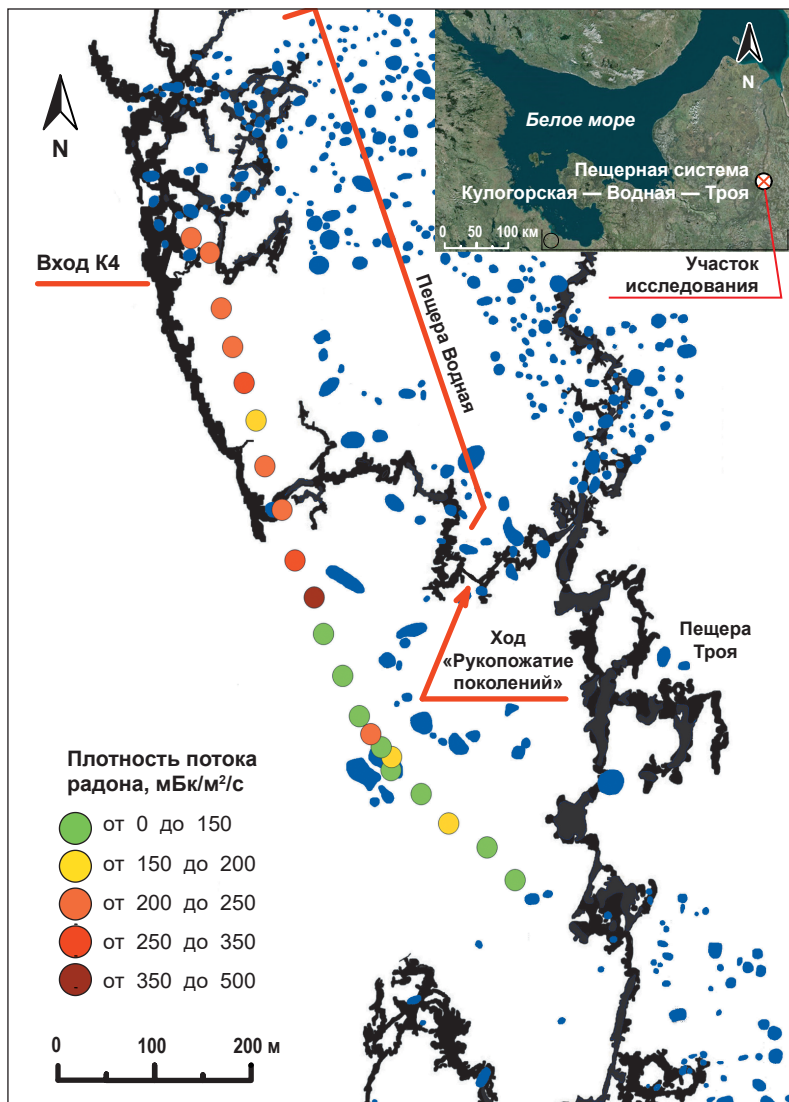


Рис. 3. Результаты измерений ППР над пещерной системой Кулогорская – Водная – Троя
 Fig. 3. Results of RFD (radon flux density) measurements over the Kulogorskaya – Vodnaya – Troya cave system

области. Исследования проводились в октябре и декабре 2025 г. и заключались в измерении ОАР в воздухе пещеры, ППР над пещерой и за ее границами, а также в определении радионуклидного состава и физико-химических параметров в трех пробах глинистых отложений из пещеры.

По результатам исследования ОАР в воздухе пещеры отмечается резкое контрастирование в значениях этого параметра для осеннего (до 14800 ± 4440 Бк/м³) и зимнего (не более 36 ± 11 Бк/м³) периодов, что может быть связано с естественной конвекцией воздушных масс за счет разницы в температуре воздуха в пещере и вне ее. Повышенный уровень радона в пещере Водная может быть связан с солеными водами мезенского водоносного горизонта, отличающимися высоким уровнем содержания изотопов урана. Кроме того, терригенные породы венда и нижнего кембрия могут характери-

зоваться повышенным содержанием естественных радионуклидов, обуславливая увеличение потоков радона через системы трещин и разломов. Кристаллический фундамент как источник поступления радона вызывает сомнения из-за достаточно глубокого залегания (до 4 км).

