

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

# ПЫЛЕНИЕ

ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ  
АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД:  
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА  
И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ СЕВЕРА

П. В. Амосов, А. А. Бакланов, А. А. Горячев, О. Т. Кони́на,  
Е. А. Красавцева, Д. В. Макаров, В. А. Маслобоев, О. Ю. Ригина, А. В. Светлов

**ПЫЛЕНИЕ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД:  
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ**

Апатиты  
Издательство ФИЦ КНЦ РАН  
2023

УДК 622.4.3:519.67

ББК 20.1

П94

Печатается по решению Редакционного совета по книжным изданиям ФИЦ КНЦ РАН

**Рецензенты:**

доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук **Г. В. Калабин**;  
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» **О. И. Шумилов**

**Пыление** хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд: экологическая проблема и пути ее решения : монография / П. В. Амосов [и др.]. — Апатиты : Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2023. — 168 с. : ил.

ISBN 978-5-91137-505-8

Представлены исследования пыления хвостов обогащения Кировского филиала АО «Апатит». Оценена связь метеорологических параметров теплого периода и интенсивности пыления хвостов, приводящих к превышению ПДК на территории города Апатиты Мурманской области. Сделан обзор имеющихся способов подавления эмиссии пылевых частиц при эксплуатации действующих и законсервированных хвостохранилищ. Приведены результаты испытаний новых связующих реагентов: мониторинг состояния закрепленной поверхности в натуральных условиях и лабораторные исследования физико-механических свойств и устойчивости по отношению к агрессивным воздействиям, влияния поступления связующих реагентов в оборотную воду на технологические показатели флотации апатит-нефелиновой руды. Показано, что кроме хвостохранилищ значительную нагрузку на атмосферный воздух оказывает транспорт и другие промышленные предприятия. Экспериментально отмечена роль зеленых зон в пределах санитарно-защитных полос и в черте городской застройки. Апробирован (в лабораторном масштабе) подход по анализу цифровых фотоснимков материалов хвостов обогащения с использованием RGB- и Lab-методик для определения количественной взаимосвязи температуры и влажности исследуемого материала. Представлены результаты компьютерного моделирования процессов пыления на хвостохранилище АНОФ-2 и загрязнения атмосферы мультимодальной примесью вниз по ветровому потоку на базе двух- и трехмерных CFD-моделей. Дана оценка эффективности технологических мероприятий по снижению интенсивности пыления на пляжах хвостохранилища.

Монография адресована инженерно-техническим работникам химической промышленности, научным работникам, экологам-практикам, населению, проживающему в районах размещения горно-обогатительных комбинатов и заинтересованному в чистой атмосфере. Она может оказаться полезной для обучающихся по химическому и экологическому направлениям студентов высших учебных заведений.

УДК 622.4.3:519.67  
ББК 20.1

Фото на обложке – А. В. Светлов

Научное издание  
Редактор Е. Н. Еремеева  
Технический редактор В. Ю. Жиганов  
Подписано в печать 27.12.2023. Формат бумаги 70×108 1/16.  
Усл. печ. л. 14,7. Заказ № 78. Тираж 300 экз.

Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН».  
184209, Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14.

ISBN 978-5-91137-505-8  
doi:10.37614/978.5.91137.505.8

© П. В. Амосов, А. А. Бакланов, А. А. Горячев,  
О. Т. Кониная, Е. А. Красавцева, Д. В. Макаров,  
В. А. Маслобоев, О. Ю. Ригина, А. В. Светлов, 2023  
© ФИЦ КНЦ РАН, 2023  
© ИППЭС, 2023

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION  
FEDERAL RESEARCH CENTRE  
“KOLA SCIENCE CENTRE OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES”  
INSTITUTE OF NORTH INDUSTRIAL ECOLOGY PROBLEMS

P. V. Amosov, A. A. Baklanov, A. A. Goryachev, O. T. Konina,  
E. A. Krasavtseva, D. V. Makarov, V. A. Masloboev, O. Yu. Rigina, A. V. Svetlov

**DUSTING OF APATITE-NEPHELINE ORES ENRICHMENT TAILINGS:  
AN ENVIRONMENTAL PROBLEM AND PATHWAYS TO SOLVE IT**

Apatity  
Publishing House of the Kola Science Centre  
2023



UDC 622.4.3:519.67  
BBC 20.1  
D93

Published by the decision of the Editorial Council of the Federal Research Centre  
“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”

**Reviewers:**

**G. V. Kalabin**, Doctor of Technical Sciences, Chief Scientist at the Academician  
N. V. Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources,  
Russian Academy of Sciences;

**O. I. Shumilov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Scientist  
at the Institute of North Industrial Ecology Problems of the Federal Research Centre  
“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”

D93 **Dusting** of apatite-nepheline ores enrichment tailings: an environmental problem  
and pathways to solve it : monograph / P. V. Amosov [et al.]. — Apatity : Publishing House  
of the Kola Science Centre, 2023. — 168 p.

ISBN 978-5-91137-505-8

Studies of dusting of KB JSC “Apatit” enrichment tailings are presented. An assessment was made of the relationship between the meteorological parameters of the warm period and the tailings dusting intensity, which leads to an excess of MPC in Apatity, Murmansk region. An overview of the available methods for suppressing the dust particles emission during the operation of current and mothballed tailings dumps is presented. The results of new binding reagents testing are presented: in situ monitoring of the fixed surface state and laboratory studies of physical and mechanical properties, affecting the resistance to aggressive influences, as well as the effect of the binding reagents intake into recycled water on the technological parameters of apatite-nepheline ore flotation. It was shown that in addition to tailings dumps, transport and other industrial enterprises have a significant load on atmospheric air. The role of green zones within buffer zone, as well as in urban area was experimentally noted. An approach was tested (on a laboratory scale) for analyzing digital photographs of enrichment tailings material using RGB- and Lab-techniques to determine the quantitative relationship between temperature and humidity of the studied material. The results of computer simulation of both dusting at the ANOF-2 tailings dump and atmospheric pollution with a multi-dispersed impurity along the downward wind flow based on two- and three-dimensional CFD models. An assessment was made of the technological measures effectiveness to reduce the dusting intensity on the tailings dump beaches.

The monograph is addressed to engineering and technical workers of the chemical industry, scientists, environmental practitioners, as well as citizens living in areas where mining and processing plants and interested in a clean atmosphere. It may be useful for students of higher educational institutions studying in chemical and environmental fields.

UDC 622.4.3:519.67  
BBC 20.1

ISBN 978-5-91137-505-8  
doi:10.37614/978.5.91137.505.8

© P. V. Amosov, A. A. Baklanov, A. A. Goryachev,  
O. T. Konina, E. A. Krasavtseva, D. V. Makarov,  
V. A. Masloboev, O. Yu. Rigina, A. V. Svetlov, 2023  
© FRC KSC RAS, 2023  
© INEP, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	9
Глава 1. Экспериментальные исследования на объекте пыления. Определение физико-химических свойств хвостов обогащения .....	15
1.1. Краткое описание объекта исследования как источника загрязнения атмосферы .....	15
1.2. Проблема пыления хвостохранилищ и тенденции изменения климата на примере Кировского филиала АО «Апатит» .....	20
1.2.1. Некоторые климатические характеристики района размещения хвостохранилища АНОФ-2 и тенденции изменения метеорологических параметров .....	20
1.2.2. Оценка связи метеорологических параметров теплого периода (май-сентябрь) и интенсивности пыления хвостов .....	25
1.2.3. Натурные исследования влажности и плотности в естественном залегании хвостов обогащения в период снеготаяния и перехода к положительным температурам воздуха .....	27
1.3. Обзор методов снижения пыления отвалов горнопромышленных отходов .....	32
1.4. Исследования связующих реагентов для закрепления пылящей поверхности хвостохранилища АНОФ-2 Кировского филиала АО «Апатит» .....	38
1.4.1. Исследования инженерно-геологических свойств хвостов на участках нанесения реагентов .....	39
1.4.2. Мониторинг состояния закрепленной поверхности хвостохранилища на участках применения связующих реагентов .....	42
1.4.3. Определение прочностных и фильтрационных характеристик покрытий связующих реагентов .....	43
1.4.4. Исследование выщелачивания связующих реагентов и влияния этих процессов на флотацию апатита и осветление оборотной воды .....	44
Выводы по главе 1 .....	49
Глава 2. Микрочастицы в атмосферном воздухе города Апатиты. Обработка фотоснимков хвостов обогащения на базе цветковых моделей .....	51
2.1. Загрязнение атмосферного воздуха города Апатиты микрочастицами .....	51
2.2. Взаимосвязь температуры и влажности материала хвостов обогащения на базе обработки цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов и цветковых моделей .....	57
Приложение к разделу 2.2 .....	70
Выводы по главе 2 .....	71
Глава 3. Численное моделирование процессов пыления на объектах горнопромышленного комплекса и загрязнения атмосферы населенных пунктов (на примере хвостохранилища АНОФ-2 и города Апатиты) .....	73

