

## К ПРОБЛЕМЕ ПЫЛЕНИЯ ХВОСТОХРАНИЛИЩ В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА НА ПРИМЕРЕ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ КРАЙНЕГО СЕВЕРА РОССИИ

Д.В. Макаров<sup>1</sup>, А.В. Светлов<sup>1</sup>, А.А. Горячев<sup>1,2</sup>, О.Т. Кони́на<sup>1</sup>, В.А. Маслoбoев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем промышленной экологии Севера, ФИЦ «Кольский научный центр РАН»,  
Апатиты, Россия, e-mail: mdv\_2008@mail.ru

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН»,  
Апатиты, Россия

**Аннотация:** Выполнена оценка связи метеорологических параметров теплого периода и интенсивности пыления хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд за период 2001–2019 гг. Установлено, что наиболее часто превышение наблюдалось при среднесуточной температуре воздуха в интервале 10–15 °С, влажности 60–80% и скорости ветра 2–4 м/с. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что для превышения ПДК достаточно кратковременных порывов ветра в районе хвостохранилища. Наибольшее число случаев приходится на ветры северо-западного направления. Анализ метеорологических параметров теплого периода показал, что в последнее десятилетие наблюдается существенное, более чем на 2 °С, повышение среднемесячной температуры в мае. С этим связан более ранний сход снежного покрова и увеличение продолжительности потенциальной возможности пыления хвостов. В летние месяцы и в сентябре, за исключением июня, зафиксировано незначительное повышение среднемесячной температуры. Средние скорости ветра и влажность за это период существенно не изменились. Сопоставление изменения влажности проб хвостов, отобранных на одной и той же площади, показало, что уже через 10–15 дней после схода снежного покрова при отсутствии атмосферных осадков даже в случае среднесуточной температуры ниже 5–8 °С возникает опасность пыления. Показана целесообразность проведения мониторинга с отбором разовых проб воздуха, определений направления и скорости ветра, температуры и влажности воздуха непосредственно на хвостохранилище при наступлении неблагоприятных метеорологических условий.

**Ключевые слова:** хвосты обогащения апатит-нефелиновых руд, пыление, метеорологические параметры, среднесуточная температура воздуха, сход снежного покрова, влажность, плотность, мониторинг.

**Благодарность:** Исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований РАН, тема № 0226-2019-0047 и поддержана средствами гранта РФФИ № 18-05-60142 Арктика.

**Для цитирования:** Макаров Д.В., Светлов А.В., Горячев А.А., Кони́на О.Т., Маслoбoев В.А. К проблеме пыления хвостохранилищ в связи с изменением климата на примере горного предприятия Крайнего Севера России // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 122–133. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_5\_0\_122.

---

## Tailings dust emissions caused by the climate change: A case-study of a mine in Russia's far north

D.V. Makarov<sup>1</sup>, A.V. Svetlov<sup>1</sup>, A.A. Goryachev<sup>1,2</sup>, O.T. Konina<sup>1</sup>, V.A. Masloboev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Scientific Center,  
Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, e-mail: mdv\_2008@mail.ru

<sup>2</sup> Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

---

**Abstract:** The studies into relation between the warm season weather data and the intensity of dust emissions at apatite–nepheline ore milling tailings over a period of 2001–2019 show that the highest excess of dust emission standards is observed at the mean daily temperature of 10–15 °C, humidity of 60–80 % and the wind speed of 2–4 m/s. The latter figures mean that even short wind blasts in the area of tailings storage facilities are sufficient for the MAC value to be overrun. The most of excesses take place in case of north-westerly winds. The warm season weather data analysis shows that a considerable excess, more than by 2 °C, over the monthly mean temperature occurs in May. This is the cause of earlier loss of snow cover and longer duration of potential dusting of tailings ponds. In the summer months, except for June, and in September, a minor raise of monthly average temperature is recorded. The average wind speeds and humidity show no essential variation over this period. From the compared changes in humidity of tailings sampled within the same area, it follows that in 10–15 days after loss of snow cover, given no atmospheric fallout, the hazard of dusting appears even at the daily mean temperature under 5–8 °C. Under unfavorable weather conditions, it is advisable to carry out monitoring and snap sampling of air, direction and speed of winds, as well as temperature and humidity of air directly at a tailings pond.

**Key words:** apatite–nepheline ore milling tailings, dust emissions, weather data, daily mean temperature of air, loss of snow cover, humidity, density, monitoring.

**Acknowledgements:** The study was carried out within the framework of the Basic Research Program of the Russian Academy of Sciences, Research Issue No. 0226-2019-0047, and was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 18-05-60142 Arctic.

**For citation:** Makarov D. V., Svetlov A. V., Goryachev A. A., Konina O. T., Masloboev V. A. Tailings dust emissions caused by the climate change: A case-study of a mine in Russia's far north. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5):122-133. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_5\_0\_122.