По результатам исследования ППР зона расположения пещеры отчетливо контрастирует (до 443 ± 132 мБк/м²/с) с зоной за границами пещеры (до 245 ± 73 мБк/м²/с). Повышенные значения ППР над пещерой могут быть связаны с зонами разуплотнения перекрывающей толщи грунтов вследствие карстовых процессов, что создает условия для интенсивного переноса радона из полости пещеры.

Вследствие широкого интереса к пещерной системе Кулогорская – Водная – Троя с научной и рекреационно-туристической позиций возникает необходимость организовать периодический радиационный мониторинг пещер с целью выявления наиболее благоприятных с точки зрения радиационной безопасности периодов посещения, когда содержание радона и продуктов его распада в воздухе пещер наименьшее. Кроме этого, продолжение исследований данной пещерной системы необходимо для выявления фундаментальных причин формирования радонного поля в пещерах и оценки применимости радона как трас-

сера для изучения процессов воздухообмена между пещерой и атмосферой, а также для обнаружения других зон разуплотнения, в том числе ранее неизвестных пещерных полостей.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках ФНИР FUUW-2025-0011 «Особенности миграции элементов и их изотопов в компонентах окружающей среды Западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений», номер госрегистрации 125022002727-2.

Благодарности

Авторы благодарят коллег из спелеологической организации АСА «Лабиринт», оказавших поддержку в проведении исследований, в том числе за консультации и предоставленные материалы.