3.1. Предыстория исследований процессов пыления на хвостохранилище АНОФ-2 и загрязнения атмосферы на базе компьютерного моделирования .....	73
3.1.1. Исследования 1980–2000-х годов .....	73
3.1.2. Двухмерное CFD-моделирование процессов загрязнения атмосферы мультидисперсной примесью .....	78
3.2. Трехмерное моделирование процессов пыления и загрязнения атмосферы мультидисперсной примесью вниз по ветровому потоку .....	88
3.2.1. Характеристики модели .....	88
3.2.2. Формализованное описание интенсивности пыления (описание подходов, пороговая скорость и др.) .....	98
3.2.3. Результаты моделирования в подходе сплошности источника пыления .....	108
3.2.4. Результаты моделирования в подходе дискретности источника пыления .....	114
3.3. Оценка эффективности мероприятий по снижению интенсивности пыления на хвостохранилище .....	142
Выводы по главе 3 .....	145
Заключение .....	149
Литература .....	154

## CONTENTS

Introduction .....	9
Chapter 1. Experimental studies at the dusting area. Determination of the physical and chemical properties of enrichment tailings .....	15
1.1. Brief description of the research facility as a cause of atmospheric pollution .....	15
1.2. The problem of tailings dumps dusting and trends in climate change on the example of KB JSC “Apatit” .....	20
1.2.1. Some climatic characteristics of the ANOF-2 tailings storage area and trends in meteorological parameters .....	20
1.2.2. Assessment of the relationship between the meteorological parameters of the warm period (May-September) and the intensity of tailings dusting .....	25
1.2.3. Field studies of humidity and natural density of enrichment tailings during snowmelt and transition to positive air temperatures .....	27
1.3. Overview of methods for reducing dusting of mining waste dumps .....	32
1.4. Studies of binding reagents for fixing the dusty surface of the ANOF-2 tailings storage facility of KB JSC “Apatit” .....	38
1.4.1. Investigations of engineering and geological properties of tailings at reagent application sites .....	39
1.4.2. Monitoring of the fixed surface state of the tailings dump at the binding reagents application sites .....	42
1.4.3. Determination of strength and filtration characteristics of binding reagents coatings .....	43
1.4.4. Investigation of binding reagents leaching and the effect of these processes on apatite flotation and clarification of recycled water .....	44
Conclusions on Chapter 1 .....	49
Chapter 2. Microparticles in the atmospheric air of Apatity. Processing of enrichment tailings photographs based on color models .....	51
2.1. Atmospheric air microparticles pollution in Apatity .....	51
2.2. The relationship between temperature and humidity of the enrichment tailings material based on the processing of laboratory experiments digital photographs and color models .....	57
Appendix to section 2.2 .....	70
Conclusions on Chapter 2 .....	71
Chapter 3. Numerical modeling of dusting processes at mining facilities and atmospheric pollution in populated areas (using the example of the ANOF-2 tailings dump and the town of Apatity) .....	73
3.1. Background of research on the processes of dusting at the ANOF-2 tailings dump and atmospheric pollution based on computer modeling .....	73
3.1.1. Research in the 1980s and 2000s .....	73
3.1.2. Two-dimensional CFD modeling of atmospheric pollution with a multi-dispersed impurity .....	78



3.2. Three-dimensional modeling of the dusting processes and atmospheric pollution with a multi-dispersed impurity downward the wind flow .....	88
3.2.1. Characteristics of the model .....	88
3.2.2. Formalized description of dusting intensity (description of approaches, threshold velocity, etc.) .....	98
3.2.3. Simulation results in the dust source continuity approach .....	108
3.2.4. Simulation results in the dust source discreteness approach ...	114
3.3. Assessment of the measures effectiveness to reduce the intensity of dusting at the tailings dump .....	142
Conclusions on Chapter 3 .....	145
Conclusion .....	149
References .....	154

## ВВЕДЕНИЕ

Российская Федерация, в силу естественных причин, обладает уникальными по количеству и разнообразию минерально-сырьевыми ресурсами, а также значительной территорией, занятой естественными экосистемами. Это позволяет в полной мере обеспечивать внутренние потребности страны в минеральном сырье. Вместе с тем, российский минерально-сырьевой комплекс представлен, главным образом, предприятиями, действующими в течение длительного времени и обладающими развитой и сложной по структуре производственно-технической базой. Сложившийся на предприятиях высокий уровень потребления ресурсов и энергетической емкости горного производства представляет серьезное препятствие на пути технического переоснащения или реконструкции.

Негативное воздействие производства на окружающую среду в горнопромышленных регионах приобрело устойчивый характер. Предотвращение или компенсация такого воздействия зачастую не могут быть осуществлены имеющимися на предприятиях техническими и экономическими возможностями при существующих механизмах обеспечения экологической безопасности.

Проблема экологической безопасности при хранении горнопромышленных отходов является актуальной для всего мира [1]. В Российской Федерации она имеет свою специфику, связанную с добычей относительно бедного минерального сырья, часто нетрадиционных его видов, содержащих несколько полезных компонентов. Это приводит к неизбежным потерям ценных компонентов в процессах добычи и обогащения и их переходу в отходы. Специфическим является и географическое положение российской минерально-сырьевой базы — значительная часть промышленных месторождений расположена в Арктической зоне Российской Федерации (АЗ РФ).

Как известно, горнопромышленные отходы включают складированные вскрышные и вмещающие горные породы, забалансовые руды, хвосты обогащения, отходы угольной промышленности, черной и цветной металлургии, промышленности строительных материалов.

Негативное воздействие горнопромышленных отходов необходимо прогнозировать и учитывать в следующих аспектах [2]:

отчуждение земель под их размещение и хранение, нарушение гидрологического и гидрогеологического режимов;

пыление породных и хвостовых отвалов;

гипергенные процессы, протекающие в отходах и приводящие к миграции в окружающую среду токсичных элементов и тяжелых металлов, флотационных реагентов, а также к генерации кислых стоков (acid mine drainage).

В центре внимания авторов монографии находится вопрос пыления хвостов обогащения. Два других указанных выше аспекта негативного воздействия, безусловно, заслуживают отдельного цикла исследований, широких обсуждений, статей и монографий.

При складировании и хранении горнопромышленных отходов происходит загрязнение атмосферного воздуха, поверхностного слоя почвы и водоемов близлежащих территорий пылью, сдуваемой с поверхностей хвостохранилищ. Не вызывает сомнений, что борьба с пылением хвостохранилищ является важной научной и прикладной задачей.

Атмосферный воздух всегда содержит определенное количество твердых взвешенных веществ, в обиходе называемых пылью. Пыль поступает в атмосферу как естественным путем (природная пыль), так и в результате деятельности человека (техногенная пыль). Техногенная пыль обладает широким спектром негативных воздействий на живые организмы и экосистемы в целом. Пылевые выбросы промышленных предприятий являются одним из основных путей поступления в окружающую среду многих химических элементов и их соединений. С эколого-геохимической точки зрения важнейшей особенностью техногенной пыли является интенсивное концентрирование во всех ее видах широкого круга химических элементов, содержания которых существенно превышают их уровни в природных средах [3].

В зависимости от размера частиц согласно классификации, представленной в работе А. В. Иванова [4], различают следующие виды пыли:

крупная — от 100 до 500 мкм (0,1–0,5 мм), которая легко выпадает из потока воздуха при его небольшой скорости и почти отсутствует в атмосфере;

мелкая — от 10 до 100 мкм (0,01–0,1 мм), которая удерживается в воздухе, хотя в спокойной среде она оседает вначале с возрастающей, а потом с постоянной скоростью;

тонкая, или туманы, — 0,1–10 мкм (0,0001–0,01 мм), трудно оседающая в спокойной газовой среде и витающая в атмосфере длительное время;

весьма тонкая, или дымы, — менее 0,1 мкм ( $< 0,0001$  мм), которая не оседает под действием силы тяжести, находится в броуновском движении.

По форме пылевые частицы принято делить на сферические, изометрические (правильные многогранники), пластинчатые (протяженность в двух измерениях значительно больше, чем в третьем), игольчатые, волокнистые, призматические, сложные агрегатные (длинные цепочки, звездочки).

