СТАТЬЯ

УДК 550.35(470.11)
DOI 10.17513/use.38386

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ГИПСА В АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Наход В.А., Малов А.И., Дружинин С.В., Зыкова Е.Н.

ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова» УрО РАН, Архангельск, e-mail: Nakhod.Vitaliy@knauf.ru

Основополагающим в современной жизни стало понятие экологической безопасности жизнедеятельности человека, одной из составляющих которого представляется допустимый радиационный фон. Современный уровень развития общества приводит к тому, что одним из важнейших параметров, который оказывает непосредственное влияние на выбор строительных материалов для обеспечения деятельности человека, служит экологическая безопасность, в том числе радиационная составляющая. Целью работы является комплексная оценка антропогенного влияния на изменение естественной радиационной составляющей на месторождении гипса в Холмогорском районе Архангельской области. В летний период 2024 года были выполнены работы по измерению мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, удельной активности радионуклидов и плотности потока радона на разрабатываемом месторождении. По итогам экспериментальных работ выявлен локальный перенос радионуклидов в отвалы вскрышных пород, выделены два участка первого и второго классов по степени радоноопасности. Количественные показатели активности радионуклидов находятся в пределах нормативных значений. Деятельность горного предприятия приводит к локальным изменениям радиационного фона, на фоне снижения гамма-излучения и плотности потока радона на территории карьера фиксируются повышенные значения гамма-излучения в отвалах вскрышных пород, а в карьерных водах повышаются концентрации урана.

Ключевые слова: радионуклиды, гамма-излучение, плотность потока радона, изотопы урана, донные отложения, гипс, Архангельская область

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова» УрО РАН FUUW-2025-0011 «Особенности миграции элементов и их изотопов в компонентах окружающей среды Западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений», № государственной регистрации 125022002727-2.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE RADIATION COMPONENT AT THE GYPSUM DEPOSIT IN THE ARKHANGELSK REGION

Nakhod V.A., Malov A.I., Druzhinin S.V., Zykova E.N.

Federal Center for Integrated Arctic Research named after N.P. Laverov, Ural Branch of RAS, Arkhangelsk, e-mail: Nakhod.Vitaliy@knauf.ru

The concept of ecological safety of human life has become fundamental in modern life, one of the components of which is the permissible radiation background. The modern level of society development leads to the fact that one of the most important parameters, which has a direct impact on the choice of construction materials to ensure human activity, is environmental safety, including the radiation component. The purpose of the work is a comprehensive assessment of anthropogenic influence on the change of the natural radiation component at the gypsum deposit in Kholmogorsky district of Arkhangelsk region. In the summer period of 2024 the works on measurement of the ambient gamma radiation dose equivalent rate, specific activity of radionuclides and radon flux density at the developed deposit were carried out. According to the results of experimental works local transfer of radionuclides to overburden dumps was revealed, two areas of the first and second classes by radon hazard degree were singled out. Quantitative indicators of radionuclide activity are within the normative values. Activity of the mining enterprise leads to local changes of radiation background, against the background of decrease of gamma-radiation and radon flux density on the territory of the quarry, increased values of gamma-radiation in overburden dumps are fixed, and uranium concentrations in quarry waters increase.

Keywords: radionuclides, gamma radiation, radon flux density, uranium isotopes, bottom sediments, Arkhangelsk region, gypsum

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center for Comprehensive Study of the Arctic, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences FUUW-2025-0011 "Features of the migration of elements and their isotopes in the components of the environment of the Western sector of the Russian Arctic under conditions of climatic and man-made changes", state registration number 125022002727-2.

Введение

Основополагающим в современной жизни стало понятие экологической безопасности жизнедеятельности человека, одной из составляющих которого является допустимый радиационный фон. Современный уровень развития общества приводит к тому, что одним из важнейших параметров, оказывающим непосредственное влияние на выбор строительных материалов для обеспечения деятельности человека, служит экологическая безопасность, в том числе радиационная составляющая.

Функционирование предприятий по добыче общераспространенных полезных ископаемых оказывает глобальное кратно увеличивающееся влияние на основные биогеоценозы [1]. Радионуклиды представлены во всех оболочках Земли, они содержатся в педосфере, гидросфере, атмосфере, а также в донных отложениях. Ряд ключевых природных радионуклидов представлен в основном Rn^{222}, Ra^{226}, Th^{232}, U^{234}, U^{238}, K^{40}; к антропогенным относится Cs^{137}.

В данной работе рассматриваются комплексный подход к определению возможного негативного воздействия радионуклидов, а также антропогенное влияние на изменение естественной радиационной составляющей. В течение 2024 года были выполнены работы по измерению мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, удельной активности радионуклидов и плотности потока радона на разрабатываемом месторождении.

Цель исследования – комплексная оценка антропогенного влияния на изменение естественной радиационной составляющей на месторождении гипса в Архангельской области.

Материалы и методы исследования

Исследовательские работы проводились в Холмогорском районе Архангельской области в 10 км от Светлозерского поселения на участке недр Чугская площадь. Точки отбора проб располагались на территории горного отвода месторождения гипса «Глубокое», а также в непосредственной близости от него (рис. 1).

В летний период 2024 года в пределах горного отвода и на прилегающих территориях были проведены работы по измерению мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения и плотности потока радона. Также изучалось распределение удельной активности радионуклидов Cs^{137}, K^{40}, Ra^{226}, Th^{232} в донных отложениях и U^{234}, U^{238} в поверхностных водотоках.

Для определения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения участка, разрабатываемого открытым способом месторождения, а также прилегающих территорий в радиусе до 300 м использовался дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКГ-03 (производитель – НПУП «АТОМТЕХ», диапазоны измерений мощности амбиентного эквивалента дозы от 0,03 до 300 мкЗв/ч; пределы допускаемой основной относительной погрешности ±20%). Всего выполнено 230 измерений МАЭД как на территории карьера, так и за его пределами (на близлежащих фоновых территориях, прилегающих к карьеру).