Литература/References

1. Кириченко Л. В., Кадебская О. И., Исаевич А. Г. и др. Гигиенические исследования в карстовой пещере // Перм. мед. журн. — 2012. — Т. 29, № 1. — С. 97—100. Kirichenko L. V., Kadebskaya O. I., Isaevich A. G., Varannikov V. G., Rusanova E. A. Hygienic studies in a karst cave. Perm Medical J., 2012, vol. 29, no. 1, pp. 97—100. (In Russian).
2. Андрейчук В., Телешман И., Куприч П. Пространственно-динамические особенности распределения CO₂ в воздухе пещеры Золушка // Спелеология и карстология. — 2011. — № 7. — С. 15—25. Andreychuk V., Teleshman I., Kuprich P. Spatial and dynamic features of CO₂ distribution in the air of the Cinderella cave. Speleology and Karstology, 2011, no. 7, pp. 15—25. (In Russian).
3. Захаров Е. В., Кимбер В. Б., Резван В. Д. Мацестинские гидротермокарстовые пещеры: некоторые новые сведения о спелеообъектах системы // Пещеры: Сборник научных трудов. — Пермь, 2012. — С. 19—40. Zakharov E. V., Kimber V. B., Rezvan V. D. Matsesta hydrothermocarst caves: some new information on the speleological objects of the system. Caves: Collection of scientific papers. Perm, 2012, pp. 19—40. (In Russian).
4. Cigna A. A. Radon in Caves. Intern. J. of Speleology, 2005, vol. 34, pp. 1—18. DOI: 10.5038/1827-806X.34.1.1.
5. Еримбетова Д. С., Степаненко В. Ф., Видергольд А. В., Жумадилов К. Ш. Современное состояние исследований концентрации радона // Вестн. Евраз. нац. ун-та им. Л. Н. Гумилева. Сер. Физика. Астрономия. — 2019. — № 3 (128). — С. 153—159. Erimbetova D. S., Stepanenko V. F., Vidergold A. V., Zhumadilov K. S. The current state of research on radon concentration. Bull. of the L. N. Gumilyov Eurasian National Univ. Series Physics. Astronomy, 2019, no. 3 (128), pp. 153—159. (In Russian).
6. Miklyaev P. S., Petrova T. B., Maksimovich N. G., Krasikov A. V., Klimshin A. V., Shchitov D. V., Sidyakin P. A., Tsebro D. N., Meshcheriakova O. Yu. Comparative studies on radon seasonal variations in various underground environments: Cases of abandoned Beshtaugorskiy uranium mine and Kungur Ice Cave. J. of Environmental Radioactivity, 2024, vol. 272. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2023.107346.
7. Amiri V., Nakhaei M., Lak R. Using radon-222 and radium-226 isotopes to deduce the functioning of a coastal aquifer adjacent to a hypersaline lake in NW Iran. J. of Asian Earth Sciences, 2017, vol. 147, pp. 128—147. DOI: 10.1016/j.jseaes.2017.07.015.
8. Dinu A. C., Călugăr M. I., Burghel B. D., Oana A. D., Cosma C., Onac B. P. Radon levels in Romanian caves: an occupational exposure survey. Environ. Geochem. Health, 2017, vol. 39, pp. 1085—1099. DOI: 10.1007/s10653-016-9878-1.
9. Максимович Н. Г., Гершанок В. А., Мещерякова О. Ю., Растегаев А. В. Радиоактивность и инженерно-геологические особенности карстовых массивов // Соврем. проблемы науки и образования. — 2011. — № 4. — С. 57. Maksimovich N. G., Gershanok V. A., Meshcheryakova O. Yu., Rastegaev A. V. Radioactivity and Engineering-Geological Features of Karst Massifs. Modern Problems of Science and Education, 2011, no. 4, p. 57. (In Russian).
10. Иванов М. И. Поведение радона в подземных выработках Саблинского памятника природы // Изв. РГПУ им. А. И. Герцена. — 2011. — № 138. — С. 110—114. Ivanov M. I. Radon Behavior in Underground Workings of the Sablinsky Natural Monument. Izvestiya of the Herzen State Pedagogical University, 2011, no. 138, pp. 110—114. (In Russian).
11. Красиков А. В., Казанцева А. С. Радиологический мониторинг и оценка радиационной обстановки в кунгурской ледяной пещере // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2024. — № 1. — С. 198—213. Krasikov A. V., Kazantseva A. S. Radiological Monitoring and Assessment of the Radiation Situation in the Kungur Ice Cave. Izvestiya TulGU. Earth Sciences, 2024, no. 1, pp. 198—213. (In Russian).
12. Станковский А. Ф., Веричев Е. М. и др. Отчет о результатах групповой геологической съемки и геологического доизучения площадей масштаба 1:200 000 в Беломорско-Кулойском регионе Архангельской области (Кулойская ГСП, 1974—1980 гг.). — Архангельск, 1980. Stankovsky A. F., Verichev E. M. et al. Report on the results of group geological survey and geological re-examination of areas of scale 1:200,000 in the Belomorsk-Kuloy region of the Arkhangelsk Region (Kuloy GSP, 1974—1980). Arkhangelsk, 1980. (In Russian).
13. Антоновская Г. Н., Басакина И. М., Ваганова Н. В., Царев А. М. Сейсмические исследования карстовых пещер в Арктике: первые результаты // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 4. — С. 508—518. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-4-508-518. Antonovskaya G. N., Basakina I. M., Vaganova N. V., Tsarev A. M. Seismic Studies of Karst Caves in the Arctic: First Results. Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 4, pp. 508—518. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-4-508-518. (In Russian).
14. Кабанихин А. В., Минников О. А., Франц Н. А. Кулогорская пещерная система. Новейшие исследования // Пещеры и карст: изучение, сохранение, популяризация знаний: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной Международному году пещер и карста (2021—2022 годы), пос. Голубино, 7—11 сентября 2022 г. — Архангельск, 2022. — С. 21—26. Kabanikhin A. V., Minnikov O. A., Frants N. A. Kulo-Gorskaya Cave System. The Latest Research // Caves and Karst: Study, Preservation, and Popularization of Knowledge: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the International Year of Caves and Karst (2021—2022), Golubino Village, September 7—11, 2022. Arkhangelsk, 2022, pp. 21—26. (In Russian).
15. Yakovlev E., Puchkov A., Druzhinin S. Evaluation of current natural and anthropogenic radionuclide activity in coastal area bottom sediments of the Barents

Sea (North of the Kola Peninsula). *Marine Pollution Bull.*, 2023, vol. 189. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.114809.

