



## Динамика изменения состава карьерных вод на примере месторождения гипса в Архангельской области

В. А. Наход

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики  
им. Н. П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, Россия  
Nakhod.Vitaliy@knauf.ru

В статье представлены результаты двухлетнего исследования состава карьерных вод на месторождении гипса, расположенного в Холмогорском районе Архангельской области. Систематический мониторинг включал определение физико-химических показателей в ключевых технологических зонах: водосборнике карьера (зумпфе) и пруде-отстойнике очистных сооружений. Для получения аналитической базы применялись стандартные методы: ГОСТ 31957-2012, ПНДФ 14.1:2:4.157-99 и прочие. Установлено, что показатель сухого остатка вод варьирует в диапазоне 1190–6700 мг/дм<sup>3</sup> с выраженной сезонной динамикой: максимум в весенний период (март) и минимум летом (июнь). Доминирующим компонентом является сульфат-ион (до 3700 мг/дм<sup>3</sup>), что характерно для месторождений гипса. Выявлены превышения ПДК для речных вод, используемых в рыбохозяйственных и (или) питьевых целях, по содержанию сульфатов и стронция, а также эпизодически – по магнию, железу, цинку, меди, кадмию и алюминию. Показана эффективность очистных сооружений, обеспечивающих снижение концентраций взвешенных веществ до 29 %. Результаты согласуются с данными других исследователей, но демонстрируют специфику рассматриваемой территории – повышенное содержание сульфатов и стронция и замедленную седиментацию взвешенных веществ. Полученные данные представляют интерес для горнодобывающих предприятий, природоохранных организаций и научных учреждений, занимающихся проблемами экологии горного производства.

**Ключевые слова:** гипсовый карьер, карьерные воды, сульфаты, стронций, экологический мониторинг, очистные сооружения

## Dynamics of changes in the composition of quarry waters as exemplified by the gypsum deposit at the Arkhangelsk region

V. A. Nakhod

N. P. Laverov Federal Research Center for complex study of the Arctic UB RAS, Arkhangelsk, Russia

The article presents the results of a two-year study of the composition of quarry waters at a gypsum deposit located in the Kholmogory District of the Arkhangelsk Region. Systematic monitoring included determining the physicochemical parameters in key process zones: the quarry water collector (sump) and the settling pond of the treatment facilities. To obtain the analytical base, standard methods were used: GOST 31957-2012, PNDP 14.1:2:4.157-99, and others. It was found that the dry residue indicator of water varies in the range of 1190–6700 mg/dm<sup>3</sup> with pronounced seasonal dynamics: maximum in spring (March) and minimum in summer (June). The dominant component is sulfate ion (up to 3700 mg/dm<sup>3</sup>), which is typical for gypsum deposits. Exceedances of the maximum permissible concentrations for river waters used for fishery and/or drinking purposes were revealed for the content of sulfates and strontium, and occasionally for magnesium, iron, zinc, copper, cadmium and aluminum. Efficiency of treatment facilities was demonstrated, ensuring a reduction in pollutant concentrations to 29 %. The results are consistent with the data of other researchers, but demonstrate the specificity of the territory under consideration – increased content of sulfates and strontium and slow sedimentation of suspended matter. The obtained data are of interest to mining enterprises, environmental organizations and scientific institutions dealing with the problems of ecology of mining production.

**Keywords:** gypsum quarry, quarry water, sulphates, strontium, environmental monitoring, treatment facilities

### Введение

Карьерные воды, формирующиеся при разработке месторождений полезных ископаемых, являются одним из основных объектов, оказывающих возможное негативное влияние на компоненты окружающей среды. По этой причине предприятие по добыче гипсового камня в Архангельской области ведет постоянный мониторинг состава карьерных вод. Согласно утвержденному проекту на разработку месторождения гипса, недропользователь обязан контролировать только количество нефтепродуктов и взвешенных веществ. В случае же гипсовых месторождений на северных территориях особую значимость приобретает контроль содержания сульфатов, стронция, а также тяжелых ме-

таллов и взвешенных веществ, поскольку их повышенные концентрации могут оказывать негативное влияние на жизнедеятельность гидробионтов и качество поверхностных вод, используемых населением для хозяйственно-питьевых нужд (Сидкина, 2023). Целью данного исследования являлся анализ изменения состава карьерных вод на гипсовом месторождении за период с декабря 2022 по декабрь 2024 года. Основными задачами были следующие: сравнение качества карьерных вод до и после очистных сооружений, оценка сезонных колебаний основных компонентов состава воды, выявление влияния технологических процессов добычи гипса на состав воды, определение эффективности работы очистных сооружений. Актуальность

**Для цитирования:** Наход В. А. Динамика изменения состава карьерных вод на примере месторождения гипса в Архангельской области // Вестник геонаук. 2025. 7(367). С. 35–48. DOI: 10.19110/geov.2025.7.4

**For citation:** Nakhod V. A. Dynamics of changes in the composition of quarry waters as exemplified by the gypsum deposit at the Arkhangelsk region. Vestnik of Geosciences, 2025, 7(367), pp. 35–48, DOI: 10.19110/geov.2025.7.4



исследования согласуется с результатами исследований последних лет (Caselle, 2022; Caselle, 2020; Al-Harathi, 2001), где отмечается необходимость разработки региональных нормативов для водных объектов. В частности, в методических работах ИМПГЭ 70-х годов XX века и в современных работах (Торосян, 2012) обоснована важность учета геохимических особенностей водных объектов промышленных районов.

### Объект и методы исследования

Месторождение гипса расположено в Холмогорском районе Архангельской области и представляет собой типичное пластовое месторождение осадочных горных пород с горизонтальной залежью мощностью до 20 метров. Разработка карьера начата в 2008 году. Карьер включает один добычной и один вскрышной уступы, средней мощностью 7 метров. Химический (микроэлементный) состав полезного ископаемого представлен в таблице 1.

Гидрогеологические условия месторождения характеризуются приуроченностью к северо-западной части Северо-Двинского артезианского бассейна. Основными реками, расположенными рядом с участком исследования, являются Чуга и Позера — притоки нерестовой реки Пинега. Основными водоносными горизонтами и комплексами в районе работ являются: слабоводоносный верхнечетвертичный-современный комплекс; слабоводоносный уфимско-нижекамский водоносный терригенный комплекс; водоносная ассельско-сакмарская сульфатно-карбонатная серия; водоносная средне-верхнекаменноугольная карбонатная серия. Непосредственно в карьере существенную роль играют грунтовые воды четвертичных песчано-глинистых отложений и карстовые воды, приуроченные к карстовым пустотам и трещинам в толще гипсовых пород. Единый устойчивый водоносный горизонт, связанный с базисом разгрузки, лежит ниже подошвы гипсовой толщи (ниже абс. отм. +40 м). Встречающиеся на различных гипсометрических уровнях подземные воды связаны с локальными водоносными горизонтами, приуроченными к локальным системам трещин и карстовых полостей. Река Позера не является базисом разгрузки подземных вод. Базис разгрузки подземных вод связан с подземной рекой, проявлением которой на поверхности является расположенная в пределах участка работ карстовая долина. Монолитные гипсы имеют крайне низкую водопроницаемость (коэффициент фильтрации составляет тысячные доли метра в сутки). Геолого-гидрологический разрез представлен на рисунке 1.