Для выполнения гамма-спектрометрических измерений радионуклидов цезия-137, радия-226, тория-232, калия-40 пробы донных осадков сушили до воздушно-сухого состояния в лаборатории. Счетные образцы из проб подготовлены согласно Инструкции № И-04.15 по подготовке счетных образцов для последующего определения активности радионуклидов на сцинтилляционном гамма-спектрометре «Прогресс-гамма». Измерение удельной активности изотопов проводили на сцинтилляционном гамма-спектрометре «Прогресс-гамма» (полное наименование прибора – Комплекс спектрометрический для измерений активности альфа-, бета- и гамма-излучающих нуклидов «Прогресс» с блоком детектирования БДЭГ3-2У) по методике «Методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения Прогресс (утверждена начальником ЦМИИ ГНМЦ «ВНИИФТРИ» Ярыной В.П. 07.05.1996)» [2] в геометрии Маринелли объемом 1 л. Полученные с помощью программного обеспечения гамма-спектры были расшифрованы с целью получения значений удельной активности цезия-137, радия-226, тория-232 и калия-40 в счетных образцах. Также выполняли заверку значений с использованием низкофонового полупроводникового гамма-спектрометра ORTEC (США) на основе коаксильного детектора GEM10P4-70 из особо чистого германия (HPGe): цифровой анализатор DSPEC LF, программное обеспечение MAESTRO-32.

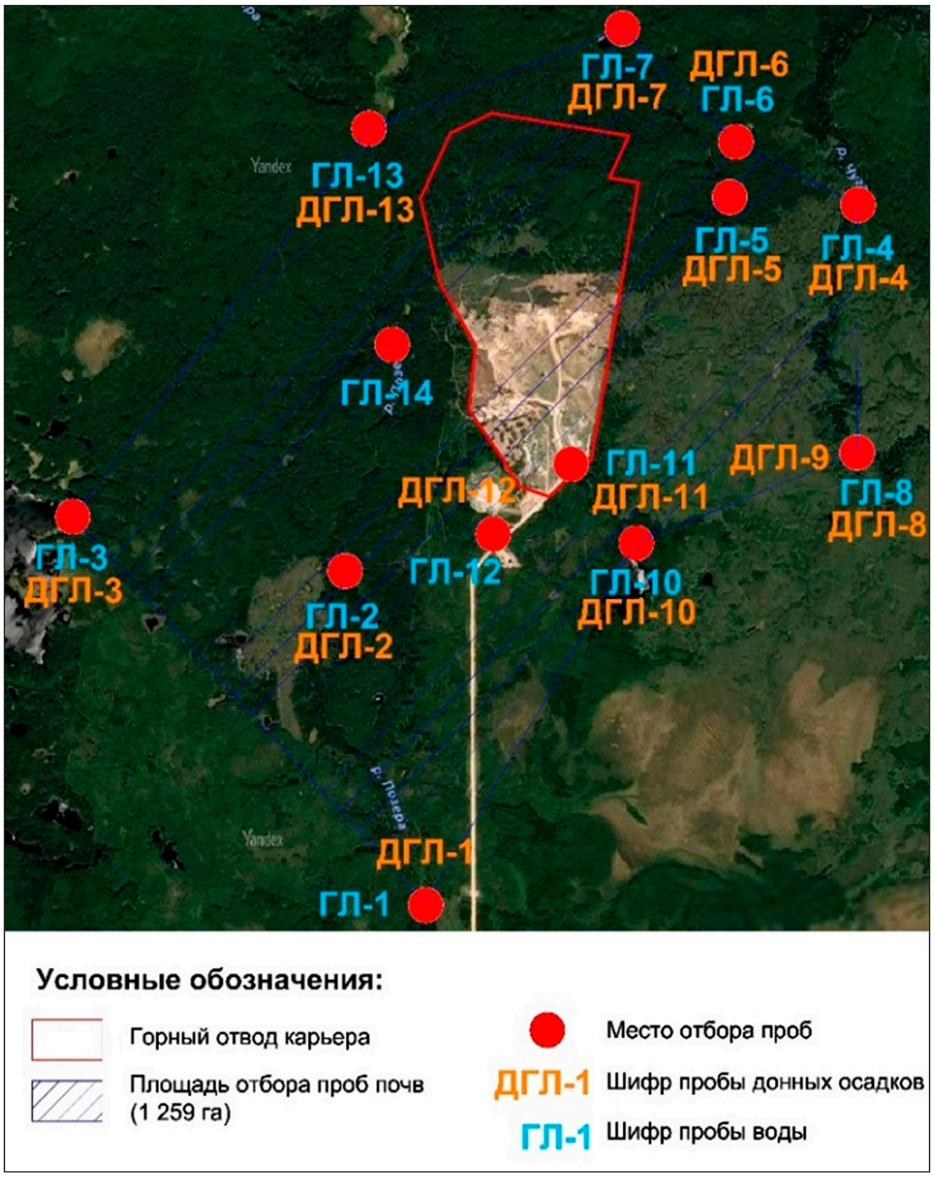

Рис. 1. Район исследования
Источник: составлено авторами

Для определения растворенного урана отбирали пробы воды объемом не менее 5 л. Выделение изотопов урана из подземных вод осуществляли методом осаждения на гидроксидах железа, подготовку счетных образцов и измерение изотопов урана в водах выполняли по методике ФР.1.40.2013.15389 «Методика измерений объемной активности изотопов урана (^{238}U, ^{234}U, ^{235}U) в пробах природных (пресных и минерализованных), технологических и сточных вод альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой», разработанной ФГУП «ВИМС» [3]. Выход урана контролировали введением в пробу изотопного трассера 232U, энергия альфа-излучения которого заметно отличается от энергии естественных изотопов урана. Определение концентраций урана (мкг/л) и изотопного отношения (^{234}U/^{238}U) выполняли после радиохимической подготовки, включавшей переведение пробы в азотнокислый раствор; выделение определяемых изотопов с отделением мешающих радионуклидов; приготовление электролитическим способом тонкого счетного образца на подложке из нержавеющей стали. Спектрометрическое детектирование осуществляли с помощью полупроводникового альфа-спектрометра «Мультирад-АС» с погрешностью 3–7%. Общую концентрацию урана определяли по активности изотопа

^{238}U, составляющего более 99% по массе в изотопной смеси природного урана. При измерении подготовленных счетных образцов (подложек) на альфа-спектрометре получены спектры, расшифровка которых позволила определить такие параметры, как концентрация общего урана, активность урана-238, урана-235 и урана-234, и рассчитать изотопное отношение урана-234 к урану-238.