---

### Введение

Пыление хвостовых отвалов отходов обогащения руд оказывает негативное влияние на воздушный и водный бассейны, почвы, экосистемы прилегающих территорий и здоровье населения прилегающих территорий [1–7].

Одно из двух эксплуатируемых хвостохранилищ Кировского филиала (КФ) АО «Апатит» предназначено для складирования отвальных хвостов апатит-не-

фелиновой обогатительной фабрики № 2 (АНОФ-2). Хвостохранилище АНОФ-2 расположено в губе Белой озера Имандра на расстоянии около 3 км от границы селитебной зоны. Хвостохранилище является крупнейшим на территории Мурманской области, занимая около 1650 га. Высыхание поверхности хвостов обеспечивает быструю потерю влаги верхними слоями и под воздействием ветра возникает пыление, при-

водящее к ухудшению санитарно-гигиенической обстановки в г. Апатиты.

Первое исследование оценки потоков рассеивания элементов при хранении хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд за счет аэротехногенного переноса и гипергенных процессов было выполнено в 1998 г. [8]. Позднее методами численного моделирования выполнены оценки загрязнения атмосферы г. Апатиты пылящими хвостами АНОФ-2 [9, 10].

Как известно, пыление поверхности хвостохранилища зависит от гранулометрического и вещественного состава хвостов обогащения.

Выполненные ранее исследования показали, что хвосты поверхностного слоя характеризуются преобладанием фракций с размером зерен  $-0,5+0,25$  мм и  $-0,25+0,1$  мм, на которые суммарно приходится 70–80% массы хвостов [11]. Хвосты могут быть отнесены к мелко- и среднезернистым пескам. Исходя из величин коэффициента пористости (0,76–1,31), исследованные пробы хвостов по плотности сложения относятся к рыхлым несвязным грунтам. Таким образом, по инженерно-геологическим характеристикам хвосты склонны к пылению.

Преобладающим минералом хвостов является нефелин, содержание которого превышает 50%, также они содержат эгирин, полевые шпаты, вторичные минералы по нефелину, апатит, титанит, магнетит, слюды [11]. Отсутствие в составе хвостов слоистых гидросиликатов, образующих водно-коллоидные связи и способствующих переходу хвостов при высыхании из пластичного в камнеподобное состояние, обуславливает высокую вероятность пыления при неблагоприятных метеорологических условиях.

Закрепление хвостов АНОФ-2 КФ АО «Апатит» ранее осуществляли анионной битумной эмульсией. Для пыле-

подавления использовали рабочий раствор — товарная битумная эмульсия с разбавлением горячей водой. Закрепление пылящих поверхностей с применением битумных эмульсий являлось наиболее простым технологическим решением. Битумная эмульсия имеет достаточно широкий температурный интервал использования, не теряет свои потребительские свойства при замораживании, что особенно важно в условиях Крайнего Севера. Существенным преимуществом битумной эмульсии является долговечность, составляющая 4–6 месяцев. Это позволяет использовать ее для закрепления не только намывных пляжей, но и поверхностей откосов и оснований дамб. Однако для битума характерна низкая растворимость в холодной воде и, как следствие, недостаточная технологичность процесса обработки хвостов.

В период интенсивного снеготаяния, освобождения пляжей и откосов хвостохранилища от снежного покрова и их последующего высыхания начинались процессы пыления. При этом сотрудники КФ АО «Апатит» не всегда успевали оперативно обрабатывать поверхность хвостохранилища из-за недостаточной производительности процесса, связанной с отмеченными свойствами битума и особенностями приготовления эмульсии.

В этой связи в КФ АО «Апатит» были проведены поиск и испытание новых связующих реагентов. В июле-августе 2015 г. на территории хвостохранилища АНОФ-2 были проведены пробные испытания реагентов Alcotac, Dustbind и DS1Floset S44. Выполнены мониторинг в натуральных условиях и лабораторные исследования свойств покрытий образованных связующими реагентами [11]. По итогам исследований связующий реагент Dustbind был признан наиболее предпочтительным.

Реагент Dustbind в настоящее время успешно применяется КФ АО «Апатит» для пылеподавления хвостохранилища АНОФ-2 вместо анионной битумной эмульсии, обеспечивая не только существенное сокращение трудозатрат, но и сокращение времени обработки.

**Некоторые климатические характеристики района размещения хвостохранилища АНОФ-2 и тенденции изменения метеорологических параметров**

Климат Мурманской области можно охарактеризовать как субарктический морской, имеющий многие черты континентального [12]. Его особенности определяются географическим положением за Полярным кругом между Европейским материком с юга и Арктическим бассейном с севера, а также близостью теплого сектора Атлантики. Климат региона характеризуется продолжительной (до 7 месяцев), но сравнительно мягкой зимой. Температурный режим в течение года неустойчив, что вызывает частые оттепели в зимнее время, а летом резкие похолодания. Среднегодовая температура воздуха уменьшается от 0 °С на побережье Баренцева и Белого морей, до -2 °С в центральной части полуострова и до -3—4 °С в горных районах. Сумма температур воздуха выше 10 °С на юге области составляет 1127 °С, на севере — 870 °С [12].