Отбор проб осуществлялся во второй секции пруда-отстойника и в водосборнике карьера (зумпфе), расположенном на абсолютной отметке +52 метра. Глубина отстойника составляет около 4 метров, зумпфа — 2.5 метра. В зумпфе карьерные воды отстаивались и далее по системе карьерного водоотлива транспортировались в пруд-отстойник, состоящий из двух секций с площадью 600 и 1800 м<sup>2</sup> (рис. 2). Очистные сооружения предназначены для очистки карьерных вод, загрязненных только нефтепродуктами и взвешенными веществами, методом отстаивания и фильтрации. Отстойник работает по принципу разделения веществ за счет разности удельного веса воды и нефтепродук-

**Таблица 1.** Химический состав гипсового камня карьера «Глубокое» Архангельской области (%)

**Table 1.** Chemical composition of gypsum stone quarry «Glubokoye», Arkhangelsk region

Параметр / Parameter	Значение / Value
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	88.7
SrSO <sub>4</sub>	0.21
CaCO <sub>3</sub>	3.51
MgCO <sub>3</sub>	1.84
Органические вещества Organic substances	2.8
Na <sub>2</sub> O	0.0482
K <sub>2</sub> O	0.083
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1255
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.28
Бентонитовые глины / Bentonite clays (Si <sub>8</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub> *nH <sub>2</sub> O)	0.1
Кварцевый песок (SiO <sub>2</sub> ) Quartz sand (SiO <sub>2</sub> )	2.3

тов и малых скоростей движения. При этом частицы веществ тяжелее воды выпадают в осадок, а нефтепродукты всплывают на поверхность воды. Количество точек и параметры отбора проб (одна точка приповерхностных вод) приняты согласно проекту разработки месторождения гипса. Продолжительность эксперимента — с декабря 2022 по декабрь 2024 года, ранее работы за контролем качества карьерных вод осуществлялись только по двум показателям (нефтепродукты и взвешенные) в рамках программы горно-экологического мониторинга промышленного предприятия. Данные по составу карьерных вод в начальный период разработки отсутствуют. Анализ проб карьерных вод проводился в аккредитованной лаборатории ФГБУ «ЦЛАТИ по СЗФО» «ЦЛАТИ по Архангельской области» с использованием следующих методов (табл. 2).

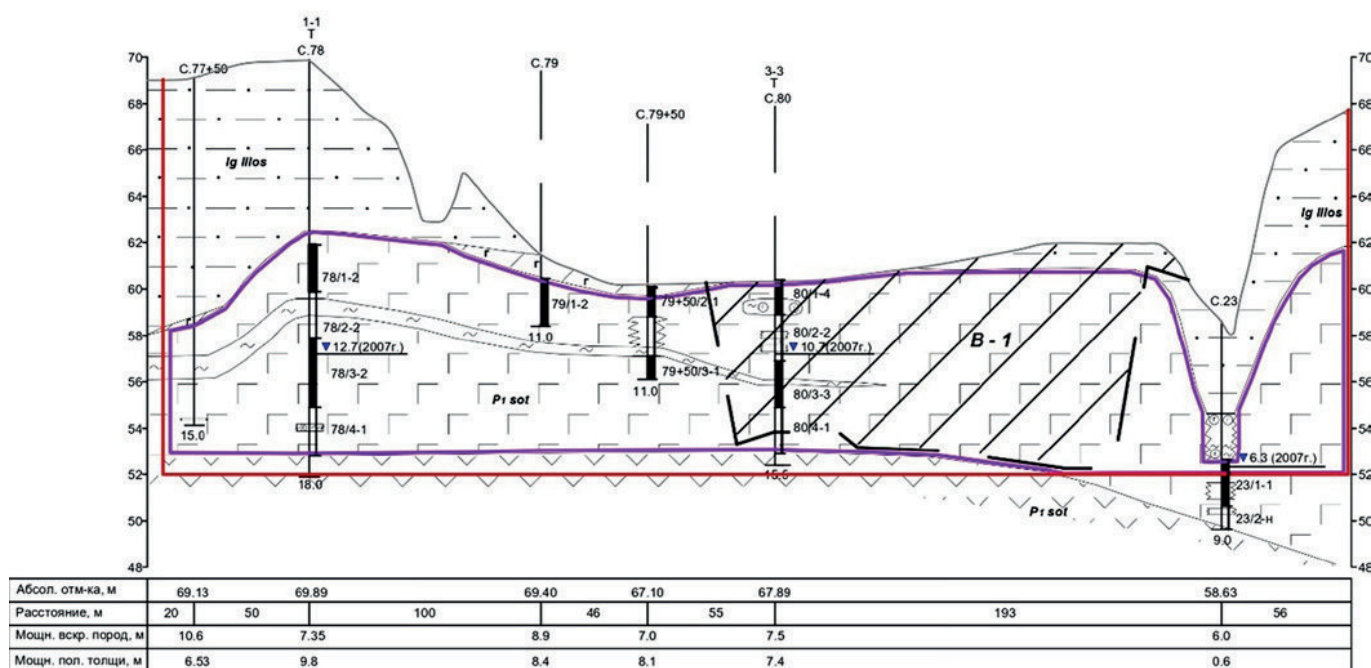
Отбор проб проводился с соблюдением следующих требований. Перед подготовкой к отбору проб открытый пробоотборник из нержавеющей стали ополаскивался анализируемой водой не менее трех раз, для хранения воды использовалась химически инертная посуда из полипропилена. Пробы на определение катионов подкислялись HNO<sub>3</sub> до показателя pH менее двух. Для отбора использовалась поверхностная вода с глубиной забора 0.3—0.5 метров. Для транспортировки использовался переносной холодильный агрегат, позволяющий поддерживать температуру в режиме +4 °C.

Оценка качества карьерных вод выполнялась с использованием Приказа Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 13.06.2024) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (табл. 3). Согласно имеющимся исследованиям А. И. Малова (Malov, 2025) водотоки района по условиям формирования состава воды подразделяются на гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевого типа (Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>) с минимальной минерализацией (М ~0.1 г/л) — моренные озера (Сенное и Карасиное) и водотоки, имеющие сульфатно-кальциевый состав



**Таблица 2.** Методы измерения макро- и микроэлементов  
**Table 2.** Methods for measuring macro- and micronutrients

НД на метод измерений	Определяемый показатель / Determined indicator
ПНД Ф 14.1:2:3:4.114-2023	сухой остаток / dry residue
ПНД Ф 14.1:2:4.157-99	сульфат-ион, хлорид-ион / sulfate ion, chloride ion
ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000	кальций, магний, натрий, стронций, калий calcium, magnesium, sodium, strontium, potassium
ГОСТ 31957-2012, метод А.1	гидрокарбонат-ион / hydrocarbonate ion
ПНД Ф 14.1:2:4.254-2009	взвешенные вещества / suspended solids
ПНД Ф 14.1:2:4.181-02	алюминий / aluminum
ПНД Ф 14.1:2:4.214-06	железо общее, медь, марганец, цинк, кобальт, кадмий, никель, свинец, хром total iron, copper, manganese, zinc, cobalt, cadmium, nickel, lead, chromium
ПНД Ф 14.1.272-2012	нефтепродукты / oil products
ПНД Ф 14.1:2.49-96	мышьяк / arsenic



Условные обозначения:

четвертичные отложения  
(lg illos)



суглинки



супесь



суглинок валунный

С.43

скважина и ее номер



8.1(2007г.)  
уровень грунтовых вод  
его глубина, год замера

12.0

пермские отложения  
соткинская свита (P1sot)