16. Информационно-поисковая система «Пещеры». — URL: <https://speleoatlas.ru/>.

Caves Information and Search System. Available at: <https://speleoatlas.ru/>. (In Russian).

17. *Stefanov P., Nojarov P., Turek K., Stefanova D.* Global Changes and Tourism in Show Caves in Bulgaria — Hazards and Relationships. *Environmental Protection and Disaster Risks (EnviroRisks 2024)*, 2024, vol. 883, pp. 126—138. DOI: 10.1007/978-3-031-74707-6_15.

18. *Коротков А. И., Потапов А. А., Румынин В. Г.* Редкие типы минеральных вод Среднерусского артезианского бассейна. — СПб.: Наука, 2013. — 303 с.

Korotkov A. I., Potapov A. A., Rumynin V. G. Rare Types of Mineral Water of the Srednerusskii Artesian Basin. *St. Petersburg, Nauka*, 2013, 303 p. (In Russian).

19. *Малов А. И., Киселев Г. П.* Уран в подземных водах Мезенской синеклизы. — Екатеринбург: УрО РАН, 2008.

Malov A. I., Kiselev G. P. Uranium in groundwater of the Mezen syncline. *Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2008. (In Russian).

20. *Yakovlev E., Puchkov A.* Radon over Kimberlite Pipes: Surface Field Experiments and Calculations of Vertical Diffusion (Arkhangelsk Diamondiferous Province, NW Russia). *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 24. DOI: 10.3390/app112411765.

21. *Ma Q., Zhou B., Feng Z., Bai J., Zhang L., Liu W.* A preliminary study on soil radon anomaly and its formation mechanism in karst area of southwest China. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2022, vol. 331, pp. 2045—2054. DOI: 10.1007/s10967-022-08259-4.

22. *Зенченко С. А., Зимелис К. Е.* Сравнительный анализ поведения Cs-137 в донных отложениях озер // Материалы Международной конференции ведущих специалистов, молодых ученых и студентов «Экологические проблемы XXI века», Минск (Беларусь), 17—21 мая 2002 г. — Минск, 2002. — С. 180—181.

Zenchenko S. A., Zimelis K. E. Comparative Analysis of the Behavior of Cs-137 in the Bottom Sediments of Lakes. *Proceedings of the International Conference of Leading Specialists, Young Scientists, and Students "Environmental Problems of the 21st Century"*, Minsk (Belarus), May 17—21, 2002. Minsk, 2002, pp. 180—181. (In Russian).

23. *Матреничев В. А., Климова Е. В.* Глинистые отложения пещер // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. — 2015. — № 4 — С. 65—82.

Matrenichev V. A., Klimova E. V. Clay Deposits of Caves. *Vestnik SPbGU. Earth Sciences*, 2015, no. 4, pp. 65—82. (In Russian).

24. *Harrison J. D., Marsh J. W.* ICRP recommendations on radon. *Sage Journals*, 2020, vol. 49, pp. 68—76. DOI: 10.1177/0146645320931974.

25. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.

SANPIN 2.6.1.2523-09. Radiation safety standards NRB-99/2009. (In Russian).

26. *Минников О. А., Кабаныхин А. В., Некрасов М. В., Франц Н. А.* Пещерная система Кулогорская — Водная — Троя (Архангельская область, Кулогорский спелеомассив) // Спелеология и спелестология. — 2022. — № 1. — С. 77—78.

Minnikov O. A., Kabanikhin A. V., Nekrasov M. V., Franz N. A. Cave system Kulogorskaya — Vodnaya — Troya (Arkhangelsk region, Kulogorsky speleological massif). *Speleology and spelestology*, 2022, no. 1, pp. 77—78. (In Russian).

Информация об авторах

Пучков Андрей Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20), e-mail: andreypuchkov.fcjarctic@internet.ru.

Яковлев Евгений Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией экологической радиологии, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20), e-mail: yakov24lev99@mail.ru.