Определение плотности потока радона (ППР) выполняли на профиле, состоящем из 14 точек отбора. Для полевых измерений ППР применяли Комплекс измерительный для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» – АР (производитель Производственная компания «НТМ-Защита», Россия) с использованием автономной воздуходувки, фильтров-осушителей, накопительной камеры. Диапазон измерения величины плотности потока радона с поверхности грунта составляет от 20 до 10^3 мБк/с·м^2. Предел допускаемой относительной погрешности при измерениях величины плотности потока радона-222 с поверхности грунта не более ±30%.

Результаты исследования и их обсуждение

Для определения МАЭД гамма-излучения был выбран участок площадью более 250 га, который включал территорию горного отвода месторождения гипса, а также 300-метровую зону по периметру карьера. Замеры производили по квадратной сетке с шагом 100 на 100 м, общее количество замеров составило 229 штук. Дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М, оснащенный блоком обработки информации (БОИ) и блоком детектирования гамма-излучения (БДКГ-03), использовали для получения полевых данных. Идея исследования состояла в том, что предполагалось, что в глинах и суглинках содержится повышенное значение естественных радионуклидов, которые в результате деятельности карьера концентрируются в отвалах вскрышных пород. Обобщенная информация представлена в таблице 1.

Таблица 1

Результаты определения МАЭД гамма-излучения

№ п/п	Название точки отбора	Показания МАЭД, мкЗв/ч	СанПиН 2.6.1.2523-09 МАЭД гамма-излучения на рабочем месте, мкЗв/ч	% от допустимой нормы
1	Г-1	0,029	2,5	1,16%
2	Г-10	0,048	2,5	1,92%
3	Г-100	0,03	2,5	1,20%
4	Г-101	0,037	2,5	1,48%
5	Г-102	0,054	2,5	2,16%
6	Г-103	0,015	2,5	0,60%
7	Г-104	0,022	2,5	0,88%
8	Г-105	0,039	2,5	1,56%
9	Г-106	0,048	2,5	1,92%
10	Г-107	0,034	2,5	1,36%
…	….	…..	…	….
222	Г-92	0,047	2,5	1,88%
223	Г-93	0,058	2,5	2,32%
224	Г-94	0,053	2,5	2,12%
225	Г-95	0,038	2,5	1,52%
226	Г-96	0,029	2,5	1,16%
227	Г-97	0,028	2,5	1,12%
228	Г-98	0,027	2,5	1,08%
229	Г-99	0,055	2,5	2,20%
	Среднее	0,0379		1,52%
	Максимум	0,0690		2,76%
	Минимум	0,0110		0,44%
	Станд.откл.	0,0133		0,53%

Примечание: составлено авторами.