Пыль, попадающая в атмосферу в ходе ведения горных работ, различна по минеральному, химическому и дисперсному составу. Согласно [5], по минеральному составу она близка к минеральному составу пород, особенно непосредственно около источника пылеобразования. Однако состав пыли, осаждающейся на значительном удалении от этого источника, отличается от минерального состава разрабатываемых пород. Это зависит от прочности породообразующих минералов, крупности частиц пыли, их плотности, скорости витания в атмосфере и так далее. Поэтому на значительном удалении от источника пылеобразования в осевшей пыли могут преобладать частицы более «легких» породообразующих минералов.

Запыленность атмосферного воздуха пылевыми выбросами технологических производств, обусловленная процессами транспортирования пород, отвалообразования, эрозии отвалов и хвостохранилищ, приводит к загрязнению почвы пылью в результате ее осаждения. Это обуславливает ухудшение качества почвы, понижение ее биологической ценности, способности к самоочищению. Уровень воздействия пыли с техногенных массивов на состояние лесных экосистем можно оценить по среднему приросту древесины на 1 га и сохранности хвои в зависимости от удаленности техногенного массива [4]. Анализ литературных источников [6; 7] показал, что в радиусе до 10 км наблюдается ежегодное снижение прироста древесины по сравнению с фоновым

на 75 % с низкой (10–20 %) сохранностью хвои; в радиусе до 20 км — на 50–20 % с сохранностью хвои 50–90 %; в радиусе до 25–30 км — менее чем на 15 % с сохранностью хвои более 90 %.

Вредное действие пыли на организм человека зависит от вида пыли, ее размеров и способов воздействия. Например, В. Трудов [8] говорит о нескольких видах биологического воздействия твердых частиц на организм человека:

аллергенное — проявляется повышением чувствительности человека к раздражающему фактору пыли;

раздражающее — происходят местные воспалительные процессы, возникает раздражение слизистых оболочек дыхательных путей, которое сопровождается чиханием, кашлем, местными воспалительными процессами;

фиброгенное — при таком воздействии в легких происходит процесс замены живой ткани на соединительную, таким образом легкие не могут в полной мере обеспечивать дыхательную функцию, так как дыхательная поверхность легких сокращается — развивается фиброз;

токсическое — способность частичек пыли проникать в кровь, тем самым вызывая общее отравление организма.

Пыль, находящаяся в воздухе, может оказывать негативное действие на глаза человека, кожу и внутренние органы, попадая вместе с вдыхаемым воздухом. При действии на глаза она вызывает раздражение, сопровождающееся слезоточивостью, ослаблением зрения. Наиболее опасной является пыль негашеной извести, каменноугольного пека, карбида кальция, цемента, действие которой подобно действию щелочи.

Частицы пыли оседают на коже и даже проникают в нее, закупоривая отверстия сальных и потовых желез, вызывая этим воспаление кожи и нарушая процесс выделения пота. Воспалительные процессы усиливаются, если с пылью заносятся микробы и имеются места нарушений кожного покрова (царапины, порезы). При вдыхании запыленного воздуха часть пыли задерживается слизистой оболочкой дыхательных путей и вызывает воспалительные процессы носоглотки и бронхов.

Наиболее опасной является пыль с острыми, режущими краями, которая легко проникает в слизистую оболочку и травмирует ее. Пыль, попадая в легкие, оседает там, превращая с течением времени ткань в фиброзную (пневмокониоз), которая не участвует в процессе обмена кислорода и углекислого газа.

По мнению А. С. Холодова с коллегами [9], наибольшую опасность для здоровья человека представляют мелкие частицы диаметром до 5 мкм. Благодаря своим физическим свойствам они проникают во внутреннюю среду организма, не задерживаясь в верхних дыхательных путях, а попадая сразу в альвеолы и получая почти прямой контакт с кровью. Согласно данным китайских специалистов [10], концентрация мелкодисперсных частиц фракции  $PM_{2.5}$  влияет на смертность людей. Авторы указанной статьи представили статистически значимые доказательства того, что именно  $PM_{2.5}$  оказывает неблагоприятное воздействие на здоровье населения в целом. Результаты исследования подкрепляют доводы в пользу дальнейшего ограничения уровней  $PM_{2.5}$  в атмосферном воздухе Шанхая.

Частицы диаметром до 10 мкм (по международной классификации —  $PM_{10}$  (англ. — particulate matter)) имеют не столь сильную проникающую способность, тем не менее они также считаются опасными для здоровья.

Именно твердым частицам с аэродинамическим диаметром не более 10 мкм посвящены отдельные параграфы актуального руководства Всемирной



организации здравоохранения (ВОЗ) “WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide” [11]. Согласно указанному международному документу, среди твердых частиц классифицируют, помимо указанных, и ультрамелкие частицы с аэродинамическим диаметром не более 0,1 мкм (100 нм).

Для определения рекомендуемых уровней качества воздуха авторами документа [11] использовались только фактические данные, оцененные как имеющие высокую или умеренную степень достоверности связи между загрязнителем и конкретным результатом для здоровья. Все рекомендации (для примера см. табл. 0,1 по твердым частицам) классифицируются как надежные в соответствии с принятой классификацией подхода к оценке рекомендаций, разработке и оцениванию.

*Таблица 0.1*

Рекомендуемые уровни качества атмосферы по твердым частицам, мкг/м<sup>3</sup> [11]

Загрязнитель	Продолжительность осреднения	Рекомендуемый уровень
PM <sub>2.5</sub>	Годовое	5
	Суточное	15
PM <sub>10</sub>	Годовое	15
	Суточное	45

Некоторые последствия воздействия наиболее опасных для здоровья частиц PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub> представлены в указанной статье А. С. Холодова с коллегами [9] (табл. 0.2).

*Таблица 0.2*

Воздействие частиц PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub> на здоровье человека [9]

Продолжительность воздействия	Размерный класс частиц и вызываемые ими заболевания	
	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
Кратковременное	Астма, бронхиты, инфекции дыхательных путей, ишемическая болезнь сердца и др.	Астма и бронхиты, инфекции дыхательных путей
Длительное	Хронические бронхиты, аллергии, астма, утолщение артерий, снижение уровня и продолжительности жизни	Хронические бронхиты, снижение уровня и продолжительности жизни

Из присутствующих в воздухе примесей только пыль обладает выраженным кумулятивным воздействием на человека. Она накапливается в организме с постепенным наложением первоначально незначительных изменений. Пылевые поражения легких относятся к распространенной форме патологии и занимают значительное место в общей структуре заболеваемости, что приводит к существенным социально-экономическим потерям [12].

Характерной особенностью воздействия пыли на организм человека является колебание ее концентрации и времени контакта, причем в значительных пределах. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод

о том, что в таких условиях для организма наиболее опасен длительный контакт, например, с канцерогенной пылью при небольших концентрациях, по сравнению с кратковременным воздействием высоких доз [7].

Пыль, присутствующая в атмосфере, обладает однонаправленным и комбинированным (в присутствии оксида углерода и оксидов азота) действием на органы дыхания. Кроме того, отмечено увеличение повреждающего действия пыли. Это объясняется тем, что в сочетании со свободной двуокисью кремния и содержащимися в самой пыли ядовитыми примесями (в частности, свинца, марганца и т. п.) газы, осаждающиеся на ее частицах, завершают формирование газоаэрозольных композиций с диаметром частиц 5–8 мкм. Величина задерживания таких частиц в органах дыхания составляет 40–60 %, что может приводить к раздражению и воспалению бронхиального эпителия.

Пыль не только оказывает влияние на легкие, но и проникает в кровь, оказывая вредное влияние на другие органы. Так, классическими работами С. М. Генкина [13] и П. П. Движкова [14] установлено, что силикоз вызывает функциональные нарушения и изменения нервной и сосудистой систем, кровообращения, структуры белков и белкового обмена.