кора выветривания



гипс



ангидрит



доломит



песок



глина

карст



незаполненный



с глиной и обломками гипса



с обломками гипса



с обломками гипса и песка



С.А2 номер выработки



А2/1-н номер пробы -  
некондиционная проба



интервал опробования



А2/2-2 номер пробы -  
сорт гипса



18.0 глубина выработки, м



контур подсчета запасов  
сырья по категории В



контур подсчета запасов  
сырья по категории С1



контур подсчета запасов  
сырья по категории С2



контур карьера



4.4 точка пересечения разрезов

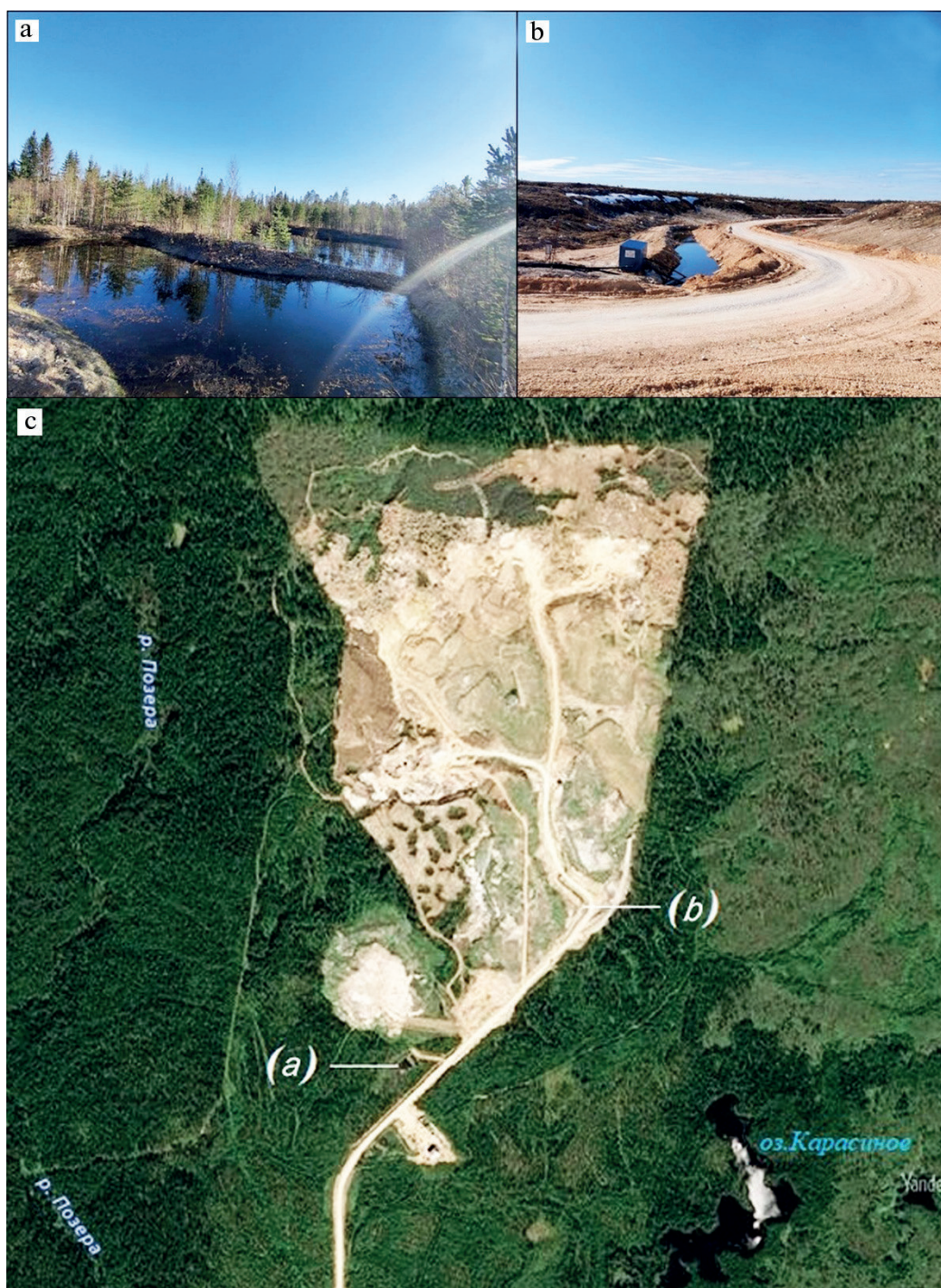
**Рис. 1.** Геолого-гидрологический разрез карьера  
**Fig. 1.** Geological and hydrological section of the quarry



**Таблица 3.** Предельно допустимые концентрации химических компонентов в поверхностных водах, используемых в рыбохозяйственных целях

**Table 3.** Maximum permissible concentrations of chemical components in surface waters used for fishery purposes

Элементы/Elements	Mg	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Sr	Pb	Al	Fe
	мг/дм <sup>3</sup> / mg/dm <sup>3</sup>		мкг/дм <sup>3</sup> / mcg/dm <sup>3</sup>									
Концентрации Concentrations	40	100	10	10	10	1	10	5	400	6	40	100
Класс опасности Hazard class	4	—	4	3	3	3	3	2	3	2	4	4



**Рис. 2.** Точки отбора проб карьерных вод: а — пруд-отстойник очистных сооружений, б — водосборник карьера (зумпф), с — общий вид карьера гипса «Глубокое»

**Fig. 2.** Sampling points of quarry water: а — settling pond of treatment facilities, б — quarry catchment (sump), с — general view of the «Glubokoe» gypsum quarry



(Ca-SO<sub>4</sub>) и промежуточную минерализацию (М 0.8—2.3 г/л) — карстовые озера и реки Позера и Чуга.

Динамика изменения состава карьерных вод за период 2023—2024 годы требовала анализа климатических характеристик (табл. 4).

Большое влияние на состав карьерных вод имеет также площадь атмосферического ореола загрязнения вокруг карьера. Согласно тому № 4 «Охрана окружающей среды» Проекта строительства карьера гипса на месторождении «Глубокое» в Холмогорском

**Таблица 4.** Климатические характеристики 2023, 2024 годов на основании данных по метеостанции № 22550 (г. Архангельск)

**Table 4.** Climate characteristics for 2023, 2024, based on data from weather station No. 22550 (Arkhangelsk)

Характеристики Characteristics	2023 год / year											
	январь January	февраль February	март March	апрель April	май May	июнь June	июль July	август August	сентябрь September	октябрь October	ноябрь November	декабрь December
температура (день), °C temperature (day), °C	–7	–6	–3	5	15	16	20	20	16	3	–5	–11
температура (ночь), °C temperature (night), °C	–8	–9	–9	–4	5	7	13	13	10	1	–6	–11
давление, мм рт.ст. pressure, mm Hg	758	757	751	767	763	760	753	761	760	751	756	757
ветер, м/с wind, m/s	3.1	2.6	2.3	1.9	2.2	2	1.8	1.7	2.1	2.2	2.1	2.1
влажность, % humidity, %	82	83	77	72	65	68	76	79	82	83	88	85
осадки, дни/мм precipitation, days/mm	14/4	7/21	8/39	3/13	6/19	8/60	17/99	10/33	12/82	18/73	13/55	14/50
2024 год / year												
температура (день), °C temperature (day), °C	–11	–8	0	1	9	20	22	20	18	6	0	–6
температура (ночь), °C temperature (night), °C	–12	–10	–4	–3	2	11	13	12	12	3	0	–6
давление, мм рт.ст. pressure, mm Hg	755	757	759	758	762	756	758	758	763	759	752	754
ветер, м/с wind, m/s	2.4	2.5	2.7	2.9	3.1	2.3	2	2.2	2.7	2.8	3.2	2.6
влажность, % humidity, %	83	82	81	77	62	74	73	75	77	93	95	93
осадки, дни/мм precipitation, days/mm	8/28	6/24	10/28	19/109	9/36	10/84	12/107	7/23	7/27	15/77	18/86	17/62

Роза ветров на основании многолетних наблюдений  
Wind rose based on long-term observations

Направление ветра Wind direction	С N	С-В NE	В E	Ю-В SE	Ю S	Ю-З SW	З W	С-З NW
Доля от годового, % Value of annual, %	11.90	5.90	6.80	15.10	18.80	12.50	14.20	14.80





**Таблица 5.** Максимальные приземные концентрации на границе нормативных СЗЗ предприятия  
**Table 5.** Maximum ground-level concentrations at the boundary of the enterprise's regulatory sanitary protection zones

Вещество / Substance	Фон, доли ПДК Background, shares of MAC	Концентрация, доли ПДК <sup>1</sup> Concentration, shares of MAC <sup>1</sup>
Азота диоксид / Nitrogen dioxide	0.25	0.76
Азота оксид / Nitrogen oxide	н.о.	0.06
Серы диоксид / Sulfur dioxide	0.03	0.04
Углерода оксид / Carbon oxide	0.3	0.04
Формальдегид / Formaldehyde	н.о.	0.06
Керосин / Kerosene	н.о.	0.09
Пыль с содержанием Si <sub>2</sub> O 20—70% Dust with Si <sub>2</sub> O content 20—70%	н.о.	0.11
Пыль с содержанием Si <sub>2</sub> O до 20 % Dust with Si <sub>2</sub> O content up to 20 %	н.о.	0.14

*Примечания:* <sup>1</sup> — в таблице не приведены данные по веществам, концентрации которых на границе СЗЗ составляют менее 0.04 ПДК; н.о. — не определено.

*Notes:* <sup>1</sup> — the table does not provide data on substances, which concentrations at the boundary of the sanitary protection zone are less than 0.04 MAC; н.о. — not determined.

районе Архангельской области, максимальные концентрации загрязняющих веществ на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ) предприятия, расположенной в 500 м от границы горного отвода, приведены в таблице 5.

Согласно представленным данным, выбросы предприятия не оказывают влияние на состояние атмосферы территорий за границами СЗЗ. Максимальные концентрации загрязняющих веществ на границе нормативных СЗЗ предприятия определяются выбросами диоксида азота, которые составляют 0.76 ПДК и выбросами пыли неорганической 0.25 ПДК.