Дружинин Сергей Валериевич, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20), e-mail: druzhininserg@yandex.ru.

Игловский Станислав Анатольевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20), e-mail: iglovskys@mail.ru.

Хватаев Всеволод Эдуардович, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (163020, Россия, Архангельск, Никольский просп., д. 20), e-mail: hvataevvsevolod@yandex.ru.

Иванова Юлия Николаевна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы (117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6), e-mail: jnivanova@yandex.ru.

RADON IN THE KULOGORSKAYA — VODNAYA — TROYA KARST CAVE SYSTEM (NORTHWESTERN SECTOR OF THE RUSSIAN ARCTIC): FIRST RESULTS

Puchkov, A. V.¹, Yakovlev, E. Yu.¹, Druzhinin, S. V.¹, Iglovsky, S. A.¹, Hvataev, V. E.¹, Ivanova, Yu. N.²

¹ N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk, Russian Federation)

² Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (Moscow, Russian Federation)

The article was received on January 29, 2026

For citing

Puchkov A. V., Yakovlev E. Yu., Druzhinin S. V., Iglovsky S. A., Hvataev V. E., Ivanova Yu. N. Radon in the Kulogorskaya — Vodnaya — Troya karst cave system (Northwestern sector of the Russian Arctic): first results. *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 2, pp. 215—223. DOI: 10.25283/2223-4594-16-2-215-223. (In Russian).

Abstract

The article presents the initial results of radioecological studies of the Kulogorskaya-Vodnaya-Troya cave system (Pinezhsky District, Arkhangelsk Region). The studies were conducted in October and December 2025 and included measuring radon volumetric activity (RVA) in the cave air, radon flux density (RFD) above and beyond the cave, and determining the radionuclide composition and physicochemical parameters of three clay sediment samples from the cave. High radon volumetric activity was detected in the air of Vodnaya Cave in the autumn, while the winter period was characterized by a virtual absence of radon. This is explained by natural convection of air masses due to differences in air temperature within and outside the cave. Furthermore, contrasts in radon flux density were found above and beyond the cave system, which may be due to zones of decompression in the overlying soil. According to the results of radon concentration studies in Vodnaya Cave in October 2025, significant excesses were observed, exceeding the ICRP recommended intervention levels, as well as the equivalent equilibrium radon concentrations in indoor air as specified by NRB (Radiation Safety Norms) 99-2009. The elevated radon levels in Vodnaya Cave may be associated with the saline waters of the Mezen aquifer, as well as with Vendian and Lower Cambrian terrigenous rocks. Initial study results indicate the need for periodic radiation monitoring of the caves to identify the most favorable visiting periods in terms of radiation safety.

Keywords: radon, karst, cave, natural radionuclides, Arctic.

Financing

The study was conducted within the framework of the Federal Research Fund FUUW-2025-0011 “Features of the migration of elements and their isotopes in environmental components of the Western sector of the Russian Arctic under conditions of climatic and anthropogenic changes”, state registration number 125022002727-2.

Information about the authors

Puchkov, Andrey Viktorovich, PhD of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolsky Ave., Arkhangelsk, Russia, 163020), e-mail: andreypuchkov.fcicarctic@internet.ru.

Yakovlev, Evgeny Yurievich, PhD of Geology and Mineralogy, Head of the Laboratory of ecological radiology, Leading Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolsky Ave., Arkhangelsk, Russia, 163020), e-mail: yakov24lev99@mail.ru.

Druzhinin, Sergey Valerievich, Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolsky Ave., Arkhangelsk, Russia, 163020), e-mail: druzhinin-serg@yandex.ru.

Iglovsky, Stanislav Anatolyevich, PhD of Geography, Leading Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolsky Ave., Arkhangelsk, Russia, 163020), e-mail: iglovskys@mail.ru.

Hvataev, Vsevolod Eduardovich, Junior Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Nikolsky Ave., Arkhangelsk, Russia, 163020), e-mail: hvataevvsevolod@yandex.ru.

Ivanova, Yulia Nikolaevna, PhD of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, Russia, 117198), e-mail: jnivanova@yandex.ru.