Таким образом, в зоне воздействия техногенных массивов наблюдается ухудшение показателей здоровья населения: снижение продолжительности жизни, увеличение заболеваемости (особенно органов дыхания у детей), врожденных патологий. В то же время количественная оценка воздействия техногенных массивов на здоровье человека, как правило, затруднена вследствие их расположения на территориях промышленных предприятий, в свою очередь влияющих на показатели здоровья населения. Из новых публикаций отметим коллективную монографию сотрудников Кольского научного центра Российской академии наук (КНЦ РАН) [15], которая посвящена изучению проблематики загрязнения воздуха микрочастицами в территориальном контексте Арктического региона (на примере Мурманской области). На информационной базе региональной медицинской статистики, данных о взаимосвязи отдельных групп заболеваний с воздействием определенных поллютантов авторами монографии решается задача комплексной оценки состояния и динамики здоровья (заболеваемости) населения территорий Мурманской области, на которых расположены крупные горно-химические и горно-металлургические производства. Проведена адаптация методологических подходов оценки готовности платить за снижение риска жизни и здоровью, а также калькуляции стоимости болезни для решения задачи определения экономического эквивалента ущерба здоровью населения от воздействия загрязнения воздуха микрочастицами. С использованием указанных адаптированных методов авторами осуществлена оценка ущерба здоровью населения от воздействия содержащихся в атмосферном воздухе микрочастиц в городах Мурманской области, являющихся производственными резиденциями крупных горно-металлургических и горно-химических компаний.

Несколько слов об объекте исследования. Хвосты апатитовой флотации обогатительных фабрик Кировского филиала (КФ) АО «Апатит» являются одними из крупнейших разновозрастных техногенных минеральных образований на территории Мурманской области. Хвостохранилище апатит-нефелиновой обогатительной фабрики № 1 (АНОФ-1), расположенное в излучине реки Белой в трех километрах от города Кировска, в 1957–1962 гг. заполнялось отходами обогащения руд Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений.

Хвостохранилище АНОФ-2 расположено в губе Белой озера Имандра на расстоянии около 1,5 км на северо-запад от площадки основного производства фабрики. Объект эксплуатируется с 1968 г. по настоящее время. Хвостохранилище АНОФ-3, расположенное в 3 км от поселка Титан, эксплуатируется с 1963 г. по настоящее время. В период 1963–1992 гг. в него поступали отходы обогащения АНОФ-1, с 1989 г. — отходы обогащения АНОФ-3 руд Коашвинского и Ньюкпахкского месторождений.

Не затрагивая весь спектр обозначенных интересных и сложных задач в проблеме пыления хвостохранилищ, основное внимание авторы монографии уделили отходам обогащения руд хвостохранилища АНОФ-2, по задачам соответствующим их профессиональной подготовке и научным интересам.

В монографии приведены результаты исследований авторского коллектива примерно за последний 10-летний период. Сюда вошли результаты решенных задач по темам научно-исследовательских работ (НИР) и хозяйственным договорам с КФ АО «Апатит», а также некоторые изыскания по численному моделированию за счет грантов.

Работы по темам НИР и хозяйственным договорам выполнялись сотрудниками Института проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) КНЦ РАН под руководством Д. В. Макарова и В. А. Маслобоева.

Касательно грантов, необходимо отметить как минимум два:

грант Российского научного фонда (РНФ) № 23-77-30008 «Интегрированное моделирование взаимосвязанных изменений погоды, климата, качества воздуха для устойчивого развития городов и регионов Арктики и севера России в условиях глобального изменения климата» (руководитель А. А. Бакланов);

грант Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 19-05-50065\19 «Микрочастицы в атмосфере, педосфере и гидросфере: идентификация источников, экологический риск, социально-экономический ущерб и влияние на здоровье населения (Микромир)» (руководитель В. А. Маслобоев).

В первой главе, помимо краткого описания объекта исследования, обсуждаются проблемы пыления хвостохранилищ и тенденции изменения климата, описываются результаты натурных исследований влажности и плотности хвостов обогащения в естественном залегании, приводится обзор методов рекультивации и консервации промышленных отходов, представлены результаты исследования связующих реагентов для закрепления пылящей поверхности хвостохранилища АНОФ-2 КФ АО «Апатит».

Во второй главе приведены результаты мониторинга загрязнения микрочастицами атмосферного воздуха города Апатиты в летний период, а также взгляд авторов на взаимосвязь температуры и влажности материала хвостов обогащения на базе обработки цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов и цветовых моделей.

В третьей главе обсуждаются результаты численного моделирования процессов пыления на объектах горнопромышленного комплекса и загрязнения атмосферы населенных пунктов (на примере района хвостохранилища АНОФ-2 и города Апатиты). Представлены предыстория исследований процессов пыления на хвостохранилище АНОФ-2, выполненных на рубеже 1980–1990-х гг., использование двух- и трехмерных CFD-моделей загрязнения атмосферы мультимодальной примесью вниз по ветровому потоку, а также оценка эффективности технологических мероприятий по снижению процесса пыления на пляжах хвостохранилища.

# ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОБЪЕКТЕ ПЫЛЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ

## 1.1. Краткое описание объекта исследования как источника загрязнения атмосферы

В центральной части Кольского полуострова, в непосредственной близости от городов Апатиты и Кировска, осуществляется добыча и переработка апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений. Выполняются указанные работы силами подразделений КФ АО «Апатит». Переработка руды производится на двух апатит-нефелиновых обогатительных фабриках — АНОФ-2 и АНОФ-3 [16]. По оценкам специалистов, на рудниках КФ АО «Апатит» добыто более 1,83 млрд тонн апатит-нефелиновой руды, из которой выработано более 649 млн тонн апатитового и более 66,8 млн тонн нефелинового концентратов [17].

Основная доля добываемой руды до последнего времени перерабатывалась на АНОФ-2, которая была пущена в эксплуатацию в 1963 г. и являлась одной из крупнейших в мире по переработке апатит-нефелиновых руд и производству апатитового концентрата.

В таблице 1.1 представлены данные по хвостовым отвалам КФ АО «Апатит», заимствованные из составленного Горным институтом КНЦ РАН «Банка данных техногенных месторождений Мурманской области» [18].

Таблица 1.1

Основные характеристики хвостохранилищ КФ АО «Апатит» [18]

Хвостохранилище	АНОФ-1	АНОФ-2	АНОФ-3
Период эксплуатации			
начало	1957 г.	1968 г.	1963 г.
окончание	1963 г.	Действует	Действует
Тип по размещению	Пойменное	Равнинное	Равнинное
Наличие отстойника	Нет	Есть	Есть
Название и крупность хвостов, мм	Песок, до 0,02	Песок, до 0,05	Песок, до 0,05
Занимаемая площадь, га	120	1027	1249
Ресурс техногенного месторождения, тыс. тонн	24 000	> 630 000 [2012 г.]	> 268 000 [2012 г.]
Полезные компоненты	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , TiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		

За многолетнюю историю на АНОФ-2 выработано более 450 млн тонн апатитового и свыше 40 млн тонн нефелинового концентратов. Результатом такого длительного и масштабного производства стало формирование одного из крупнейших в России по площади и объёму техногенного массива — хвостохранилища АНОФ-2, северо-западная часть которого представлена на рис. 1.1 [17].





**Рис. 1.1.** Северо-западная часть хвостохранилища АНОФ-2 [17]

Согласно отчету оценки воздействия на окружающую среду [19], хвостохранилище АНОФ-2 расположено в губе Белой озера Имандра на расстоянии 8,1 км от промплощадки обогатительной фабрики. Примерно на расстоянии 9 км на юго-восток от хвостохранилища находится город Апатиты. Хвостохранилище предназначено для складирования отвальных хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд. Дополнительно там размещаются и тонкодисперсные золошлаковые отходы Апатитской теплоэлектростанции (АТЭС).

Наращивание дамб осуществлялось намывным способом, и с течением времени дамбы сомкнулись. В настоящее время хвостохранилище ограждено намывной дамбой по всему периметру.

Общая площадь хвостохранилища АНОФ-2 составляет почти 8 км<sup>2</sup>, а периметр по дамбе обвалования — более 11 км. Высота намывной дамбы хвостохранилища, по данным [17], на конец 2014 г. достигла 73,4 м по отношению к уровню воды в озере Имандра.

Ежегодно с обогатительной фабрики на хвостохранилище поступает более 6 млн м<sup>3</sup> хвостов обогащения, а объём хвостов, уложенных с начала эксплуатации АНОФ-2, составляет почти 640 млн м<sup>3</sup>.

На сегодняшний день хвостохранилище АНОФ-2 является крупнейшим намывным техногенным массивом КФ АО «Апатит» и наиболее интенсивным источником техногенного воздействия предприятия на компоненты природной

среды и здоровье населения. В этой связи управление экологической безопасностью хвостохранилища АНОФ-2, а также постепенно увеличивающееся хвостохранилище АНОФ-3 являются для предприятия актуальной проблемой, в настоящее время не имеющей решения [20].