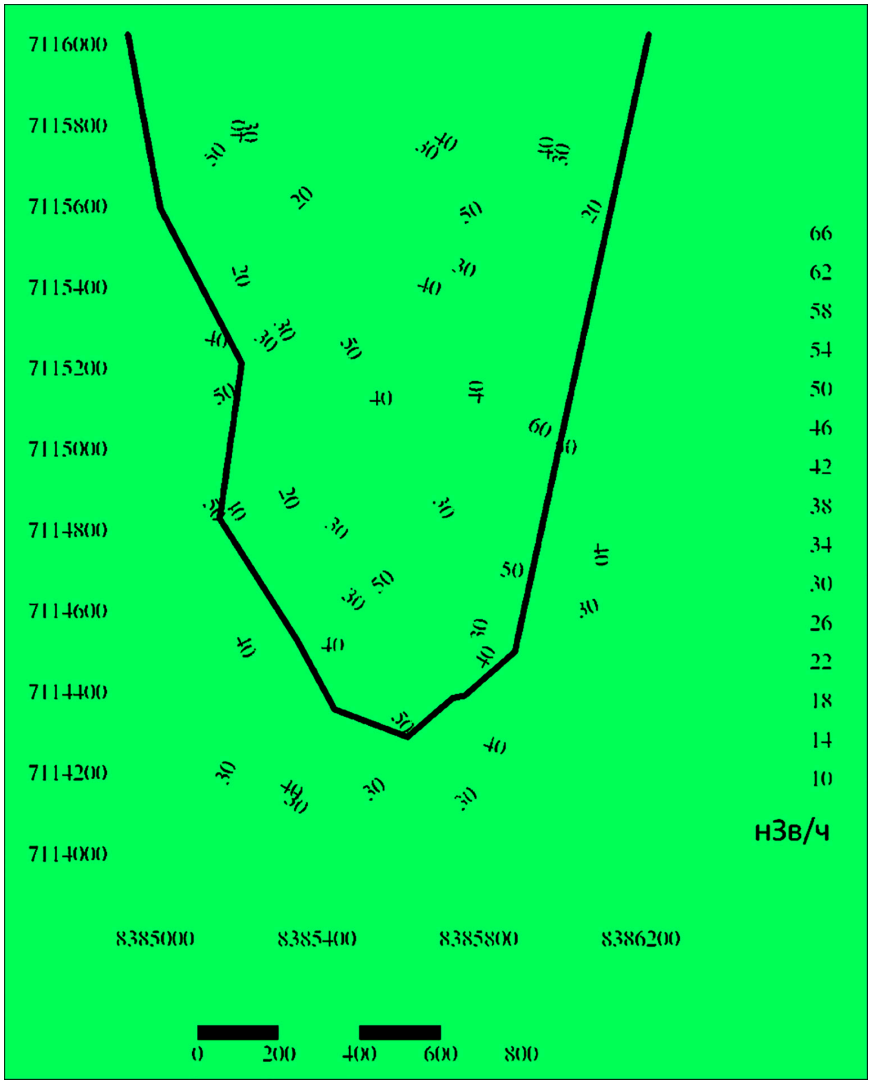

Рис. 2. Площадное распределение МАЭД
Источник: составлено авторами

В результате было установлено, что максимальное значение гамма-излучения составляет не более 2,76% от предельных дозовых нагрузок (ПДН), установленных СанПиН 2.6.1.2523-09 для рабочих мест. Экспериментальные данные стали основой для построения схемы площадного распределения (рис. 2), на которой были выделены участки с пониженными значениями МАЭД. Эти участки приурочены к открытым гипсовым массивам, так как гипсы имеют низкие значения активности естественных радионуклидов. Согласно данным предприятия, разрабатывающего карьер гипса «Глубокое», $А_{эфф}$ составляет 11,1 Бк/кг. Однако в карьере отмечаются участки с повышенными значениями, которые приурочены к отвалам вскрышных пород, представленных смесью суглинков, глин и обломков гипса в разных пропорциях. Следовательно, в результате горных работ происходило локальное перераспределение естественных радионуклидов на территории карьера.

Оценку плотности потока радона (ППР) осуществляли на 14 точках вдоль профиля, пересекающего территорию горного отвода месторождения с юга на север (рис. 3). Для определения ППР использовали радиометр Альфарад+ с автономной воздуходувкой. Основные результаты показаны на рисунке 3. Установлено, что на территории карьера гипса отмечаются значения ППР от 6 до 61 мБк/(м²с), что соответствует первому классу по радоноопасности (ППР менее 80 мБк/м²с). Здесь для устранения проблемы достаточно организовать обычную вентиляцию помещений, в которых располагается рабочий персонал.

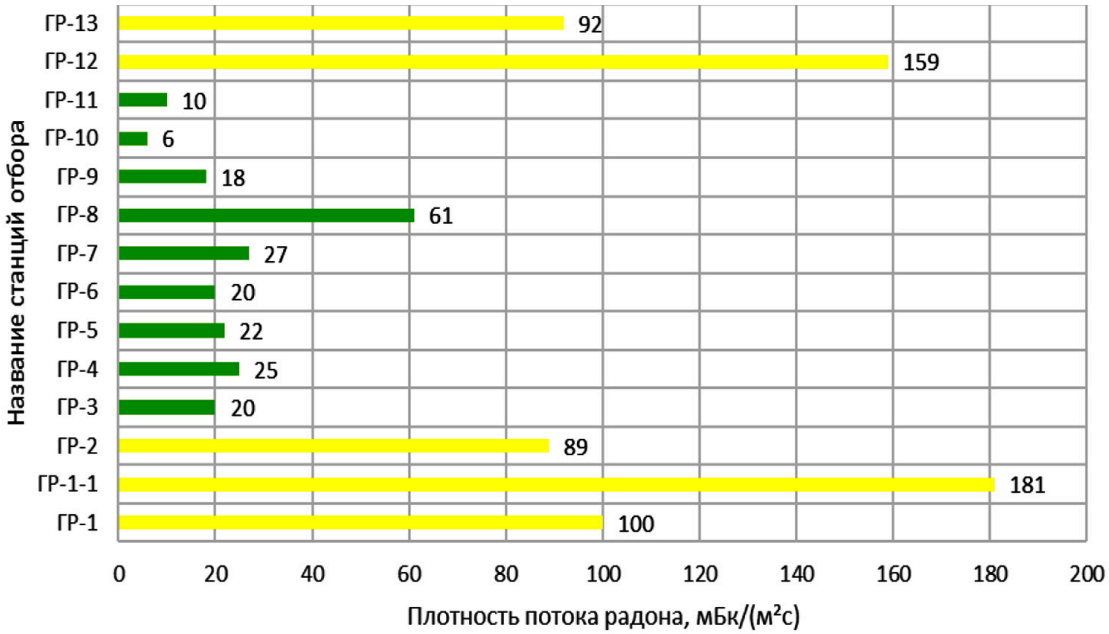

Рис. 3. Распределение плотности потока радона
Источник: составлено авторами

Максимальные значения в 159 и 181 мБк/(м²с) выявлены на территориях за пределами карьера, где отсутствует антропогенное воздействие на почвенный покров. Значения ППР от 80 до 200 мБк/м²с соответствуют второму классу по радоноопасности. Из этого можно сделать вывод, что гипсовая толща представляет собой непроницаемую оболочку, которая минимизирует выходы радона на поверхность, что, в свою очередь, подтверждает фактор влияния геологии подстилающих пород [4–6]. Деятельность горнорудного предприятия изменяет естественный фон, снижая плотность потока радона в выработанном пространстве карьера.