Как известно, потепление проявляется в той или иной степени на всей территории России и в особенности в ее АЗ. По данным В.И. Демина, современное потепление в Мурманской области началось примерно со второй половины 1980-х гг. [13]. Оно проявляется в изменениях как среднегодовой температуры, так и среднесезонных температур. При этом если современные летние температуры практически не превосходят температуры предыдущего потепления

(1920—1930-х гг.), то среднегодовые являются наиболее высокими за весь период наблюдений. Ожидается, что для Мурманской области к середине XXI в. увеличение количества осадков в холодное время года может составить 15—20% по сравнению с 1980—1999 гг., а в летнее время — 5—10% [14].

Климатические параметры региона складирования отходов обогащения вносят основной вклад в масштабы ветрового переноса загрязняющих веществ [8, 15]. Так, по данным С.Б. Бортниковой с сотрудниками, которые изучали процессы и формы выноса тяжелых металлов с хвостохранилища Салагаевский лог, (г. Салаир, Кемеровская область), эоловый снос вещества является доминирующим механизмом поступления тяжелых металлов в окружающую среду и превосходит водный для цинка в 2,5, свинца в 114, меди в 4,3, кадмия в 3,4 раза [15]. Вместе с тем, сопоставление данных работы [15] с расчетами пылевых потоков хвостов обогащения АНОФ-2, выполненное авторами [8], показывает, что объемы годового ветрового сноса вещества с хвостохранилищ сопоставимы, в то время как площадь хвостохранилища АНОФ-2 превышает площадь хвостохранилища Салаирского ГОКа на более чем на порядок.

Повышение среднесезонных температур, увеличение продолжительности бесснежного и безморозного периода должно способствовать усилению негативного воздействия на окружающую среду хвостов обогащения. Продолжительность пыления хвостов АНОФ-2 составляет около 90—100 дней в году и потенциально возможно в мае-сентябре.

Рассмотрим вначале основные тенденции изменения метеорологических параметров мая в последние годы. В этом месяце происходит сход снежного покрова, и начинаются процессы пыления хвостов, еще не обработанных связую-

щими реагентами. Нами использованы данные метеостанции г. Апатиты. Разумеется, вследствие расположения хвостохранилища у подножия гор Хибины метеорологические параметры несколько отличаются, но с некоторым допущением их использование обосновано.

Среднемесячные температуры мая за период 2010–2019 гг., за исключением 2017 г., демонстрируют устойчивое превышение температуры относительно средних многолетних значений, равных +4 °С, особенно в 2013, 2016 и 2018 гг.

При этом среднесуточные температуры в 2015, 2016 и 2018 гг. были положительными на протяжении всего месяца, что безусловно также является отклонением от нормы.

В отличие от температуры, значительных изменений среднемесячных значений влажности воздуха в мае за период 2010–2019 гг. не произошло, хотя линейный тренд отражает некоторое снижение показателя. Отметим, что наименьшие значения влажности характерны для наиболее теплых месяцев 2016 и 2018 гг.

Среднемесячные скорости ветра также достаточно стабильны, хотя данный показатель несколько снизился за период 2015–2019 гг., например, относительно десятилетия 1995–2004 гг.

Еще одним важным фактором является изменение высоты снежного покрова в мае. Согласно многолетним наблюдениям окончательный сход снежного покрова наблюдается в третьей декаде мая. Однако за последнее десятилетие лишь в холодном 2017 г. снег сошел «по графику» — 25 мая. В остальные годы снег таял в первую или вторую декады, а в 2016 г. снегового покрова в мае отмечено не было.

Таким образом, в последние десятилетия наблюдаются устойчивые повышения относительно средней многолет-

ней среднемесячной температуры в мае, некоторое снижение влажности воздуха и более ранний сход снежного покрова. Все эти тенденции способствуют созданию условий для более раннего пыления хвостов. Скорости ветра за это период изменялись незначительно.

Сопоставление значений среднемесячных температур летних месяцев и сентября за периоды 1995–2004 и 2010–2019 гг. показывает, что заметных изменений в характере температур воздуха в эти периоды не наблюдалось.

Так, среднемесячные июньские температуры близки к средней многолетней составляющей +10,7 °С. При этом температуры июня в 2010–2019 гг. существенно не отличаются от периода 1995–2004 гг. Июльские температуры в 2010–2019 гг. значительно превышали среднюю многолетнюю, равную +14,0 °С, в 2010, 2011, 2014, 2016 и 2018 гг. Температуры июля также существенно не отличаются от периода 1995–2004 гг. Среднемесячные температуры августа в 2010–2019 гг. преимущественно были выше средней многолетней, составляющей +11,3 °С. Те же тенденции характерны для сентябрьских среднемесячных температур.