**Технологическая схема переработки апатит-нефелиновых руд.**

Основным продуктом переработки апатит-нефелиновых руд на АНОФ-2 является апатитовый концентрат. В технологической схеме получения апатитового концентрата выделено пять основных производственных отделений: дробильное; мельнично-флотационное; фильтровально-сушильное пылеулавливающее; отделение погрузки сухого апатитового концентрата и отделение хвостового хозяйства.

**Воздействие хвостового хозяйства на атмосферный воздух.**

На территории размещения намывного массива АНОФ-2 прочие источники загрязнения атмосферного воздуха отсутствуют. Промышленные выбросы в атмосферный воздух отслеживаются собственной лабораторией по контролю промышленных выбросов и атмосферного воздуха АНОФ-2 комплекса обогащения апатит-нефелиновых руд [19].

В таблице 1.2 представлены фоновые концентрации взвешенных веществ в районе расположения намывного массива по данным [19; 21].

Таблица 1.2

Фоновые концентрации взвешенных веществ  
в районе расположения намывного массива АНОФ-2 [19]

ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Концентрация взвешенных веществ, скорость и направление ветра					
	0,5	Концентрация, мг/м <sup>3</sup>	0,1	0,2	0,1	0,2
Скорость ветра, м/с		0–2				
Направление ветра		Штиль	С	В	Ю	З

Согласно проекту оценки воздействия на окружающую среду [19], разработанному для КФ АО «Апатит» специалистами ЗАО «Механобринжиниринг», основными источниками загрязнения компонентов природной среды (в первую очередь атмосферного воздуха) при эксплуатации сооружений хвостового хозяйства АНОФ-2 являются:

**пыление** пляжной зоны хвостохранилища (пыль отвалных хвостов (тонкодисперсные пески со средневзвешенной крупностью менее 100 мкм));

**пыление** бортов дамбы хвостохранилища (пыль техногенных грунтов (пески со средневзвешенной крупностью более 250 мкм с содержанием валунно-галечникового материала и гравия));

**пыление** внутренних автомагистралей (пыль техногенных грунтов);

**земляные работы** при отсыпке дамб обвалования (пыль техногенных грунтов);

работа **автотранспорта и дорожной техники** (продукты сгорания дизельного топлива);

работы по **перекладке пульпопроводов** (сварочный аэрозоль и пыль металлическая).

Количество пыли неорганической 70–20 % SiO<sub>2</sub>, выбрасываемой в атмосферный воздух при эксплуатации намывного массива [19] в соответствии

с проектной схемой, согласно тому предельно допустимых выбросов (ПДВ), разработанному для КФ АО «Апатит», составляет около 38,5 г/с (246,5 т/год).

Нормативы ПДВ для рассматриваемого производственного объекта установлены исходя из условий максимальных выбросов загрязняющих веществ при полной загрузке оборудования, поэтому в качестве исходных данных при расчете нормативов ПДВ приняты расчетные значения выбросов загрязняющих веществ при эксплуатации хвостохранилища [22].

Количество пыли неорганической 70–20 % SiO<sub>2</sub>, разрешенное к выбросу в атмосферный воздух при эксплуатации намывного массива АНОФ-2 в соответствии с проектной схемой, согласно тому ПДВ, подготовленному для КФ АО «Апатит», составляет 22,172 г/с (89,119 т/год).

Размеры санитарно-защитной зоны (СЗЗ) для хвостохранилища АНОФ-2 установлены в соответствие с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов». Предприятие АНОФ-2 по санитарной классификации относится к I классу (4.1.3.6 Горно-обогачительные комбинаты), размеры СЗЗ для всех производственных объектов предприятия составляют 1000 м [23].

В связи с тем, что хвостохранилище является неорганизованным источником выбросов, а интенсивность пыления напрямую зависит от метеорологических параметров, полученные значения СЗЗ должны быть скорректированы с учетом среднегодовой розы ветров [24; 25]. Размеры СЗЗ от границ чаши хвостохранилища АНОФ-2 с учетом среднегодовой розы ветров приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Скорректированные с учетом среднегодовой розы ветров размеры СЗЗ от границ чаши хвостохранилища АНОФ-2 [19]

Направление ветра							
С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Среднегодовая роза ветров, %							
8	4	28	17	7	6	14	16
Расстояние СЗЗ от границ чаши хвостохранилища, м							
1000	1000	2240	1360	1000	1000	1120	1280

**Реализуемые природоохранные мероприятия.** Для снижения техногенной нагрузки, сложившейся в регионе в результате формирования намывного техногенного массива АНОФ-2, на предприятии внедрён целый комплекс природоохранных мероприятий, направленных на уменьшение пылевыделения с поверхности пляжей и бортов дамбы хвостохранилища, а также с поверхности внутренних производственных автомагистралей [17].

Закрепление пляжей хвостохранилища является одним из основных и наиболее эффективных средозащитных мероприятий. Закрепление бортов дамбы хвостохранилища производится путём посева многолетней травы — волосенца песчаного. Это мероприятие является достаточно эффективным и долговечным. Через 2–3 года травяной покров образует плотную сеть корневой системы, которая закрепляет верхний слой насыпной дамбы

и на 70–80 % снижает интенсивность пыления бортов дамбы хвостохранилища. Для снижения пыления внутренних производственных дорог на предприятии производится их орошение водным раствором лигносульфоната — побочного продукта переработки древесины в целлюлозно-бумажной промышленности.

В периоды неблагоприятных метеорологических условий (НМУ), способствующих более интенсивному распространению вредных веществ в приземном слое атмосферы, на предприятии осуществляется временное сокращение выбросов загрязняющих веществ [26; 27].

В соответствии с РД 52.04.306-92 «Охрана природы. Атмосфера. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха» и РД 52.04.52-85 «Методические указания. Регулирование выбросов при неблагоприятных метеорологических условиях» в зависимости от ожидаемого уровня загрязнения атмосферы составляются предупреждения трех степеней, которым соответствуют три режима работы предприятия.

Мероприятия по регулированию выбросов в периоды неблагоприятных метеорологических условий по первому режиму разрабатываются самими предприятиями, а по второму и третьему режимам — территориальными органами Министерства природных ресурсов и экологии РФ.

При первом режиме работы предприятия регулирование выбросов осуществляется с использованием мероприятий организационно-технического характера, эффективность которых принимается равной 15 %.

При втором режиме работы предприятия мероприятия должны обеспечить сокращение концентрации загрязняющих веществ не менее чем на 35 %, что может быть достигнуто путем снижения производительности предприятия.

Мероприятия по регулированию выбросов при третьем режиме работы предприятия должны обеспечить сокращение концентрации загрязняющих веществ не менее чем на 55 %, а в некоторых особо опасных условиях предприятиям следует полностью прекратить выбросы.

При первом режиме эксплуатации хвостохранилища в периоды неблагоприятных метеорологических условий рекомендуется проведение следующих организационно-технических мероприятий по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу:

усиление контроля за точным соблюдением технологического регламента производства намыва хвостов;

усиление контроля за работой контрольно-измерительных приборов и автоматики;

ограничение движения и использования автотранспорта, задействованного на хвостохранилище, а также запрет работы его двигателей на холостом ходу при длительных остановках.

Для достижения эффективности организационно-технических мероприятий по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в процессе эксплуатации хвостохранилища при втором и третьем режимах помимо мероприятий, задействованных при первом режиме, рекомендуется:

снижение объема земляных и монтажных работ, а в некоторых особо опасных условиях их полное прекращение;

применение орошения пылящих поверхностей хвостохранилища с использованием специализированной техники [28; 29].

## **1.2. Проблема пыления хвостохранилищ и тенденции изменения климата на примере Кировского филиала АО «Апатит»**

### ***1.2.1. 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 [30]. 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 [30].

Как известно, потепление проявляется в той или иной степени на всей территории России, особенно в ее АЗ. По данным В. И. Демина, современное потепление в Мурманской области началось примерно со второй половины 1980-х гг. [31]. 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 % [32].