### Результаты и обсуждение

Результаты измерения концентраций анализируемых макро- и микроэлементов в течение 2023—2024 годов показывают значительное превышение концентраций большинства элементов в 2023 году. Это обусловлено более высокими показателями производительности горных работ в 2023 году. Общий объем добытого гипсового камня в 2023 году на 7 % больше, чем в 2024; объем взорванной горной массы на 8 % выше в 2023 году. Данный факт подтверждает частичное техногенное воздействие на загрязнение карьерных вод. Естественной же причиной более высоких концентраций элементов в 2023 году является минимальный объем поступления вод в карьер, объем откачки в 2023 году на 19 % ниже, чем в 2024 году (121188 м<sup>3</sup> — 2023, 144442 м<sup>3</sup> — 2024). Исключением выступают взвешенные вещества, которые показывают противоположную динамику, обусловленную следующими причинами: меньший объем откачки вод означает снижение гидродинамической активности в карьере, что уменьшает эрозию пород и взмучивание донных отложений, тем самым снижает концентрацию ВВ; вторая причина — интенсивные осадки. Летние осадки в 2024 году были значительно выше (июнь: 84 мм, июль: 107 мм), чем в 2023 (июнь: 60 мм, июль: 99 мм).

Увеличение осадков усилило поверхностный сток, что привело к большей эрозии почв и выносу взвешенных частиц в карьерные воды.

### Основные компоненты состава карьерных вод

#### Взвешенные вещества

При анализе загрязнения сточных вод карьера взвешенными веществами отмечены зимние максимальные значения в декабре 2024 года как в зумпфе карьера (33.0 мг/дм<sup>3</sup>), так и в очистных сооружениях (24.9 мг/дм<sup>3</sup>). Минимальные же значения выявлены в летний период и колеблются в пределах 10 мг/дм<sup>3</sup> в водосборнике карьера и 5.8—6 мг/дм<sup>3</sup> в очистных сооружениях (рис. 3). Для сточных вод допустимая концентрация взвешенных веществ в соответствии с Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 13.06.2024) составляет 10 мг/дм<sup>3</sup>, при этом средняя концентрация взвешенных веществ на участке реки Северная Двина у с. Усть-Пинега составляет 5.3 мг/дм<sup>3</sup> с максимумом в 23 мг/дм<sup>3</sup> (Отчет о гидрохимических и экологических исследованиях, включая исследования на содержание микропластика, в устьевых участках рек Северная Двина и Онега и прибрежной территории Двинского залива Белого моря, проведенных в рамках проекта «Климатическая экспедиция», 2021\*). Эффективность очистки в среднем варьируется около 29 %, что является низким показателем. Согласно проекту на разработку карьера, эффективность очистки от взвешенных веществ должна составлять около 90—95 %. Низкий показатель, полученный в рамках исследовательской работы, обусловлен изначально невысокими показателями взвешенных веществ в зумпфе (среднее — 16.3 мг/дм<sup>3</sup>, проектные значения — 100 мг/дм<sup>3</sup>).

\* <https://www.ecosociety.ru/wp-content/uploads/2021/12/Otchet-po-issledovaniyam-rek.pdf>



### Сухой остаток (минерализация)

Проведенные исследования выявили значительные колебания минерализации карьерных вод в течение двухлетнего периода наблюдений (табл. 6). Максимальные значения были зафиксированы в конце марта 2023 года в пруду-отстойнике ( $4600 \text{ мг/дм}^3$ ) и в водосборнике карьера ( $6700 \text{ мг/дм}^3$ ). Такие высокие показатели связаны в основном с минимальным поверхностным стоком (мерзлые грунты, снежный покров) и преимущественным поступлением подземных вод.

### Сульфат-ион ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

Концентрация сульфатов как основного компонента растворяющихся пород также была максимальной в карьерных водах в «особый» период конца марта 2023 года (рис. 3). Она достигала  $3700 \text{ мг/дм}^3$ , что значительно превышает предел растворимости сульфатов в пресной воде. Поэтому в отстойнике произо-

шло быстрое их осаждение с образованием труднорастворимых соединений кальция. В растворенном же состоянии осталось  $1430 \text{ мг/дм}^3$ , что соответствует их равновесному содержанию. Эта концентрация является также средней концентрацией сульфатов в карьерных водах за весь период наблюдений. При этом нижний диапазон колебаний достигал  $75 \text{ мг/дм}^3$  также в «особый» период апреля 2024 года, когда за месяц выпало 103 мм атмосферных осадков и произошло интенсивное разбавление карьерных вод. По содержанию сульфатов карьерные воды превышают ПДК ( $100 \text{ мг/дм}^3$ ), однако это связано с природными условиями района месторождения, к которым адаптирована биота, а население минерализованную до  $1.5\text{—}3 \text{ г/дм}^3$  речную воду не использует для питья. Согласно ранее проведенным исследованиям по влиянию разработки месторождения гипса на состав природных вод, фоновая концентрация сульфат-иона в ближайших реках и озерах колеблется в пределах от 30 до  $1430 \text{ мг/дм}^3$  (Наход, 2024).

**Таблица 6.** Результаты измерения макро- и микроэлементов карьерных вод в 2023—2024 гг. ( $\text{мг/дм}^3$ )

**Table 6.** Results for measuring macro- and micronutrients of quarry waters in 2023—2024 ( $\text{mg/dm}^3$ )

Показатель Index	Точка отбора Sampling point	05.12. 2022	27.03. 2023	14.07. 2023	10.08. 2023	01.09. 2023	03.04. 2024	24.06. 2024	23.10. 2024	12.12. 2024
взвешенные вещества suspended solids	№1	7.8	7.2	6.0	-	17.6	9.8	5.8	7.6	24.9
	№2	10.2	9.8	10.0	-	16.4	10.4	10.0	32.0	33.0
сухой остаток dry residue	№1	2820	4600	3260	-	3140	3200	1190	1980	2170
	№2	3280	6700	2980	-	3100	3200	1490	2570	2120
сульфат-ион sulfate ion	№1	1500	1430	1420	1540	1510	75	640	1160	1180
	№2	1520	3700	1400	1430	1540	85	730	1460	1120
кальций calcium	№1	770	790	630	730	680	670	< 50	530	700
	№2	680	630	520	670	710	890	< 50	650	670
магний magnesium	№1	53.0	46.0	37.0	39.4	38.0	48.0	27.3	31.0	48.0
	№2	51.0	45.0	29.8	25.2	36.0	48.0	9.9	32.0	29.6
стронций strontium	№1	8.0	7.6	2.7	6.4	н.о.	0.9	1.1	3.3	4.7
	№2	7.4	7.1	3.2	5.0	н.о.	1.6	1.6	6.0	5.2
алюминий aluminum	№1	0.670	0.052	н.о.	н.о.	0.106	0.011	н.о.	0.051	0.028
	№2	0.680	0.056	0.095	н.о.	0.012	н.о.	н.о.	0.077	н.о.
железо общее total iron	№1	0.127	0.016	0.410	0.026	0.090	0.072	0.043	0.014	0.021
	№2	0.094	0.030	0.065	0.063	0.044	0.039	0.330	0.017	0.022
медь copper	№1	0.071	0.007	0.013	0.003	0.007	0.006	0.002	0.001	0.002
	№2	0.031	0.009	0.006	0.001	0.006	0.006	0.008	0.003	0.003
цинк zinc	№1	0.049	0.027	0.060	0.003	0.002	0.002	0.003	0.001	0.001
	№2	0.021	0.013	0.023	0.002	0.019	0.018	0.003	н.о.	0.001
свинец lead	№1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.008	н.о.	н.о.
	№2	н.о.	0.003	0.013	н.о.	н.о.	н.о.	0.010	н.о.	н.о.
кобальт cobalt	№1	0.006	0.005	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
	№2	0.000	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
кадмий cadmium	№1	н.о.	0.002	0.001	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
	№2	н.о.	0.002	0.001	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
никель nickel	№1	н.о.	н.о.	н.о.	0.032	н.о.	н.о.	0.008	н.о.	н.о.
	№2	н.о.	н.о.	н.о.	0.017	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
гидрокарбонат-ион hydrocarbonate ion	№1	250	260	260	-	214	270	110	214	224
	№2	260	260	187	-	217	270	61	260	218

Примечания: № 1 — пруд-отстойник, № 2 — водосборник карьера; н.о. — ниже предела обнаружения.

Notes: No. 1 — settling pond, No. 2 — quarry water collection pond; н.о. — below detection limit.