### **Оценка связи метеорологических параметров теплого периода (май — сентябрь) и интенсивности пыления хвостов**

Для оценки связи метеорологических параметров теплого периода и интенсивности пыления хвостов были использованы данные, полученные от ФГБУ «Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» для стационарных постов контроля атмосферного воздуха ПНЗ № 2, 3, расположенных в г. Апатиты.

Ряд данных покрывает временной промежуток 2001–2019 гг. и насчитывает 110 среднесуточных отчета по 5 па-

раметрам (среднесуточная концентрация в долях ПДК, температура, влажность, скорость/направление ветра). Ряд использован для первичного статистического анализа метеорологических факторов и интенсивности пыления хвостохранилища АНОФ-2.

В табл. 1 представлены данные о случаях превышения ПДК пыли в атмосферном воздухе в мае-сентябре по годам за период 2001 – 2019 гг. Случаи превышения в одни и те же сутки на обоих постах рассматривали как одно событие.

Как видно, количество случаев превышения разовых ПДК пыли (0,50 мг/м<sup>3</sup>) в воздухе г. Апатиты за период 2001 – 2019 гг. варьирует от 1 до 15 случаев в год.

Максимальное число раз повышенной концентрации пыли зафиксировано в июле – 35 случаев. В мае и июне зафиксировано по 22 случая, в августе 13, в сентябре 1 случай.

Связь между температурными параметрами теплого периода и интенсивностью пыления хвостов прослеживается. Так, наибольшее число случаев превышения ПДК зафиксировано в 2014 г. – 15. Из них 8 случаев приходятся на июль и август, когда температуры были существенно выше климатической нормы. В то же время, 6 случаев превышения ПДК зафиксированы в июне, который был холоднее обычного.

В 2016 г. зафиксировано 7 случаев превышения ПДК, все они пришлись на май-июль. В этот период температура была выше климатической нормы.

В 2018 г. зафиксировано 5 случаев превышения ПДК в мае, когда среднемесячная температура превысила многолетнюю на 4 °С.

В то же время, в 2019 г. отмечено 7 случаев превышения ПДК в июле, хотя среднемесячная температура была почти на 2 °С ниже климатической нормы.

Наиболее часто превышение ПДК наблюдалось при температуре воздуха в интервале 10 – 15 °С, влажности 60 – 80% и скорости ветра 2 – 4 м/с. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что для превышения ПДК достаточно кратковременных порывов ветра в районе хвостохранилища. Закономерно, что наибольшее число случаев приходится на ветры северо-западного направления.

Отметим, что сила ветра, регистрируемая на гребне дамбы хвостохранилища, равняется 28 – 30 м/с («сильный шторм» по принятой классификации – шкале Бофорта), что делает гребни центрами

Таблица 1

**Количество случаев превышения разовых ПДК пыли в воздухе г. Апатиты**  
**Number of events when the atmospheric dust MPC was exceeded in Apatity**

Год	Месяц					Всего за год
	V	VI	VII	VIII	IX	
2001	1	2				3
2002			1	4		5
2003		2	3	2		7
2004		3				3
2005			2			2
2006	2		2	1		5
2007	2		1			3
2008			1			1
2009	2					2
2010	4					4
2011		1	3			4
2012	3	1				4
2013		1				1
2014	1	6	6	2		15
2015			1			1
2016	2	1	4			7
2017		1	4	1		6
2018	5	4		1		10
2019			7	2	1	10
Всего за месяц	22	22	35	13	1	93