Таблица 2

Распределение радионуклидов и химических элементов
в донных отложениях и физико-химические параметры донных отложений

	Na	K	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Zn	Cu	Cr	Pb	Ni	Mo	Cd	Co	Ti	V
ДГЛ-1	48	455	2880	1740	32	7300	163	22	2,3	9	2,3	7,2	5,1	0,8	3	73	11
ДГЛ-2	44	373	3030	1250	31	6020	124	16	1,8	7	1,4	5,4	3,6	0,6	1	61	8
ДГЛ-3	35	75	383	241	2	791	8	2	0,3	1,4	0,7	0,8	2,9	0,1	0	68	2
ДГЛ-4	43	312	4560	2470	57	3330	98	9	1,8	3,5	0,8	3,8	6,5	0,4	0	41	4
ДГЛ-5	49	652	3280	2060	23	6500	74	18	5,3	9,6	2,3	9,4	5	0,7	2	73	11
ДГЛ-6	84	1080	28900	4000	121	7070	95	27	43	19	8,2	15	6,7	1,2	1	145	22
ДГЛ-7	79	1150	16400	2550	96	10300	74	36	16	20	5,1	16	9,9	1,3	2	121	19
ДГЛ-8	71	484	12700	3950	290	3140	171	8	2,3	4,2	1,2	4,4	0	0,5	0	45	5
ДГЛ-10	40	136	5370	1080	15	2740	52	13	7,1	5,9	4,8	5,6	3	0,5	0	78	8
ДГЛ-13	45	226	3100	1000	34	5490	196	15	1,9	5,2	1,3	4,6	2	0,6	1	50	6

	> 500μ	250-500μ	100-250μ	45-100μ	<45μ	CO3	OM	pH	Eh	SS	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
ДГЛ-1	4,7	16,3	46,5	21,4	11,1	0,63	6,47	5,9	118	0,9	4,5	20,9	13,2	374
ДГЛ-2	6,5	16,5	57,9	13,6	5,5	0,53	5,37	6,6	83	0,7	3,5	16,6	11,3	350
ДГЛ-3	28,2	44,6	22,6	4	0,6	0,14	0,39	5,9	127	0,2	6,2	11,2	3,3	339
ДГЛ-4	42,6	46,5	7,8	2,2	0,9	1,13	0,74	6,6	96	0,4	1,6	10,8	4,7	252
ДГЛ-5	14,4	21,3	37,7	15,6	11	1,31	6,05	6,2	85	1,1	6,1	17,5	19,9	407
ДГЛ-6	64,9	15,8	10,9	4,9	3,5	2,41	45,6	6,7	67	3,3	20,8	23,5	11,9	302
ДГЛ-7	11,5	24,1	30,8	17,8	15,8	1,61	44,5	6	116	3,5	10,2	13,3	8,7	209
ДГЛ-8	10,3	36,5	46,6	5	1,6	1,32	3,72	7	73	0,9	1,3	20,6	12,1	381
ДГЛ-10	20,2	14,5	33,9	24,2	7,2	0,45	38,3	5,5	132	0,6	10,3	27	5,2	199
ДГЛ-13	7	34	43,6	11	4,4	0,6	5,83	6,5	63	0,8	1,5	18	5,9	396

Примечание: составлено авторами.

Распределение удельной активности радионуклидов Cs^{137}, K^{40}, Ra^{226}, Th^{232} в донных отложениях является частой практикой для анализа экологического состояния регионов [7–9]. Донные отложения служат накопителями радионуклидов, при этом они поглощают более 80% радиоактивности [10, 11]. В период летней экспедиции 2024 года было отобрано 10 проб донных отложений в реках и озерах, расположенных в непосредственной близости от месторождения гипса (рис. 1). Полученные данные, а также данные по химическому составу и физико-химическим свойствам проб представлены в таблице 2. Полученные значения удельной активности радионуклидов сравнивали с кларковыми значениями изотопов в земной коре или почвах. Для Ra^{226} и Th^{232} среднее значение удельной активности радионуклидов составило 17,94 Бк/кг и 10,09 Бк/кг соответственно, что не превышает 62% и 41% от кларковых значений почв [12]. При сравнении полученных значений радионуклида K^{40} с кларками элемента в почвах (370 Бк/кг), а также в земной коре (655 Бк/кг) авторами выявлено четыре пробы, в которых значения превышают кларк для почв, а именно ДГЛ-1 – 1 373,6 Бк/кг; ДГЛ-5 – 407,4 Бк/кг; ДГЛ-8 – 380,7 Бк/кг; ДГЛ-13 – 396,2 Бк/кг. Точки отбора проб с превышенными значениями находятся в отложениях рек Чуга и Позера. Средний показатель для удельной активности K^{40} 320,87 Бк/кг не превышает кларк для почв и земной коры. При сравнении удельной активности антропогенного радионуклида Cs^{137} использовали данные, полученные при исследовании озер и рек Архангельской области и Республики Карелия [13]. Показатели в 1–124 Бк/кг были установлены в озерах Архангельской области. Выявленные значения в 1,6–20,8 Бк/кг не превышают фоновых значений для региона. Кроме сравнения результатов исследования с кларковыми значениями, была рассчитана удельная эффективная активность естественных радионуклидов:

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1{,}31A_{Th} + 0{,}085\ A_K,$$

где A_{Ra}, A_{Th}, A_K – удельные активности радия, тория и калия в Бк/кг.

Результаты расчетов представлены в таблице 3. В рамках радиационно-гигиенической оценки полученные значения удельной эффективной активности сравнивали с показателями ГОСТ 8267-93, в котором установлено что при $A_{эфф}$ менее 370 Бк/кг материал (щебень и гравий) может применяться во вновь строящихся и общественных зданиях. Полученные результаты показали отсутствие точек отбора проб с превышением предельного значения $A_{эфф}$ в 370 Бк/кг, среднее значение $A_{эфф}$ – 58,4 Бк/кг, что составляет 15,8% от нормативного.

Таблица 3

Удельная эффективная активность естественных радионуклидов

Донные осадки (шифр)	$A_{эфф}$, Бк/кг	% от ПДС (370 Бк/кг)
ДГЛ-1	69,95	19%
ДГЛ-2	61,19	17%
ДГЛ-3	45,23	12%
ДГЛ-4	38,37	10%
ДГЛ-5	78,2	21%
ДГЛ-6	64,76	18%
ДГЛ-7	42,45	11%
ДГЛ-8	68,81	19%
ДГЛ-10	55,97	15%
ДГЛ-13	59,41	16%
Среднее	58,432	16%
Min	38,369	10%
Max	78,198	21%

Примечание: составлено авторами.