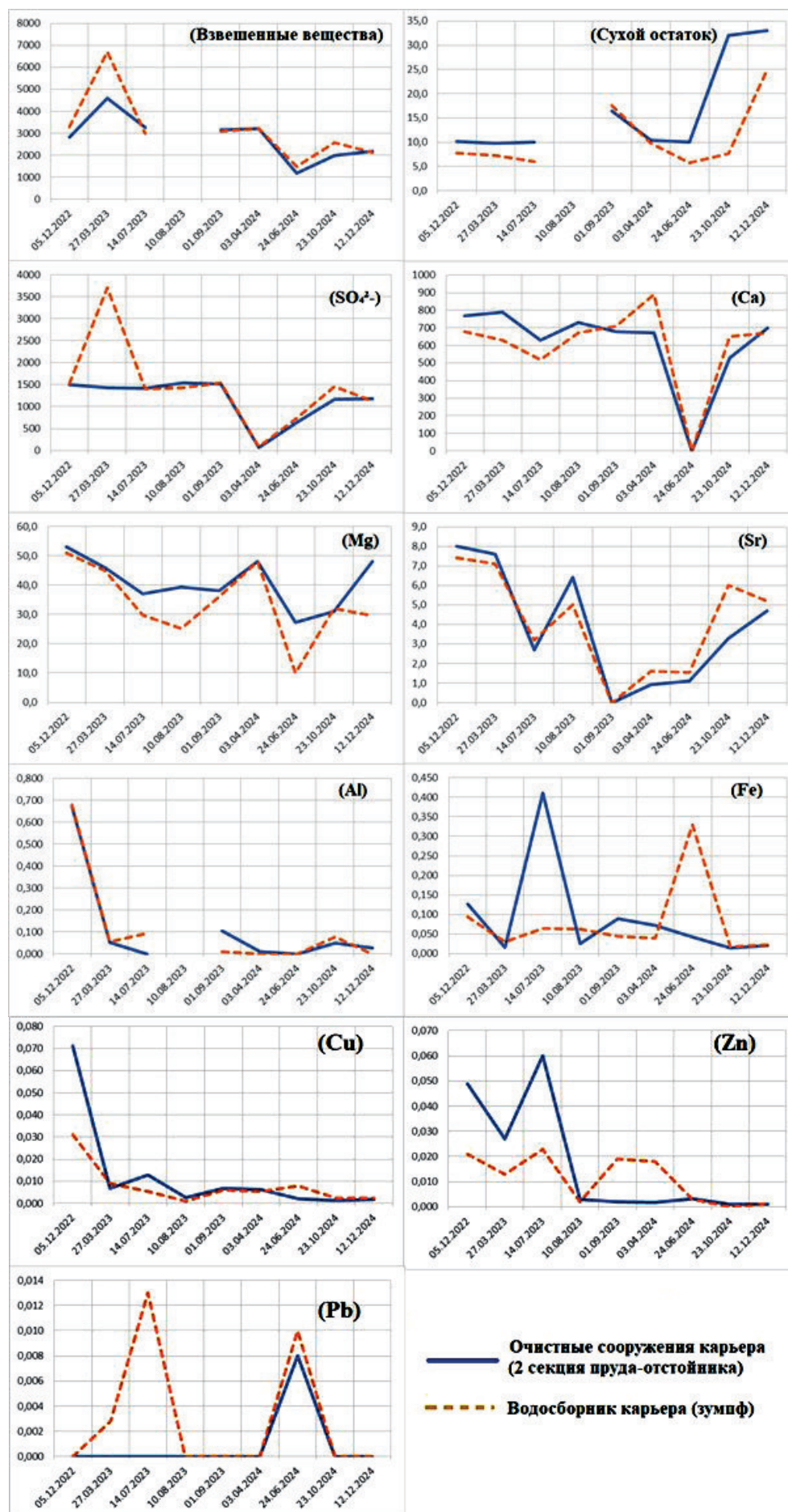


Рис. 3. Показатели изменения динамики основных элементов загрязнения сточных вод  
Fig. 3. Indicators of changes in dynamics of main elements of sewage water pollution





### Кальций ( $\text{Ca}^{2+}$ ) и магний ( $\text{Mg}^{2+}$ )

Динамика содержания кальция в карьерных водах демонстрирует ярко выраженную сезонную зависимость (рис. 3). В весенний период (март) наблюдались максимальные концентрации, достигающие 790–890 мг/дм<sup>3</sup>, что коррелирует с показателями концентрации сухого остатка. Общим фактором, повышающим концентрацию, являются подземные воды при минимальном поверхностном стоке. В летний период (июнь–август) концентрации снижались до 50 мг/дм<sup>3</sup> вследствие осаждения карбонатов при повышении температуры. В целом содержания кальция в водосборнике варьировались от 50 до 890 мг/дм<sup>3</sup> (среднее — 608 мг/дм<sup>3</sup>), в пруде-отстойнике — 50–790 мг/дм<sup>3</sup> (среднее — 617 мг/дм<sup>3</sup>).

Содержание магния изменялось в пределах 9.9–53 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 3). Источниками поступления его в сточные воды являлись процессы выщелачивания приповерхностных карбонатов, химического выветривания глинистых минералов в отвалах вскрышных пород, а также поступление с подземными водами из нижележащих горизонтов. Можно выделить зимний максимум с концентрацией магния 29.6–53 мг/дм<sup>3</sup>; летний минимум 9.9–25 мг/дм<sup>3</sup> — за счет разбавления атмосферными осадками; осенний рост до 25–40 мг/дм<sup>3</sup>. Пространственное распределение фиксируется следующим образом: водосборник: 9.9–51 мг/дм<sup>3</sup> (среднее — 34.1), пруд-отстойник: 27.3–53 мг/дм<sup>3</sup> (среднее — 40.9). Также нужно отметить, что в 11 % проб выявлено незначительное превышение ПДК (40 мг/дм<sup>3</sup>). При этом максимальное значение, равное 53 мг/дм<sup>3</sup>, отмечалось в декабре 2022 года.

Сравнительный анализ  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  показал, что более стабильное поведение присуще магнию, данный элемент имеет меньшую амплитуду сезонных колебаний. Соотношение между элементами Ca/Mg изменялось от 5:1 до 35:1, при этом минимальные значения характерны для зимнего периода, максимальные наблюдались летом.

### Микрокомпоненты

#### Стронций (Sr)

Стронций (рис. 3) в карьерных водах месторождения представлен преимущественно в виде свободных ионов  $\text{Sr}^{2+}$  (85–92 % от общего содержания), что характерно для сульфатных вод гипсовых месторождений. Можно выделить два основных источника поступления. Это природный источник, а именно изоморфное замещение кальция в кристаллической решетке гипса ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SrSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), и выщелачивание включений целестина ( $\text{SrSO}_4$ ). Также возможно растворение включений стронцианита. Ко второму источнику относится влияние техногенных факторов: вымывание остатков использованных взрывчатых веществ (нитрат стронция) и химическое выветривание отвальных пород.

Наши исследования выявили четкую пространственную дифференциацию распределения содержания стронция. Так, для водосборника карьера получены следующие данные: среднегодовая концентрация — 4.1 мг/дм<sup>3</sup>, при этом максимальное значение (7.4 мг/дм<sup>3</sup>) отмечается в декабре 2022, а минимальное значение (1.6 мг/дм<sup>3</sup>) — в апреле и июне 2024 го-

да. Пруд-отстойнику соответствуют следующие показатели: среднегодовая концентрация в размере 3.9 мг/дм<sup>3</sup>; максимальное значение (8 мг/дм<sup>3</sup>) отмечается в декабре 2022, а минимальное значение (1.1 мг/дм<sup>3</sup>) — в июне 2024 года. Сезонная динамика стронция в целом коррелирует с динамикой сульфатов. Минимальные значения (1.1–1.6 мг/дм<sup>3</sup>) в летний период связаны с разбавлением карьерных вод атмосферными осадками, активностью водной растительности и усилением сорбционных процессов.

По содержанию стронция карьерные воды превышают ПДК (0.4 мг/дм<sup>3</sup>), однако это связано с природными условиями района месторождения. Исследования прошлых лет показали, что фоновые значения концентрации стронция в ближайших водотоках составляют в среднем 2.92 мг/дм<sup>3</sup> с ростом до 6.4 мг/дм<sup>3</sup> (Наход, 2024).