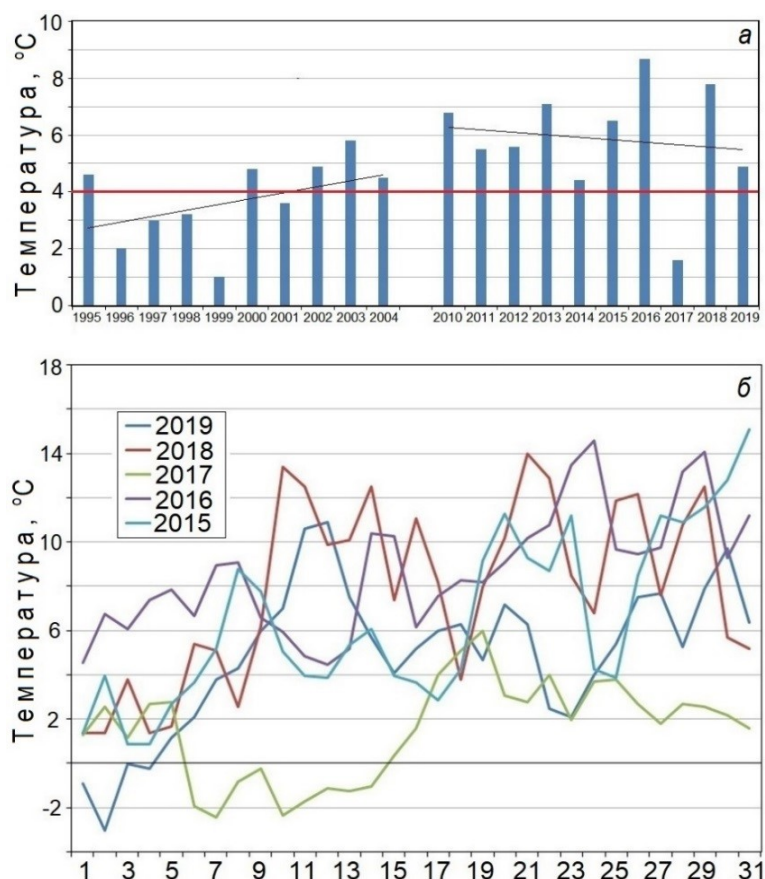
Климатические параметры региона складирования отходов обогащения вносят основной вклад в масштабы ветрового переноса загрязняющих веществ [33; 34]. Так, по данным С. Б. Бортниковой с сотрудниками, изучавшими процессы и формы выноса тяжелых металлов с хвостохранилища Салагаевский Лог (город Салаир, Кемеровская 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 [33]. Вместе с тем, сопоставление данных работы [33] с расчетами пылевых потоков хвостов обогащения АНОФ-2, выполненными авторами [34], показывает, что объемы годового ветрового сноса вещества с хвостохранилищ сопоставимы, в то время как площадь хвостохранилища АНОФ-2 превышает площадь хвостохранилища Салаирского ГОКа более чем на порядок.

Повышение среднесезонных температур, увеличение продолжительности бесснежного и безморозного периода должны способствовать усилению негативного воздействия на окружающую среду хвостов обогащения. Продолжительность пыления хвостов АНОФ-2 составляет около 90–100 дней в году, и потенциально оно 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 связующими реагентами. Нами использованы данные метеостанции

города Апатиты. Разумеется, вследствие расположения хвостохранилища у подножия гор Хибины, метеорологические параметры несколько отличаются, но с некоторым допущением их использование обосновано.

На рисунке 1.2, *a* представлены значения среднемесячных температур мая за период 2010–2019 гг. За исключением 2017 г. наблюдается устойчивое превышение температуры относительно средних многолетних значений, равных +4 °С, особенно в 2013, 2016 и 2018 гг.



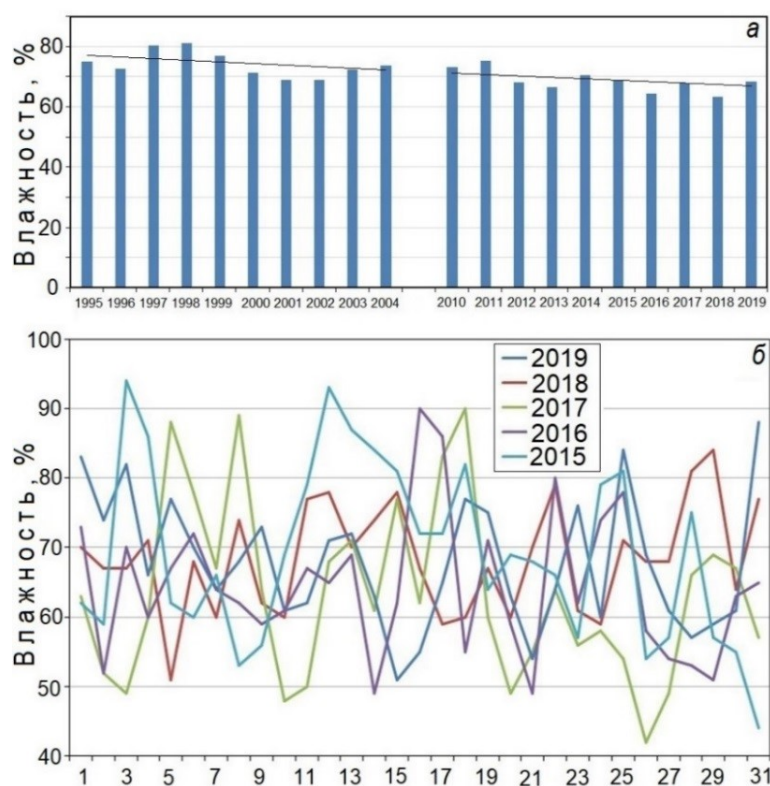
**Рис. 1.2.** Среднемесячные температуры мая за период 1995–2004 и 2010–2019 гг. (*a*); среднесуточные температуры в мае 2015–2019 гг. (*б*)

Ход среднесуточных температур в мае за период 2015–2019 гг. показан на рис. 1.2, *б*. Отметим, что суточные температуры в 2015, 2016 и 2018 гг. были положительными на протяжении всего месяца, что, безусловно, также является отклонением от нормы.

Для сравнения на рис. 1.2, *a* также показаны среднемесячные температуры мая за период 1995–2004 гг. На рубеже веков значения температуры мая были ниже или незначительно выше многолетних значений, в последнее же десятилетие наметилось существенное их повышение.

Показатели среднемесячных значений влажности воздуха показаны на рис. 1.3, *a*. В отличие от температуры, значительных изменений этого метеорологического параметра не произошло, хотя линейный тренд отражает

некоторое снижение показателя. Отметим, что наименьшие значения влажности характерны для наиболее теплых 2016 и 2018 гг. Рис. 1.3, б демонстрирует динамику среднесуточных показателей влажности в мае за период 2015–2019 гг.



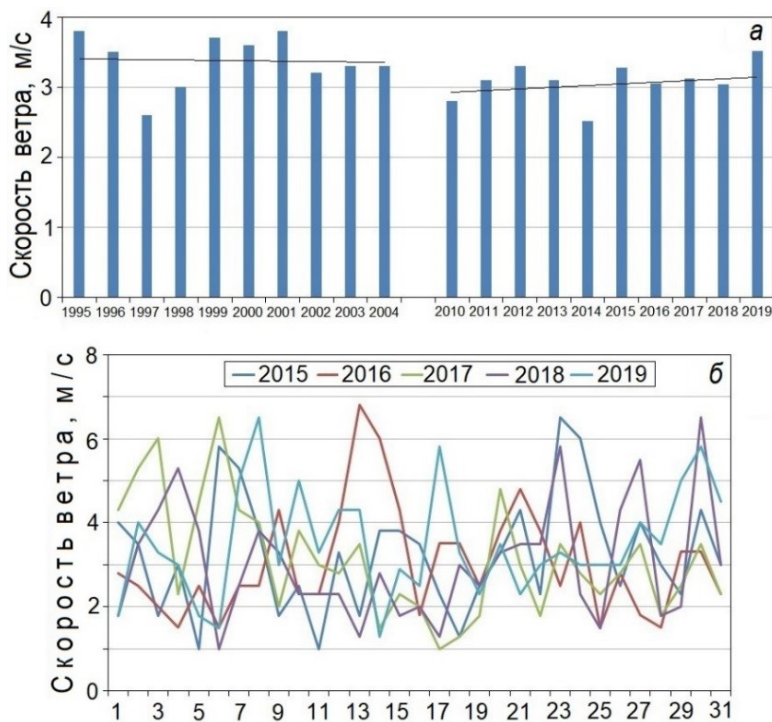
**Рис. 1.3.** Среднемесячные значения влажности воздуха в мае за периоды 1995–2004 и 2010–2019 гг. (а); среднесуточная влажность в мае 2015–2019 гг. (б)

На рисунке 1.4, а показана динамика среднемесячных скоростей ветра. Как видно, данный показатель также достаточно стабилен, хотя несколько снизился за период 2015–2019 гг. относительно десятилетия 1995–2004 гг. Рис. 1.4, б иллюстрирует среднесуточные показатели скорости ветра в мае за период 2015–2019 гг.