В рамках статической обработки результатов была подготовлена корреляционная матрица (табл. 4). На ее основе выявлен ряд элементов с сильными положительными связями (коэффициент корреляции более 0,87). Также на основе корреляционной матрицы можно сделать вывод об отсутствии элементов с сильной отрицательной связью. Отмечается сильная положительная зависимость между Cs^{137} и Pb r=0,95; Cs^{137} и Ti r=0,94; Cs^{137} и Cu r=0,93, что свидетельствует об их антропогенном источнике. График взаимодействия сильных связей представлен на рисунке 4.

Эксперимент, направленный на изучение распределения изотопов урана в поверхностных водах, включал в себя отбор 14 проб для определения активности изотопов U^{238}, U^{234}, U^{235}, U^{232}, соотношения между U^{234} и U^{238}, а также концентрации урана. Подготовка (осаждение изотопов на хлорном железе), а также замеры на альфа-спектрометре выполняли в лаборатории радиологии ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН. Результаты исследования представлены в таблице 5.

Таблица 4

Корреляционная матрица связей

	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	Na	K	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Zn	Cu	Cr	Pb	Ni	Mo	Cd	Co	Ti	V
137Cs	1	0,42	0,1	-0,42	0,56	0,62	0,77	0,34	-0,01	0,33	-0,43	0,55	0,93	0,74	0,95	0,72	0,49	0,61	0,09	0,94	0,8
226Ra	0,42	1	0,27	-0,02	0,21	0,06	0,32	0,24	0,19	0,05	0,24	0,17	0,36	0,19	0,54	0,21	-0,3	0,22	0,05	0,27	0,29
232Th	0,1	0,27	1	0,52	0,34	0,48	0,18	0,42	0,21	0,5	0,24	0,38	0,18	0,37	0,15	0,43	0,09	0,43	0,58	0,19	0,42
40K	-0,42	-0,02	0,52	1	-0,16	-0,19	-0,3	-0,05	0,1	-0,06	0,51	-0,28	-0,3	-0,32	-0,48	-0,31	-0,54	-0,25	0,27	-0,39	-0,27
Na	0,56	0,21	0,34	-0,16	1	0,9	0,93	0,85	0,69	0,59	0,16	0,67	0,75	0,8	0,67	0,8	0,41	0,79	0,21	0,69	0,79
K	0,62	0,06	0,48	-0,19	0,9	1	0,81	0,7	0,37	0,81	0	0,86	0,75	0,95	0,7	0,95	0,7	0,93	0,48	0,79	0,93
Ca	0,77	0,32	0,18	-0,3	0,93	0,81	1	0,8	0,56	0,44	0,01	0,59	0,92	0,78	0,83	0,77	0,41	0,73	0,03	0,79	0,81
Mg	0,34	0,24	0,42	-0,05	0,85	0,7	0,8	1	0,82	0,33	0,28	0,37	0,59	0,51	0,46	0,55	0,22	0,55	0	0,37	0,54
Sr	-0,01	0,19	0,21	0,1	0,69	0,37	0,56	0,82	1	0,02	0,4	0,03	0,22	0,14	0,1	0,17	-0,23	0,19	-0,23	0,02	0,14
Fe	0,33	0,05	0,5	-0,06	0,59	0,81	0,44	0,33	0,02	1	0,26	0,95	0,44	0,85	0,49	0,85	0,69	0,92	0,84	0,59	0,81
Mn	-0,43	0,24	0,24	0,51	0,16	0	0,01	0,28	0,4	0,26	1	0,1	-0,15	-0,07	-0,23	-0,06	-0,33	0,14	0,31	-0,34	-0,04
Zn	0,55	0,17	0,38	-0,28	0,67	0,86	0,59	0,37	0,03	0,95	0,1	1	0,61	0,95	0,7	0,94	0,76	0,98	0,73	0,77	0,92
Cu	0,93	0,36	0,18	-0,3	0,75	0,75	0,92	0,59	0,22	0,44	-0,15	0,61	1	0,8	0,92	0,79	0,5	0,72	0,12	0,9	0,86
Cr	0,74	0,19	0,37	-0,32	0,8	0,95	0,78	0,51	0,14	0,85	-0,07	0,95	0,8	1	0,83	0,99	0,76	0,97	0,55	0,9	0,99
Pb	0,95	0,54	0,15	-0,48	0,67	0,7	0,83	0,46	0,1	0,49	-0,23	0,7	0,92	0,83	1	0,82	0,52	0,76	0,19	0,93	0,88
Ni	0,72	0,21	0,43	-0,31	0,8	0,95	0,77	0,55	0,17	0,85	-0,06	0,94	0,79	0,99	0,82	1	0,75	0,97	0,54	0,87	0,98
Mo	0,49	-0,3	0,09	-0,54	0,41	0,7	0,41	0,22	-0,23	0,69	-0,33	0,76	0,5	0,76	0,52	0,75	1	0,72	0,47	0,65	0,71
Cd	0,61	0,22	0,43	-0,25	0,79	0,93	0,73	0,55	0,19	0,92	0,14	0,98	0,72	0,97	0,76	0,97	0,72	1	0,65	0,8	0,96
Co	0,09	0,05	0,58	0,27	0,21	0,48	0,03	0	-0,23	0,84	0,31	0,73	0,12	0,55	0,19	0,54	0,47	0,65	1	0,34	0,54
Ti	0,94	0,27	0,19	-0,39	0,69	0,79	0,79	0,37	0,02	0,59	-0,34	0,77	0,9	0,9	0,93	0,87	0,65	0,8	0,34	1	0,92
V	0,8	0,29	0,42	-0,27	0,79	0,93	0,81	0,54	0,14	0,81	-0,04	0,92	0,86	0,99	0,88	0,98	0,71	0,96	0,54	0,92	1

Примечание № 1: составлено авторами.