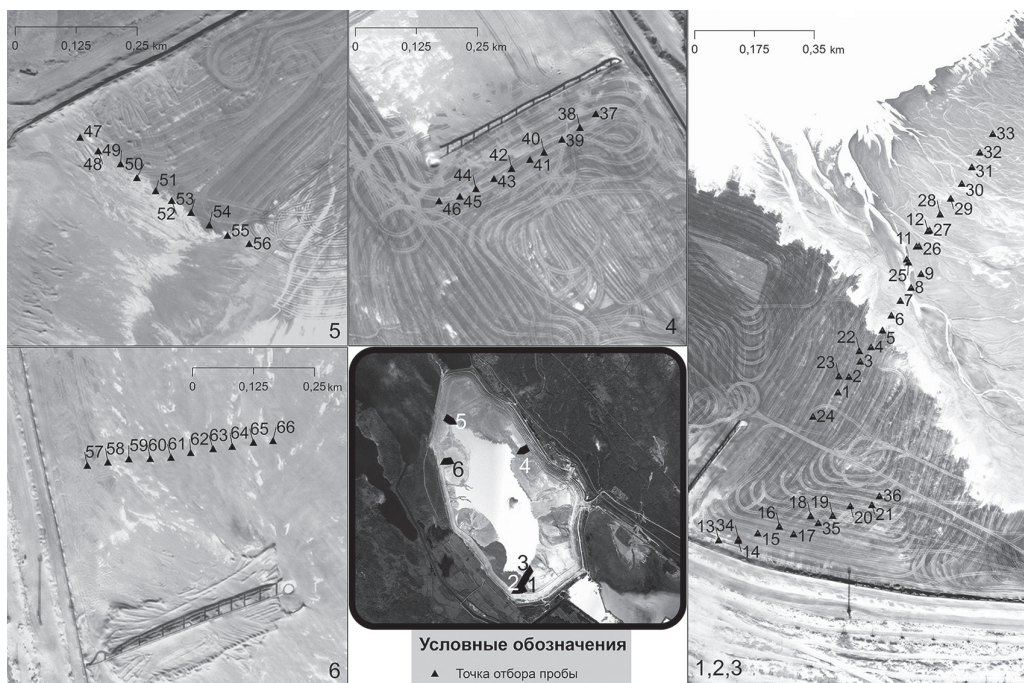


Рис. 1. Точки отбора проб хвостов  
 Fig. 1. Tailings sampling points

массового срыва наносимых покрытий и основными источниками выносимой за пределы санитарно-защитной зоны хвостохранилища мелкой пыли [16].

**Натурные исследования влажности и плотности в естественном залегании хвостов обогащения в период снеготаяния и перехода к положительным температурам воздуха**

Натурные исследования проводили весной 2019 г. Ввиду того, что средне-месячная температура воздуха в апреле 2019 г. по Мурманской области составила от  $-0,8$  до  $+2,8$  °С, что выше климатической нормы на  $1,8-4,5$  °С, а осадков за месяц выпало от 2 до 24 мм, что составляет лишь 8–79% месячной нормы, сход снежного покрова начался раньше обычного на 10–20 дней. Поэтому работы на хвостохранилище АНОФ-2 были начаты 29 апреля 2019 г.

Отбор проб материала хвостов проводили методом режущего кольца. Схема отбора проб показана на рис. 1. Проход от дамбы хвостохранилища по направлению к прудку оборотной воды и отбор проб 29.04.2019 г. были затруднены или невозможны из-за сильной обводненности поверхности вследствие снеготаяния (рис. 2). В последующие дни таких проблем не возникало. На северо-восточном и восточном участках хвостохранилища наблюдался снежный покров. К 13.05.2019 г. поверхность полностью освободилась от снега.

Величины влажности и плотности в естественном залегании хвостов обогащения в период снеготаяния и перехода к положительным температурам воздуха приведены в табл. 2.

29.04.2019, 06.05.2019 и 13.05.2019 г. в ряде точек наблюдался смерзшийся грунт на поверхности хвостов и ниже. 21.05.2019 г. смерзшийся грунт отме-



Рис. 2. Заснеженная (а) и обводненная (б) поверхность хвостов  
 Fig. 2. Snow-covered (a) and waterlogged (b) surface of the tailings

Таблица 2

**Величины влажности и плотности в естественном залегании хвостов обогащения в период снеготаяния и перехода к положительным температурам воздуха**  
**Moisture and density values of untreated tailings during snow melt and the transition period to positive air temperatures**

Номер пробы	Влажность, %	Плотность в естественном залегании, г/см <sup>3</sup>	Примечание
<b>Дата отбора проб: 29.04.2019, температура воздуха 0,1 °С</b>			
1	13,6	1,65	
2	21,0	1,94	
3	21,7	2,09	
4	16,9	2,00	
5	15,0	1,85	мерзлый грунт
6	19,5	1,89	мерзлый грунт
7	10,2	1,75	мерзлый грунт
8	18,2	1,88	
9	30,4	2,19	
10	9,3	1,69	
11	4,6	1,70	
12	2,5	1,66	
<b>Дата отбора проб: 06.05.2019, температура воздуха 4,0 °С</b>			
13	3,2	1,69	мерзлый грунт на глубине 30 см
14	8,8	1,69	мерзлый грунт на глубине 40 см
15	20,8	1,84	мерзлый грунт на глубине 25 см
16	4,0	1,59	мерзлый грунт на глубине 25 см

Номер пробы	Влажность, %	Плотность в естественном залегании, г/см <sup>3</sup>	Примечание
17	15,5	1,99	на поверхности много воды; мерзлый грунт на глубине 40 см
18	4,1	1,67	мерзлый грунт на глубине 25 см
19	9,7	1,69	
19*	7,1	1,64	
20	9,0	1,73	
21	11,4	1,79	
22	7,8	1,85	
23	3,4	1,78	
24	3,7	1,56	
<b>Дата отбора проб: 13.05.2019, температура воздуха 5,3 °С</b>			
25	3,0	1,63	
26	4,3	1,69	
27	2,5	1,70	
28	1,3	1,56	
29	4,4	1,75	
30	1,5	1,62	
31	3,8	1,64	
32	5,9	1,47	