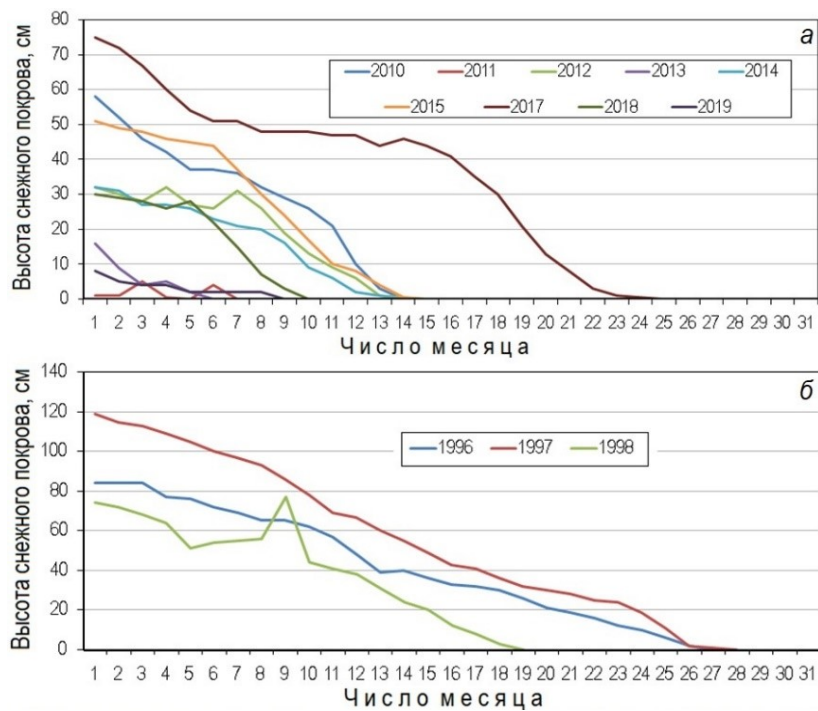
Еще одним важным фактором является изменение высоты снежного покрова в мае. Суточная динамика процесса снеготаяния в период 2015–2019 гг. показана на рис. 1.5, а. Согласно многолетним наблюдениям, окончательный сход снежного покрова происходит в третьей декаде мая. Как видно из графиков, лишь в холодном 2017 году 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. Для сравнения на рис. 1.5, б показана динамика высоты снежного покрова в мае 1996–1998 гг. Очевидно смещение и этого параметра, свидетельствующее о теплом периоде в 2010–2019 гг.

Так, среднемесячные июньские температуры близки к средней многолетней, составляющей +10,7 °С (рис. 1.6, а). При этом температуры июня существенно не отличаются от периода 1995–2004 гг.



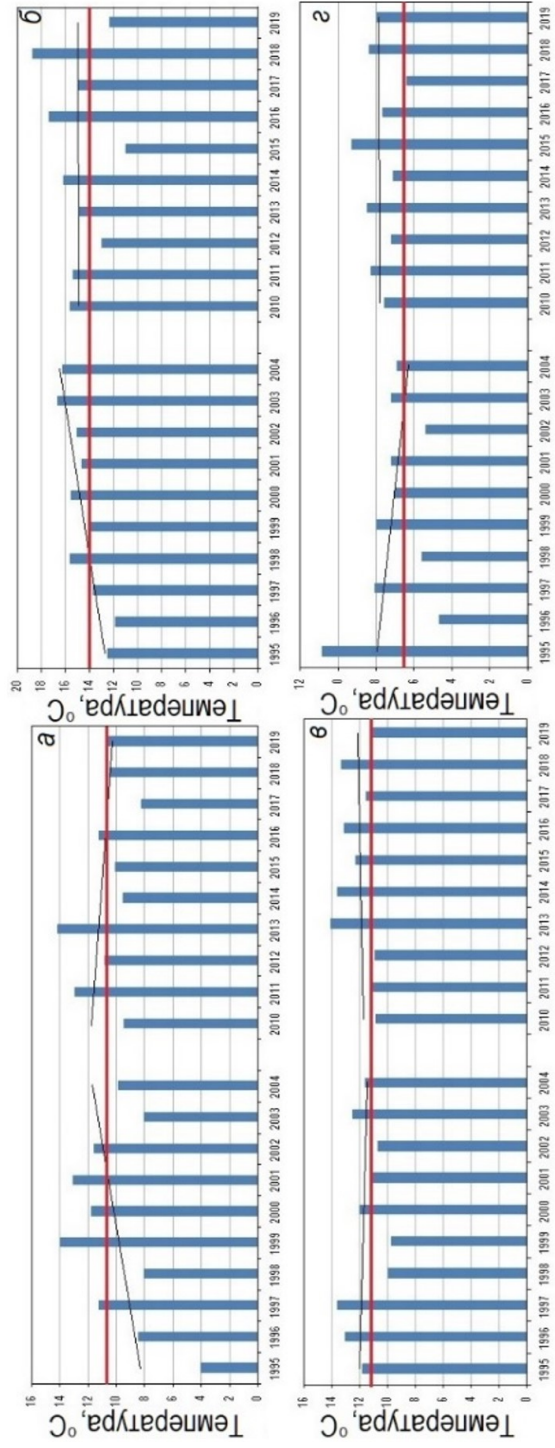


**Рис. 1.4.** Среднемесячная скорость ветра в мае за периоды 1995–2004 и 2010–2019 гг. (а); среднесуточные показатели скорости ветра в мае за период 2015–2019 гг. (б)



**Рис. 1.5.** Изменение высоты снежного покрова в мае за периоды 2010–2019 (а) и 1996–1998 гг. (б)





**Рис. 1.6.** Значения среднемесячных температур летних месяцев и сентября за периоды 1995–2004 и 2010–2019 гг.

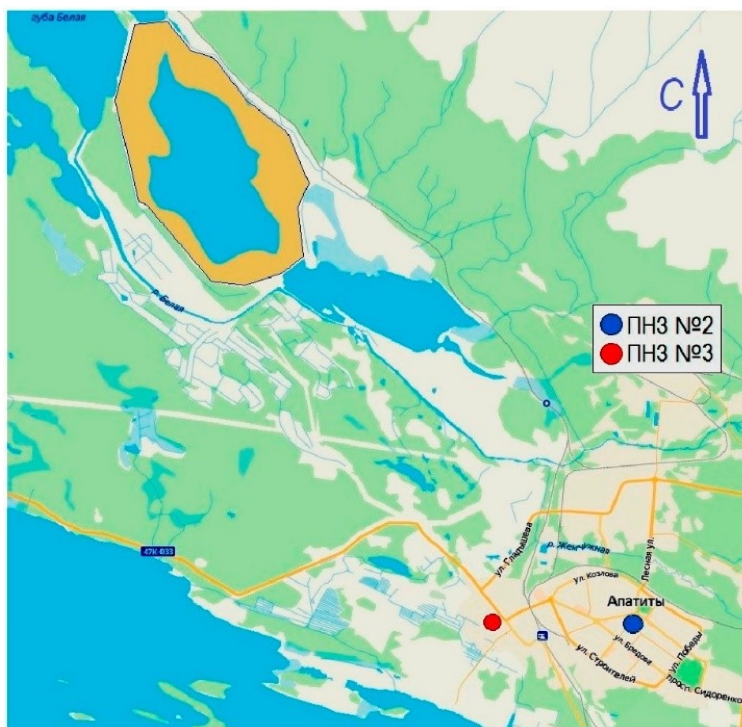
Июльские температуры в 2010–2019 гг. значительно превышали среднюю многолетнюю, равную +14,0 °С, в 2010, 2011, 2014, 2016 и 2018 гг. (см. рис. 1.6, б). Температуры июля также существенно не отличаются от периода 1995–2004 гг.

Среднемесячные температуры августа в 2010–2019 гг. были преимущественно выше средней многолетней, составляющей +11,3 °С (см. рис. 1.6, в).

Те же тенденции характерны для сентябрьских среднемесячных температур (см. рис. 1.6, г).

### **1.2.2. 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 городе Апатиты (рис. 1.7).



**Рис. 1.7.** Схема расположения стационарных постов контроля атмосферного воздуха

Ряд данных покрывает временной промежуток 2001–2019 гг. и насчитывает 110 среднесуточных величин 5 параметров (концентрация в долях ПДК, температура, влажность, скорость / направление ветра). Ряд данных использован для первичного статистического анализа метеорологических факторов и интенсивности пыления хвостохранилища АНОФ-2.