Примечание № 2: Красным цветом обозначены значения, которые являются значимыми. Из них были выбраны пары элементов, у которых коэффициент корреляции выше 0,87.

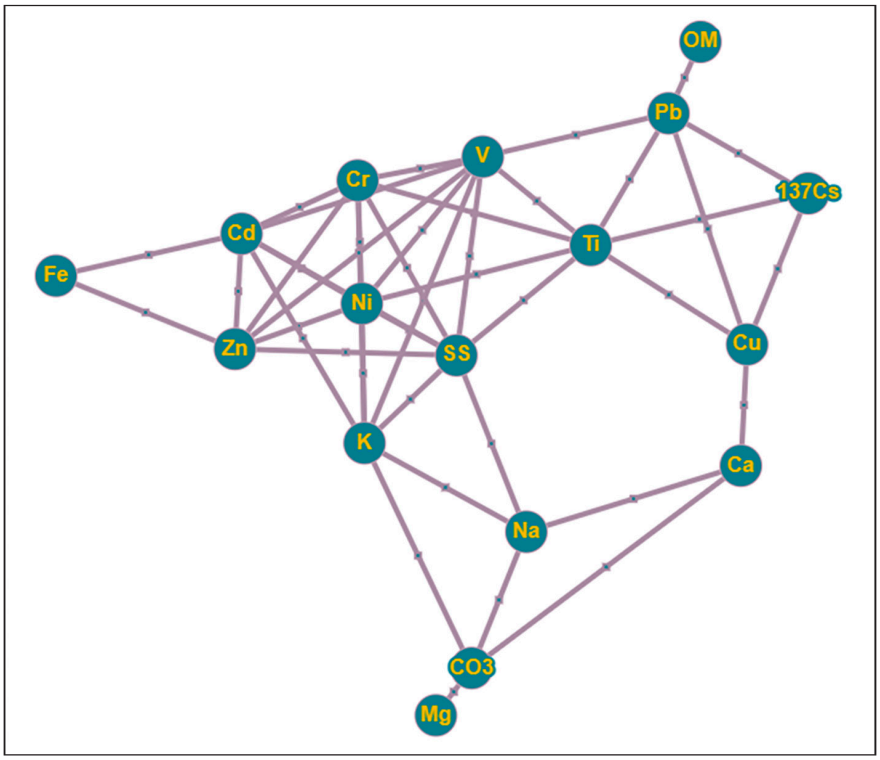

Рис. 4. График сильных связей между элементами
Источник: составлено авторами

Таблица 5

Результаты отбора проб поверхностных вод на изотопы урана

№	Название, дата	U-238 (Бк/л)	U-234 (Бк/л)	U-235 (Бк/л)	U-232 (Бк/л)	234U/238U	Концентрация, мкг/л (по урану 238)
ГЛ-1	15.08.23.	0,00304	0,00314	0,00038	0,03800	1,03	0,246
ГЛ-2	р. Позера, 15.08.23.	0,01053	0,01721	0,00114	0,03800	1,63	0,85
ГЛ-3	Сенное, 15.08.23.	0,00096	0,00137	0,00027	0,03800	1,43	0,078
ГЛ-4	Чугаз, 16.08.23.	0,02205	0,03304	0,00081	0,03800	1,50	1,781
ГЛ-5	Озеро 4 , 16.08.23.	0,00018	0,00024	0,00001	0,03800	1,33	менее 0.015
ГЛ-6	Озеро 1 , 16.08.23.	0,00938	0,01003	0,00040	0,03800	1,07	0,757
ГЛ-7	Озеро 2, 16.07.23.	0,00511	0,00578	0,00012	0,03800	1,13	0,413
ГЛ-8	р. Чуга, 17.08.23.	0,00851	0,01176	0,00078	0,03800	1,38	0,687
ГЛ-9	Приток Чуга, 17.08.23.	0,01673	0,01865	0,00134	0,03800	1,11	1,351
ГЛ-10	оз. Карос, 17.08.23.	0,00983	0,01296	0,00134	0,03800	1,32	0,794
ГЛ-11	ЗУМПФ, 17.08.23.	0,09090	0,11090	0,00453	0,03800	1,22	7,342
ГЛ-12	18.08.23.	0,02431	0,02945	0,00192	0,03800	1,21	1,963
ГЛ-13	Позера 4 , 18.08.23.	0,01795	0,02126	0,00129	0,03800	1,18	1,449
ГЛ-14	Позера 3, 18.08.23.	0,00577	0,01009	0,00052	0,03800	1,75	0,47
	максимальное	0,09090	0,11090	0,00453	0,03800	1,7487	7,3420
	минимальное	0,00018	0,00024	0,00001	0,03800	1,0329	0,0780
	среднее	0,01609	0,02042	0,00106	0,03800	1,3076	1,3985
	стандартное отклонение	0,02280	0,02783	0,00114	0,00000	0,2132	1,8771

Примечание: составлено авторами.

Максимумы активностей изотопов урана, а также его концентрации отмечаются в точке ГЛ-11 (зумпф для сбора карьерных вод), минимум же приурочен к естественному небольшому озеру, находящемуся за пределами карьера и имеющему атмосферное питание. Во время проведения экспедиции уровень поверхностных вод был низкий, в связи с этим питание озера было преимущественно за счет атмосферной воды, которая, в свою очередь, имеет низкие значения активности изотопов урана. К тому же экспедиция проводилась в летнюю межень, в связи с чем были отмечены максимальные значения из-за концентрирования в результате испарения. Максимальные концентрации урана в водах карьера обусловлены интенсивным химическим выветриванием вскрышных пород в отвалах. В зумпфе также выявлены максимальные значения минерализации воды за счет подземного питания. В истоках реки Позера выше по течению от карьера урана меньше из-за большей составляющей атмосферных вод, далее идет смешивание с подземными водами. Пробы в р. Чуга отбирались в местах, где отмечались выходы подземных карстовых вод, поэтому в них также наблюдаются повышенные концентрации урана [14]. Отношение активностей изотопов урана $^{235}U/^{238}U$ соответствует природному, что свидетельствует об отсутствии поступления данного изотопа из техногенных источников [15]. Влияние карьера на состав прилегающих водотоков обусловлено тем, что в результате проведения добычных, взрывных работ возрастает трещиноватость породного массива, что увеличивает скорость растворения пород и приводит к увеличению концентрации урана в зумпфе, а также в водах рек Позера и Чуга.