33	5,2	1,59	
34	1,8	1,59	мерзлый грунт на глубине 30 см
35	16,4	2,11	
36	3,7	1,67	
<b>Дата отбора проб: 21.05.2019, температура воздуха 8,0 °С</b>			
37	3,63	1,23	
38	2,92	1,68	
39	3,41	1,68	
40	2,88	1,61	
40*	5,89	1,61	мерзлый грунт
41	3,09	1,76	
42	3,06	1,59	
43	3,73	1,70	
44	2,60	1,60	
45	4,20	1,78	
46	3,23	1,56	
46*	7,03	1,64	
<b>Дата отбора проб: 21.05.2019, температура воздуха 8,0 °С</b>			
47	1,28	1,55	
48	6,31	1,50	
49	11,52	1,69	
50	3,95	1,24	

51	5,75	1,53	
51*	10,01	1,72	мерзлый грунт
52	5,08	1,66	
53	3,13	1,64	
54	4,90	1,69	
55	2,46	1,59	
56	3,27	1,63	
56*	9,93	1,74	
<b>Дата отбора проб: 21.05.2019, температура воздуха 8,0 °С</b>			
57	2,99	1,55	
58	7,33	1,57	
59	27,12	1,80	
60	14,42	1,56	
61	20,14	1,58	
61*	12,61	1,83	мерзлый грунт
62	4,42	1,57	
63	15,38	1,64	
64	2,63	1,69	
65	8,70	1,57	
66	6,88	1,56	
66*	17,19	1,76	мерзлый грунт
Примечание: * Пробы отобраны с глубины 1 м			

чен в ряде точек при отборе проб хвостов с глубины 1 м.

На рис. 3, а приведено сопоставление изменения влажности проб, отобран-

ных 29.04.2019 и 13.05.2019 г. на одной и той же площади южной части хвостохранилища. Ввиду того, что в данный период наблюдалось минимальное коли-

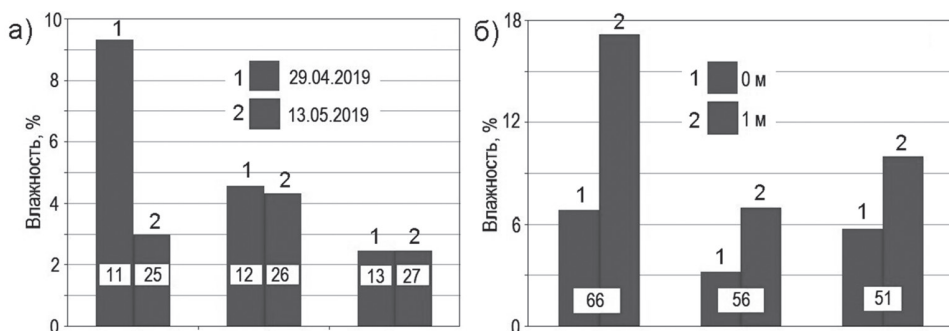


Рис. 3. Изменение влажности проб, отобранных в разное время в южной части хвостохранилища (а); сравнение влажности проб с поверхности и на глубине 1 м (б): 51 – северная часть; 61 – восточная часть; 66 – западная часть хвостохранилища

Fig. 3. Measuring moisture content in the samples collected at different times in the southern section of the tailing pond (a); moisture content of the samples from the surface and at a depth of 1 m (b): 51 – northern section; 61 – eastern section; 66 – western section of the tailing pond

чество атмосферных осадков, и вследствие хорошего дренажа верхних слоев хвостов происходит снижение влажности. Низкая влажность проб хвостов 11, 12, 25, 26 и 27 достаточна для пыления в случае неблагоприятных метеорологических условий. Таким образом, через 10–15 дней после схода снежного покрова при отсутствии атмосферных осадков даже в случае среднесуточной температуры ниже 5–8 °С хвосты представляют потенциальную опасность для загрязнения атмосферного воздуха пылью.

Сопоставление влажности проб хвостов с поверхности и на глубине 1 м, отобранных 21.05.2019 г. в северной, западной и восточной части хвостохранилища, представлено на рис. 3, б. Как видно, влажность проб на глубине 1 м закономерно выше. Кроме того отметим, что наибольшей влажностью характеризуются пробы, отобранные в северной части хвостохранилища, на которой сохранялся снежный покров в течение первой декады мая.

### Выводы

1. Анализ метеорологических параметров теплого периода показал, что в последнее десятилетие наблюдается существенное, более чем на 2 °С, повышение среднемесячной температуры

в мае. С этим связан более ранний сход снежного покрова и увеличение продолжительности потенциальной возможности пыления хвостов.

В летние месяцы, за исключением июня, и в сентябре также зафиксировано заметное повышение среднемесячной температуры.