#### Алюминий

Динамика содержания алюминия в карьерных водах показала сложную зависимость от сезонных и технологических факторов (рис. 3). Максимальная концентрация 0.68 мг/дм<sup>3</sup> (17 ПДК для рыбохозяйственных водоемов) была зафиксирована в декабре 2022 года. Она существенно превышает концентрации алюминия в речных водах в естественном состоянии и связана с техногенным воздействием. Кроме того, могли сыграть дополнительную роль и процессы подкисления среды в зимний период наряду с увеличением подвижности  $\text{Al}^{3+}$  при низких температурах. К 2024 году содержание алюминия снизилось до 0.028 мг/дм<sup>3</sup>, что ниже ПДК.

#### Железо (Fe), медь (Cu), цинк (Zn), свинец (Pb)

В карьерных водах железо показывает следующие зависимости: максимальная концентрация 0.41 мг/дм<sup>3</sup> была зафиксирована в июле 2023 года в пруде-отстойнике, зимой наблюдалось снижение концентрации до 0.014 мг/дм<sup>3</sup> вследствие замедления химических и биологических процессов, ослабления фильтрации из болот и осадения в виде гидроксидов (рис. 3). Также надо отметить, что наличие проб с превышением ПДК было зафиксировано трижды: в декабре 2022 г. (0.127 мг/дм<sup>3</sup>), июле 2023 г. (0.41 мг/дм<sup>3</sup>) и июне 2024 г. (0.33 мг/дм<sup>3</sup>) при норме 0.1 мг/дм<sup>3</sup>.

Нужно отметить, что повышенные содержания железа в воде могут привести к его осаждению, а осадки железа могут откладываться на дыхательных жабрах рыб, что приводит к сокращению биоразнообразия. Кроме того, наблюдалась смертность икры ручьевой форели и кижуча, покрытой частицами железа (Bury, 2011). Избыточное содержание железа может вызвать и гистопатологию печени и почек, снизить скорость роста и повысить смертность речных обитателей (Desjardins, 1987).

В то же время высокие концентрации железа до 0.4–0.8 мг/дм<sup>3</sup> характерны для небольших северных рек с болотным питанием. Это объясняется высоким сродством Fe с органическим веществом по сравнению с другими металлами. Благодаря этому железо сохраняется в поверхностных водах не только при низких значениях Eh < 0 и pH < 7, но и в слабощелочной

окислительной обстановке. При этом  $\text{Fe}^{2+}$  окисляется до  $\text{Fe}^{3+}$  и образует устойчивое комплексное соединение с фульвокислотой, способное противостоять гидролизу (Malov, 2023).

Показатели по меди (рис. 3) имели следующие закономерности: максимальное значение в  $0.071 \text{ мг/дм}^3$  отмечалось в пруде-отстойнике, минимальное значение  $0.001 \text{ мг/дм}^3$  — в водосборнике карьера. При оценке сезонных колебаний можно выделить весенний пик ( $0.006$ — $0.009 \text{ мг/дм}^3$ ), обусловленный выносом элемента с талыми водами, после которого следует летний минимум ( $0.002$ — $0.008 \text{ мг/дм}^3$ ), связанный с сорбционными процессами, и постепенный осенний рост ( $0.006$ — $0.007 \text{ мг/дм}^3$ ), связанный с усилением процессов выщелачивания. Аналогичная ситуация характерна и для цинка, и для свинца (рис. 3). Практически все пробы не соответствовали требованиям к содержанию меди в водоемах, используемых для рыбохозяйственных целей (ПДК  $0.001 \text{ мг/дм}^3$ ). Восемь проб не соответствовали требованиям по содержанию цинка (ПДК  $0.01 \text{ мг/дм}^3$ ) и 3 пробы — по содержанию свинца (ПДК  $0.006 \text{ мг/дм}^3$ ). А. И. Малов и другие (Malov, 2023) показали, что доминирующей формой меди в поверхностных водах региона является  $\text{CuCO}_3^0$ , тогда как цинк мигрирует преимущественно в свободной ионной форме  $\text{Zn}^{2+}$ .

В целом природу Sr, Fe и макрокомпонентов можно определить как литогенную, для остальных элементов преобладают антропогенные источники. В процессе горных работ на гипсовом месторождении используются бурение, взрывные работы, процессы дробления гипсового камня, отгрузка и транспортировка продукции. При этом образуется мелкая гипсовая пыль, которая поглощает подвижные формы тяжелых металлов, а затем оседает, образуя ореол загрязнения вокруг карьера.

### Статистический анализ полученных показателей

Для определения зависимостей между элементами были определены основные статистические показатели, построены гистограммы распределения, проведен корреляционный и факторный анализы, выделены взаимосвязи между элементами и факторы, влияющие на распределение элементов. Не учитывались следующие элементы: кадмий, кобальт, никель, свинец, хром, нефтепродукты и мышьяк — по причине недостаточного количества проб для статистического анализа. В большей части элементов ввиду небольшой выборки (количество наблюдений меньше 30) не удалось определить принадлежность к нормальному или логнормальному распределению. Для Mn, Cl, Mg, Ca,  $\text{HCO}_3$  и сухого остатка удалось выделить значения мод. Ни одно из значений средних и медиан не сопоставимо с модами, исходя из чего становится очевидным невозможность оценить распределения как нормальные. Все значения асимметрии и эксцесса противоречат необходимым условиям для нормального распределения. По значениям асимметрии и эксцесса можно предположить для меди и калия логнормальное распределение. Для более точного определения распределения визуально были построены гистограммы. Было определено оптимальное количество клас-

сов по формуле Стержесса (5 бинов) и построены гистограммы для 5 бинов по каждому элементу. Исходя из визуальной проверки можно сказать о том, что оценить закон распределения каждого из элементов невозможно. Никаких закономерностей не выделяется, для этого необходимо большее количество данных.

Следующим этапом анализа стала оценка корреляционной матрицы (табл. 7), в которой был выбран ряд значений, которые являются значимыми. Из них были выбраны пары элементов, у которых коэффициент корреляции выше 0.87 (сильная связь при  $r = 0.6$ ); для них построены диаграммы рассеяния по содержаниям (рис. 4). Для слабых связей коэффициент корреляции составил 0.58, для средних — 0.72 и для сильных — более 0.86. Схема связей представлена на рисунке 5.

Итоговым анализом статистических данных явился факторный анализ, в рамках которого была сформирована таблица факторов (табл. 8). Анализ ее позволил установить, что первый фактор вносит 32 % общей доли дисперсии и является значимым для натрия, стронция, магния, кальция, гидрокарбонатов и сухого остатка — для всех элементов влияние прямое и значение фактора положительное. Этот фактор отражает природные процессы формирования химического состава карьерных вод за счет растворения карбонатных и сульфатных пород. В этот фактор можно включить также сульфаты и цинк, которые показывают максимальные значения 0.59 и 0.56 соответственно при факторе № 1. Источником цинка является органоминеральный и торфяной почвенные горизонты, в которых происходит образование его устойчивых соединений с органическими веществами (Иванищев, 2022). Таким образом, поверхностные стоки являются преобладающим фактором переноса элементов. Объемы откачки карьерных вод по годам представлены в таблице 9.

Второй фактор является значимым для алюминия, марганца и меди. В него также можно включить цинк и железо. Этот фактор, по всей видимости, отражает смешанное влияние природных и антропогенных источников.

От третьего фактора и далее значимых нагрузок нет. Суммарная доля дисперсии около 70 % приходится на 3 фактора, исходя из чего они были выбраны единственно значимыми и были далее проанализированы с построением диаграмм рассеяния (рис. 6). При анализе диаграммы рассеяния химических элементов по факторам 1 и 2 видно, что ни один из них почти не влияет на калий. Также можно заметить, что для фактора 1 имеется слабое отрицательное значение для взвешенных веществ и общего железа. На остальные элементы влияние положительно. Диаграмма рассеяния химических элементов по факторам 1 и 3 показывает, что для фактора 3 почти нет влияния меди и марганца. На графике визуализировано наибольшее влияние для фактора 3 по хлору и общему железу, а наименьшее — для взвешенных веществ.