Заключение

Итогом исследовательской работы по изучению радиационного фона на месторождении гипса в Архангельской области является тот факт, что общий фон находится в пределах нормативных требований. Параметры МАЭД гамма-излучения составляют не более 3% от предельно допустимых значений. На территории горного отвода выделяются два участка по степени радоноопасности, первого и второго классов, при этом умеренная защита необходима на участке второго класса, а на участке первого класса достаточно обычной вентиляции помещений, в которых находится рабочий персонал. Активности радионуклидов в донных отложениях и воде не превышают кларковых значений и нормативных показателей.

Также нужно отметить, что деятельность горного предприятия приводит к локальным изменениям радиационного фона. Так, на фоне снижения гамма-излучения и плотности потока радона на территории карьера фиксируются повышенные значения гамма-излучения в отвалах вскрышных пород, а в карьерных водах повышаются концентрации урана.

Список литературы

1. Mirzoyeva N., Gulina L., Gulin S., Plotitsina O., Stetsuk A., Arkhipova S., Korkishko N., Eremin O. Radionuclides and mercury in the salt lakes of the Crimea // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 2015. V. 33. № 6. P. 1413–1425. DOI: 10.1007/s00343-015-4374-5.

2. Методика измерения активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения Прогресс (утверждена начальником ЦМИИ ГНМЦ «ВНИИФТРИ» Ярыной В.П. 07.05.1996).

3. Методика измерений объемной активности урана (^{238}U, ^{234}U, ^{235}U) в пробах природных (пресных и минерализованных), технологических и сточных вод альфа спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. М.: ФГУП ВИМС, 2013. 16 с.

4. Ciotoli G., Voltaggio M., Tuccimeie P. et. al. Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region: a methodological proposal for the European Atlas of Natural Radiation // J. Environ. Radioact. 2017. Vol. 166. Is. 2. P. 355-375.

5. Pasztor L., Szabo K., Szatmari G. e. a. Mapping geogenic radon potential by regression kriging // Sci. Total Environ. 2016. V. 544. P. 883-891.

6. Bossew P., Cinelli G., Ciotoli G., Crowley Q.G., De Cort M., Elío Medina J., Gruber V., Petermann E., Tollefsen T. Development of a Geogenic Radon Hazard Index-Concept, History, Experiences // Int J Environ Res Public Health. 2020. Vol. 17. Is. 11. P. 4134. DOI: 10.3390/ijerph17114134.

7. Caridi F., Agostino M.D., Marguccio S., Belvedere A., Belmusto G., Marcianò G., Sabatino G., Mottese A. Radioactivity, granulometric and elemental analysis of river sedi- ments samples from the coast of Calabria, south of Italy // European Physical Jour nal Plus. 2016. DOI: 10.1140/epjp/i2016-16136-1.

8. Гусева А.С., Устинов С.А., Петров В.А. Распределение природных радионуклидов в почвах на территории Новой Москвы // Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration. 2019. № 5. С. 88-94. DOI: 10.32454/0016-7762-2019-5-88-94.

9. Наход В.А., Малов А.И., Дружинин С.В. Исследование негативного воздействия разработки карьера по добыче гипса на состав донных отложений и почвенного покрова (на примере Холмогорского района Архангельской области) // Успехи современного естествознания. 2024. № 3. С. 58-67. URL: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38230 (дата обращения: 29.02.2025). DOI: 10.17513/use.38230.

10. Monged M.H.E., Hassan H.B., El-Sayed S.A. Spatial distribution and ecological risk assessment of natural radionuclides and trace elements in agricultural soil of northeastern Nile Valley, Egypt // Water, Air, and Soil Pollution. 2020. Vol. 231. Is. 7. P. 338. DOI: 10.1007/s11270-020-04678-9.

11. Трапезников А.В., Коржавин А.В., Трапезникова В.Н, Николкин В.Н. Миграция и накопление техногенных радионуклидов в пресноводных экосистемах на примере рек Самсоновская, Лев и Вандрас, относящихся к Обь-Иртышскому речному бассейну // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56, № 2. С. 197. DOI: 10.7868/S0869803116020120.

12. Смыслов А.А., Моисеенко У.И., Чадович Т.З. Тепловой режим и радиоактивность Земли // Л.: Недра, 1979. 345 с.

13. Киселев Г.П., Яковлев Е.Ю., Дружинин С.В., Киселева И.М., Баженов А.В., Быков В.М. Естественная и техногенная радиоактивность донных отложений озер Северо-Запада России (на примере республики Карелия и Архангельской области) // Успехи современного естествознания. 2017. № 12. С. 152-157. URL: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36622 (дата обращения: 29.03.2025).

14. Малов А.И., Киселев Г.П., Зыков С.Б. Особенности разделения изотопов урана в подземных водах венда Мезенской синеклизы // Матер. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 80-летию кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Ин-та геологии и нефтегазового дела НИТПУ. Томск, 2010. С. 112–116.

15. Зыкова Е.Н., Зыков С.Б., Яковлев Е.Ю., Ларионов Н.С. Четные изотопы урана в поверхностных водах группы малых озер Северо-Запада Архангельской области // Успехи современного естествознания. 2018. № 4. С. 114-120. URL: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36734 (дата обращения: 29.03.2025).