2. Прослежена связь между температурными параметрами теплого периода и интенсивностью пыления хвостов. Установлено, что наиболее часто превышение наблюдалось при среднесуточной температуре воздуха в интервале 10–15 °С, влажности 60–80% и скорости ветра 2–4 м/с. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что для превышения ПДК достаточно кратковременных порывов ветра в районе хвостохранилища. Наибольшее число случаев приходится на ветры северо-западного направления.

3. Изучение метеоданных и результаты исследований состояния поверхности хвостов свидетельствует о целесообразности проведения мониторинга с отбором разовых проб воздуха, определений направления и скорости ветра, температуры и влажности воздуха непосредственно на хвостохранилище при наступлении неблагоприятных метеорологических условий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Noble T. L., Parbhakar-Fox A., Berry R. F., Lottermoser B. Mineral dust emissions at metalliferous mine sites // *Environmental Indicators in Metal Mining*. Springer International Publishing, Switzerland, 2017, pp. 281–306.
2. Jain R. K., Cui Z. C., Domen J. K. Environmental Impacts of Mining / *Environmental Impact of Mining and Mineral Processing. Management, Monitoring, and Auditing Strategies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2016, pp. 153–157.
3. Chen D. W., Nie W., Cai P., Liu Z. Q. The diffusion of dust in a fully-mechanized mining face with a mining height of 7 m and the application of wet dust-collecting nets // *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 205, pp. 463–476.
4. Loredo J., Soto J., Álvarez R., Ordóñez A. Atmospheric monitoring at abandoned mercury mine sites in Asturias (NW Spain) // *Environmental Monitoring Assessment*. 2007, vol. 130, pp. 201–214.
5. Corriveau M. C., Jamieson H. E., Parsons M. B., Campbell J. L., Lanzirotti A. Direct characterization of airborne particles associated with arsenic-rich mine tailings: particle size, mineralogy and texture // *Applied Geochemistry*. 2011, vol. 26, pp. 1639–1648.

6. Lilic N., Cvjetic A., Knezevic D., Milisavljevic V., Pantelic U. Dust and noise environmental impact assessment and control in Serbian mining practice // *Minerals*. 2018, vol. 8, no. 2. DOI: 10.3390/min8020034.

7. Buikema N. D., Zwissler B., Seagren E. A., Oommen T., Vitton S. Stabilisation of iron mine tailings through biocalcification // *Environmental Geotechnics*. 2018, vol. 5, no. 2, pp. 94–106.

8. Приймак Т. И., Зосин А. П., Федоренко Ю. В., Кошкина Л. Б., Калабин Г. В. Экологические аспекты процессов геохимической трансформации хвостов обогащения апатито-нефелиновых руд Хибинского месторождения. — Апатиты: КНЦ РАН, 1998. — 51 с.

9. Амосов П. В., Бакланов А. А., Маслобоев В. А. Результаты оценки загрязнения атмосферы при пылении хвостохранилища (на базе трехмерного моделирования) // *Известия вузов. Горный журнал*. — 2017. — № 6. — С. 87–94.

10. Амосов П. В., Бакланов А. А., Маслобоев В. А. Обоснование методического подхода к оценке интенсивности пыления на хвостохранилище // *Вестник Кольского научного центра РАН*. — 2018. — № 1. — С. 5–14.

11. Маслобоев В. А., Светлов А. В., Кони́на О. Т., Митрофанова Г. В., Туртанов А. В., Макаров Д. В. Выбор связующих реагентов для предотвращения пылеобразования на хвостохранилищах переработки апатит-нефелиновых руд // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2018. — № 2. — С. 161–171.

12. Яковлев Б. А. Климат Мурманской области. — Мурманск: Мурманское кн. изд-во, 1961. — 86 с.

13. Демин В. И. Основные климатические тенденции на Кольском полуострове за период инструментальных метеорологических измерений // *Труды КНЦ РАН. Прикладная экология Севера*. — 2012. — № 1. — С. 97–108.

14. *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. В 2 т. — М.: Росгидромет, 2008. <http://climate2008.igce.ru>.

15. Айрия́нц А. А., Бортникова С. Б. Хранилище сульфидсодержащих отходов обогащения как источник тяжелых металлов (Zn, Pb, Cu, Cd) в окружающей среде // *Химия в интересах устойчивого развития*. — 2000. — Т. 8. — С. 315–326.

16. Калугин А. И., Кони́на О. Т., Гусарь И. В. Природоохранная деятельность АО «Апатит»: результаты и перспективы // *Горный журнал*. — 2014. — № 10. — С. 88–92. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Noble T. L., Parbhakar-Fox A., Berry R. F., Lottermoser B. Mineral dust emissions at metal-liferous mine sites. *Environmental Indicators in Metal Mining*. Springer International Publishing, Switzerland, 2017, pp. 281–306.

2. Jain R. K., Cui Z. C., Domen J. K. Environmental Impacts of Mining. *Environmental Impact of Mining and Mineral Processing. Management, Monitoring, and Auditing Strategies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2016, pp. 153–157.