### Выводы

Целью исследования являлся анализ изменения состава карьерных вод на гипсовом месторождении за период с декабря 2022 по декабрь 2024 года. Исследование выявило значительные сезонные колебания: весенние максимумы минерализации и сульф-





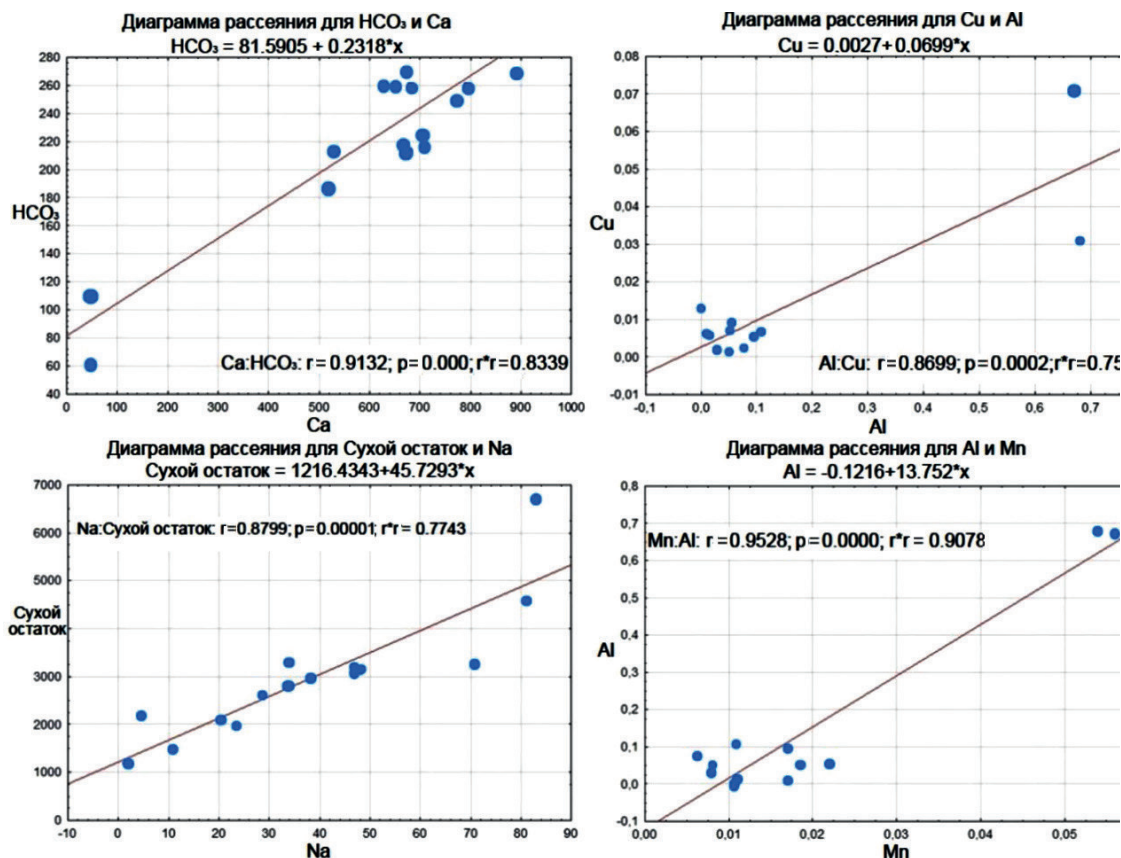


Рис. 4. Диаграммы рассеивания по содержанию для элементов с сильными корреляционными связями  
 Fig. 4. Scatter diagrams by content for elements with strong correlation links

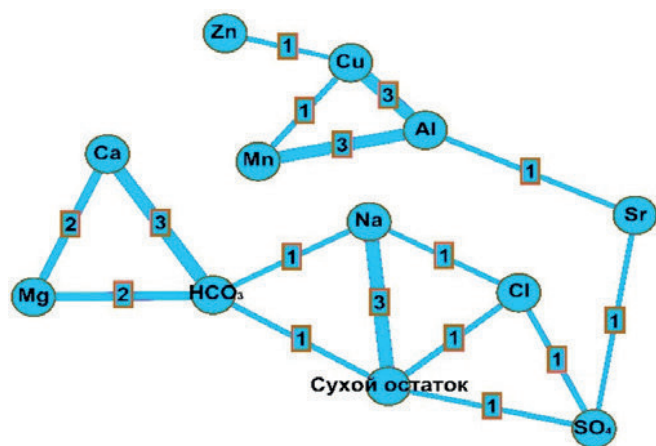


Рис. 5. Схема связи между элементами: 1 — слабая, 2 — средняя, 3 — сильная  
 Fig. 5. Schematic of the links between the elements: 1 — weak, 2 — medium, 3 — strong

фатов (до 6700 и 3700 мг/дм<sup>3</sup> соответственно) действительно обусловлены преобладанием подземного питания при минимальном поверхностном стоке, а летнее снижение (например, кальция до < 50 мг/дм<sup>3</sup> в июне 2024 г.) — разбавлением атмосферными осадками. Это подтверждается климатическими данными: экстремальные осадки в апреле 2024 г. (109 мм против 13 мм в 2023 г.) объясняют anomalously низкие значения сульфатов (85 мг/дм<sup>3</sup>) в этот период. Преимущественное поступление вод в водосборник карьера осуществлялось благодаря подземному питанию. В карьерных водах обнаружено периодическое превышение предельно допустимых концентраций стронция,

магния, железа, цинка, меди, кадмия и алюминия. Это требует усиленного контроля и возможной корректировки технологических процессов добычи гипсового камня. Очистные сооружения продемонстрировали низкую эффективность, снижая концентрацию взвешенных веществ на 29 %, но основной причиной этого являются невысокие показатели взвешенных веществ в карьерных водах.

Корреляционный и факторный анализы позволили установить, что первый фактор вносит 32 % общей доли дисперсии и является значимым для натрия, стронция, магния, кальция, гидрокарбонатов и сухого остатка, цинка и железа. Этот фактор отражает природные процессы формирования химического состава карьерных вод за счет растворения карбонатных и сульфатных пород. Второй фактор (21 % общей доли дисперсии) является значимым для алюминия, марганца и меди. Этот фактор, по всей видимости, отражает смешанное влияние природных и антропогенных источников. Корреляционный анализ (например, сильная связь  $\text{Ca}-\text{HCO}_3^-$ ,  $r = 0.91$ ) указывает на литогенное происхождение макрокомпонентов (кальций, магний, гидрокарбонаты), тогда как техногенное влияние более выражено для алюминия (пик 0.68 мг/дм<sup>3</sup> в 2022 г.) и тяжелых металлов (медь, цинк), связанных с гипсовой пылью от взрывных работ. Антропогенный вклад на гипсовом месторождении может возникать за счет мелкой гипсовой пыли, которая поглощает подвижные формы тяжелых металлов, а затем оседает, образуя ореол загрязнения вокруг карьера.

Таким образом, хотя сезонные закономерности и природная обусловленность сульфатов/стронция доказаны убедительно, межгодовые различия требуют



Таблица 8. Факторный анализ химического состава карьерных вод

Table 8. Factor analysis of quarry water chemical composition

	Фактор 1 Factor 1	Фактор 2 Factor 2	Фактор 3 Factor 3	Фактор 4 Factor 4	Фактор 5 Factor 5	Фактор 6 Factor 6
Na	0.71	-0.41	0.43	-0.14	0.14	-0.12
K	0.02	-0.12	-0.64	-0.09	-0.37	0.64
Al	0.33	0.85	-0.20	0.21	0.04	-0.18
Mn	0.30	0.81	0.00	0.25	0.27	0.16
Cu	0.51	0.79	-0.02	0.00	-0.16	-0.05
SO <sub>4</sub>	0.59	-0.24	0.24	0.63	-0.23	0.17
Zn	0.56	0.39	0.40	-0.36	-0.37	-0.04
Cl	0.40	-0.46	0.63	0.17	-0.06	0.08
Sr	0.75	0.05	-0.22	0.50	-0.20	-0.15
сухой остаток dry residue	0.79	-0.36	0.24	0.12	0.13	0.18
Mg	0.79	0.10	-0.37	-0.31	0.17	0.24
Ca	0.75	-0.25	-0.41	-0.33	0.00	-0.22
взвеш. вещ-ва suspended solids	-0.15	-0.38	-0.62	0.22	-0.44	-0.36
Fe	-0.16	0.32	0.62	-0.34	-0.53	0.02
HCO <sub>3</sub>	0.80	-0.22	-0.30	-0.35	0.04	-0.13
общ. дис. total dispersion	4.82	3.10	2.53	1.45	1.01	0.83
доля общ. total share	0.32	0.21	0.17	0.10	0.07	0.06