3. Chen D. W., Nie W., Cai P., Liu Z. Q. The diffusion of dust in a fully-mechanized mining face with a mining height of 7 m and the application of wet dust-collecting nets. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 205, pp. 463–476.

4. Loredó J., Soto J., Álvarez R., Ordóñez A. Atmospheric monitoring at abandoned mercury mine sites in Asturias (NW Spain). *Environmental Monitoring Assessment*. 2007, vol. 130, pp. 201–214.

5. Corriveau M. C., Jamieson H. E., Parsons M. B., Campbell J. L., Lanzarotti A. Direct characterization of airborne particles associated with arsenic-rich mine tailings: particle size, mineralogy and texture. *Applied Geochemistry*. 2011, vol. 26, pp. 1639–1648.

6. Lilic N., Cvjetic A., Knezevic D., Milisavljevic V., Pantelic U. Dust and noise environmental impact assessment and control in Serbian mining practice. *Minerals*. 2018, vol. 8, no. 2. DOI: 10.3390/min8020034.

7. Buikema N. D., Zwissler B., Seagren E. A., Oommen T., Vitton S. Stabilisation of iron mine tailings through biocalcification. *Environmental Geotechnics*. 2018, vol. 5, no. 2, pp. 94–106.

8. Priimak T. I., Zosin A. P., Fedorenko Yu. V., Koshkina L. B., Kalabin G. V. *Ekologicheskie aspekty protsessov geokhimicheskoy transformatsii khvostov obogashcheniya apatito-nefelinovykh rud Khibinskogo mestorozhdeniya* [Ecological aspects of geochemical transformation processes of apatite-nepheline ore flotation tailings of the Khibinsk deposit], Apatity, KNTs RAN, 1998, 51 p.

9. Amosov P. V., Baklanov A. A., Masloboev V. A. The results of the assessment of the atmosphere pollution under the tailing storages dusting (on the basis of 3D modeling). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2017, no 6, pp. 87 – 94. [In Russ].

10. Amosov P. V., Baklanov A. A., Masloboev V. A. Justification of the methodical approach to estimation of dust intensity at tailing dump. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2018, no 1, pp. 5 – 14. [In Russ].

11. Masloboev V. A., Svetlov A. V., Konina O. T., Mitrofanova G. V., Turtanov A. V., Makarov D. V. Selection of binding agents for dust prevention at tailings ponds at apatite-nepheline ore processing plants. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2018, no 2, pp. 161 – 171. [In Russ].

12. Yakovlev B. A. *Klimat Murmanskoy oblasti* [The climate of Murmansk Region], Murmansk, 1961, 86 p.

13. Demin V. I. General climatic tendencies on the Kola Peninsula during the meteorological measurements period. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Prikladnaya ekologiya Severa*. 2012, no 1, pp. 97 – 108. [In Russ].

14. *Otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [Assessment Report on Climate Change and Its Consequences in the Russian Federation], Moscow, Rosgidromet, 2008. [In Russ]. <http://climate2008.igce.ru>.

15. Airiyants A. A., Bortnikova S. B. Sulfide-containing concentration tailings storage facility as a source of heavy metal (Zn, Pb, Cu, Cd) pollution of the environment. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2000, vol. 8, pp. 315 – 326. [In Russ].

16. Kalugin A. I., Konina O. T., Gusar I. V. Environmental activity of Apatit JSC: Outcome and challenges. *Gornyy Zhurnal*. 2014, no 10, pp. 88 – 92. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Макаров Дмитрий Викторович<sup>1</sup> – д-р техн. наук, директор,

Светлов Антон Викторович<sup>1</sup> – канд. техн. наук, научный сотрудник,

Горячев Андрей Александрович<sup>1,2</sup> – аспирант, младший научный сотрудник,

Конина Олеся Тимуровна<sup>1</sup> – аспирант,

Маслобоев Владимир Алексеевич<sup>1,2</sup> – д-р техн. наук,

главный научный сотрудник, научный руководитель, советник председателя,

<sup>1</sup> Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ «Кольский научный центр РАН»,

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН».

**Для контактов:** Макаров Д.В., e-mail: mdv\_2008@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.V. Makarov<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Director,

A.V. Svetlov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,

A.A. Goryachev<sup>1,2</sup>, Graduate Student, Junior Researcher,

O.T. Konina<sup>1</sup>, Graduate Student,

V.A. Masloboev<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Head Researcher, Scientific Supervisor, Senior Advisor,

<sup>1</sup> Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Scientific Center,

Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia,

<sup>2</sup> Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.

**Corresponding author:** D.V. Makarov, e-mail: mdv\_2008@mail.ru.

Получена редакцией 12.06.2020; получена после рецензии 17.07.2020; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 12.06.2020; received after the review 17.07.2020; accepted for printing 10.04.2021.