Таблица 9. Динамика откачки карьерных вод

Table 9. Dynamics of quarry water pumping

Год / Year	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Объем откачки Pumping volume	76136	116592	77934	236332	247119	259497	334234	188122	221203	121188	144442

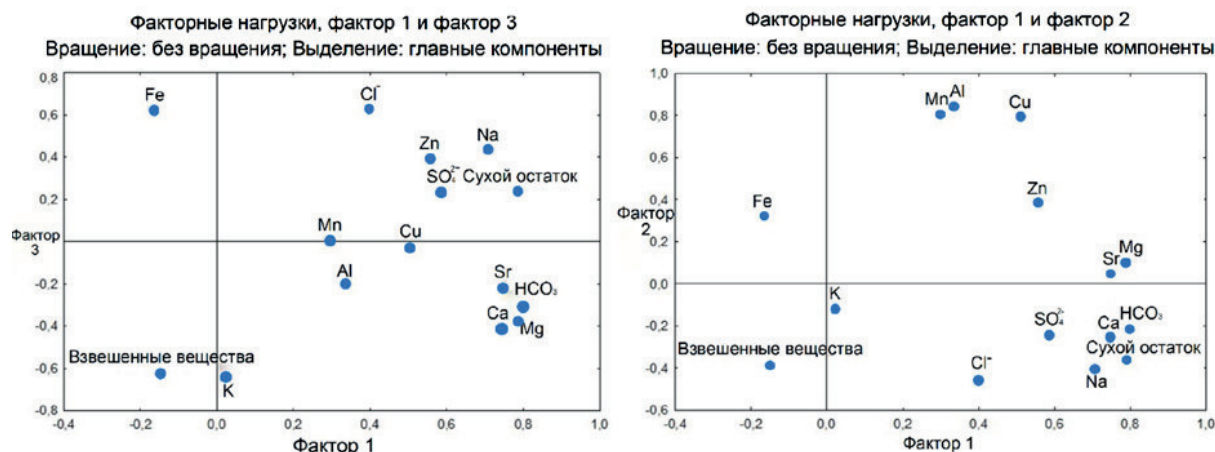


Рис. 6. Диаграммы рассеивания элементов

Fig. 6. Scatter diagrams of the elements

более глубокого наблюдения с учётом гидроклиматических условий. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации системы экологического мониторинга, совершенствования технологий очистки карьерных вод, учитывающих специфику северных месторождений.

### Литература / References

ГН 2.1.5.1315-03. Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. М.: Минздрав России, 2003. 56 с.



- GN 2.1.5.1315-03. Hygienic standards. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in water of drinking and cultural-domestic water use objects. Ministry of Health of Russia. Moscow, 2003, 56 p. (in Russian)
- Зыкова Е. Н. Особенности накопления тяжелых металлов в почвах Северодвинского промышленного района // Известия РАН. Серия географическая. 2008. № 6. С. 63—69.
- Zykova E. N. Features of heavy metal accumulation in soils of the Severodvinsk industrial region. Proceedings RAS. Geographical series, 2008, No. 6, pp. 63—69. (in Russian)
- Иванищев В. В. Цинк в природе и его значение для растений // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2022. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsink-v-prirode-i-ego-znachenie-dlya-rasteniy> (дата обращения: 09.07.2025).
- Ivanishchev V. V. Zinc in nature and its importance for plants. Proceedings of Tula State University. Earth Sciences, 2022, No. 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsink-v-prirode-i-ego-znachenie-dlya-rasteniy> (date of access: 07/09/2025). (in Russian)
- Наход В. А., Малов А. И., Друзинин С. В. Исследование влияния разработки месторождения гипса на состав природных вод // Успехи современного естествознания. 2024. № 4. С. 56—63; URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=38249> (дата обращения: 14.06.2025). <https://doi.org/10.17513/use.38249>
- Nakhod V. A., Malov A. I., Druzhinin S. V. Study of the influence of gypsum deposit development on the composition of natural waters. Successes of modern natural science, 2024, No. 4, pp. 56—63; URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=38249> (date of access: 14.06.2025). (in Russian)
- Об утверждении нормативов качества воды для объектов водного рыболовства, в том числе норм предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в водах объектов водного рыболовства: Приказ Федерального агентства по рыболовству № 20 от 18 января 2010 г. М., 2010.
- Order of the Federal Agency for Fisheries No. 20. On approval of water quality standards for fishery water bodies, including standards for maximum permissible concentrations (MPC) of harmful substances in waters of fishery water bodies. Moscow, 2010. (in Russian)
- Попова Л. Ф., Васюк К. С., Васильева А. И., Репницына О. Н., Бечина И. Н., Усачева Т. В. Эколого-аналитическая оценка загрязнения почв тяжелыми металлами в городах Архангельской промышленной агломерации // Фундаментальные исследования. 2012. № 11-3. С. 731—734.
- Popova L. F., Vasyuk K. S., Vasilyeva A. I., Repnitsyna O. N., Bechina I. N., Usacheva T. V. Ecological-analytical assessment of soil pollution by heavy metals in cities of Arkhangelsk industrial agglomeration. Fundamental Research, 2012, No. 11(3), pp. 731—734. (in Russian)
- Сидкина Е. С., Торопов А. С., Конышев А. А. Геохимические особенности природных вод карьеров строительного камня Питкярантского района (Карелия) // Известия ТПУ. 2023. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geohimicheskie-osobennosti-prirodnih-vod-karierov-stroitel'nogo-kamnya-pitkyarantskogo-rayona-kareliya> (дата обращения: 27.05.2025).
- Sidkina E. S., Toropov A. S., Konyshev A. A. Geochemical features of natural waters in building stone quarries of the Pitkyaranta District (Karelia). Bulletin of Tomsk Polytechnic University, 2023, No. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geohimicheskie-osobennosti-prirodnih-vod-karierov-stroitel'nogo-kamnya-pitkyarantskogo-rayona-kareliya> (accessed: 27.05.2025). (in Russian)
- Торосян В. Ф., Торосян Е. С. Критерии экологической оценки состояния водных объектов горнопромышленных районов // ГИАБ. 2012. № 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kriterii-ekologicheskoy-otsenki-sostoyaniya-vodnyh-obektov-gornopromyshlennyh-rayonov> (дата обращения: 27.05.2025).
- Torosyan V. F., Torosyan E. S. Criteria for Environmental Assessment of Water Bodies in Mining Regions. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2012, No. 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kriterii-ekologicheskoy-otsenki-sostoyaniya-vodnyh-obektov-gornopromyshlennyh-rayonov> (accessed: 27.05.2025). (in Russian)
- Al-Harathi A. Environmental impacts of the gypsum mining operation at Maqna area, Tabuk, Saudi Arabia Environmental Geology 2001, Vol. 41, P. 209—218. <https://doi.org/10.1007/s002540100384>
- Bury N., Boyle D., Cooper C. A. Iron // Fish Physiology: Homeostasis and Toxicology of Essential Metals. Vol. 31, Part A. Academic Press, 2011. P. 201—251.
- Caselle C., Baud P., Kushnir A. R. L., Reuschlé T., Bonetto S. M. R. Influence of water on deformation and failure of gypsum rock // Journal of Structural Geology. 2022. Vol. 163. P. 104722. DOI: 10.1016/j.jsg.2022.104722
- Caselle C., Bonetto S., Comina C., Stocco S. GPR surveys for the prevention of karst risk in underground gypsum quarries // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 95. P. 103137. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103137
- Desjardins L. M., Hicks B. D., Hilton J. W. Iron catalyzed oxidation of trout diets and its effect on the growth and physiological response of rainbow trout // Fish Physiology and Biochemistry. 1987. Vol. 3. P. 173—182.
- Malov A. I., Nakhod V. A., Druzhinin S. V. Impact of gypsum mining on the environment in the northern taiga. Environ. Earth Sci. 2025, 84, 73.
- Malov A. I., Sidkina E. S., Cherkasova E. V. The influence of DOC on the migration forms of elements and their sedimentation from river waters at an exploited diamond deposit (NW Russia) // Water. 2023. Vol. 15. P. 2160.
- Yakovlev E. Yu., Druzhinina A. S., Zykova E. N., Zykov S. B., Ivanchenko N. L. Assessment of heavy metal pollution of the snow cover of the Severodvinsk industrial district (NW Russia) // Pollution. 2022. Vol. 8, No. 4. P. 1274—1293.

Received / Поступила в редакцию 4.06.2025