В таблице 1.4 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 ПДК пыли в воздухе города 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.

Таблица 1.4

Количество случаев превышения ПДК пыли в воздухе города Апатиты

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
<i>Всего за месяц</i>	22	22	35	13	1	93

Связь между температурными параметрами теплого периода и интенсивностью пыления хвостов прослеживается. Так, наибольшее число случаев превышения ПДК зафиксировано в 2014 г. — 15 случаев. Из них 8 приходится 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.

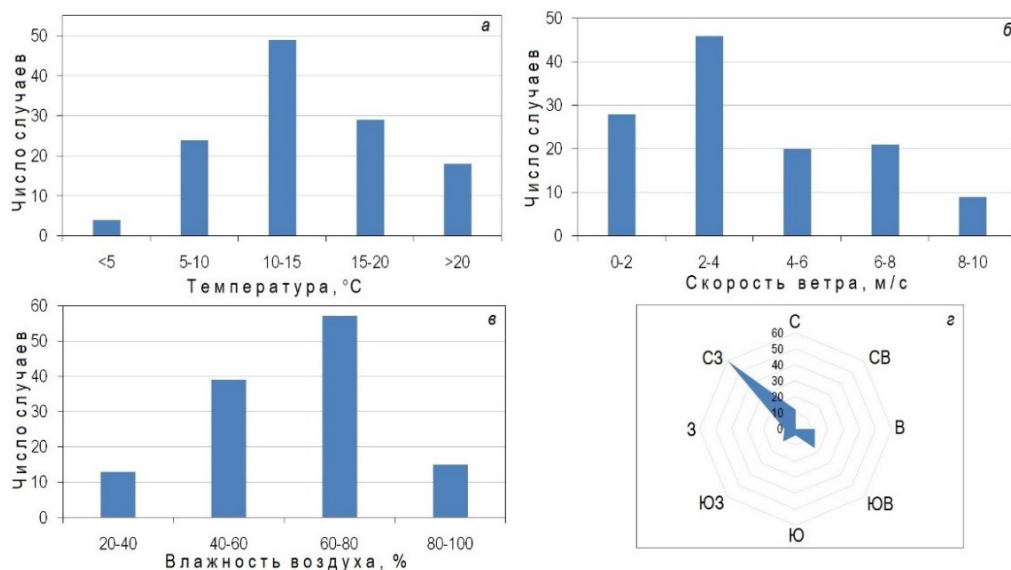
В 2018 г. зафиксировано 5 случаев превышения ПДК в мае, когда среднемесячная температура превысила многолетнюю на 4 °С.

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.

На рисунке 1.8 показано число случаев превышения ПДК при различных среднесуточных метеорологических данных. Как видно, наиболее часто

превышение 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 массового срыва наносимых покрытий и основными источниками выносимой за пределы СЗЗ хвостохранилища мелкой пыли [35; 36].



**Рис. 1.8.** Число случаев превышения ПДК пыли в воздухе города Апатиты при различных среднесуточных метеорологических данных за период 2001–2019 гг.

### ***1.2.3. 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 среднемесячная 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. 1.9. Проход от дамбы хвостохранилища по направлению к прудку оборотной воды и отбор проб 29 апреля 2019 г. были затруднены или невозможны из-за сильной обводненности поверхности

вследствие снеготаяния (рис. 1.10). В последующие дни таких проблем не возникало. На северо-восточном и восточном участках хвостохранилища наблюдался снежный покров. К 13 мая 2019 г. поверхность полностью освободилась от снега.

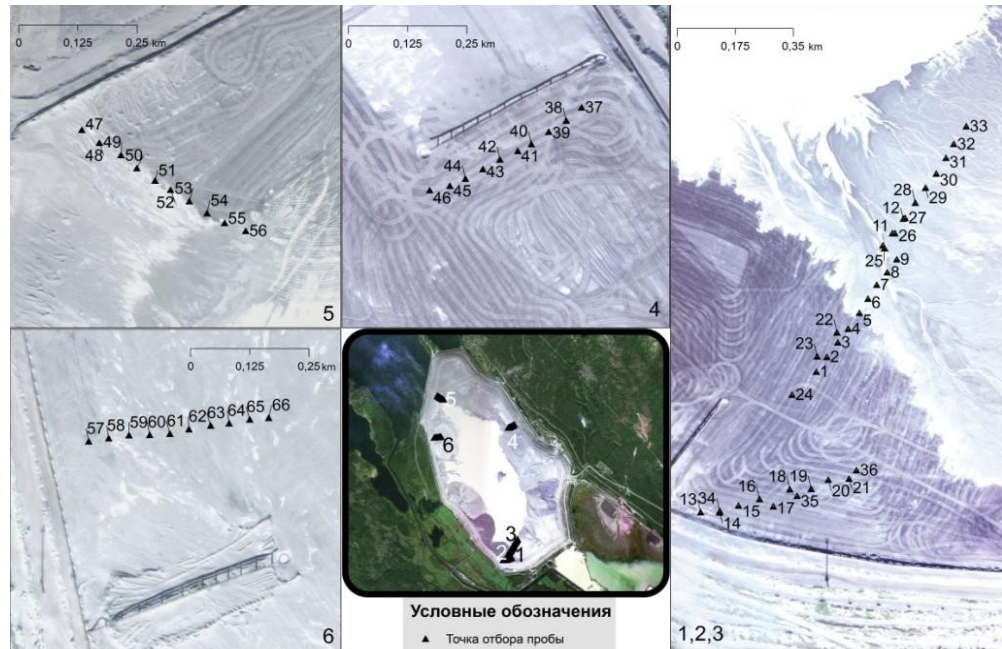


Рис. 1.9. Точки отбора проб хвостов



Рис. 1.10. Заснеженная (слева) и обводненная (справа) поверхность хвостов

Величины влажности и плотности в естественном залегании хвостов обогащения в период снеготаяния и перехода к положительным температурам воздуха приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

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

Номер пробы	Влажность, %	Плотность в естественном залегании, г/см <sup>3</sup>	Примечание
1	2	3	4
Дата отбора проб: 29.04.2019, температура воздуха 0,1 °С			
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	
Дата отбора проб: 06.05.2019, температура воздуха 4,0 °С			
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
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	
25	3,4	1,78	
24	3,7	1,56	
Дата отбора проб: 13.05.2019, температура воздуха 5,3 °С			
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	

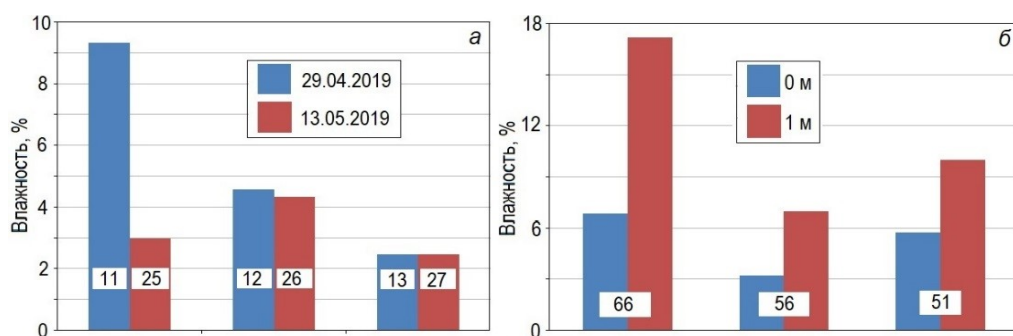


1	2	3	4
31	3,8	1,64	
32	5,9	1,47	
33	5,2	1,59	
34	1,8	1,59	Мерзлый грунт на глубине 30 см
35	16,4	2,11	
36	3,7	1,67	
Дата отбора проб: 21.05.2019, температура воздуха 8,0 °С			
37	3,63	1,23	
38	2,92	1,68	
39	3,41	1,68	
40	2,88	1,61	
40*	5,89	1,61	Мерзлый грунт
41	3,09	1,76	
42	3,06	1,59	
43	3,73	1,70	
44	2,60	1,60	
45	4,20	1,78	
46	3,23	1,56	
46*	7,03	1,64	
Дата отбора проб: 21.05.2019, температура воздуха 8,0 °С			
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	
Дата отбора проб: 21.05.2019, температура воздуха 8,0 °С			
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

\* Пробы отобраны с глубины 1 м.

29 апреля, 6 и 13 мая 2019 г. в ряде точек наблюдался смерзшийся грунт на поверхности хвостов и ниже. 21 мая 2019 г. смерзшийся грунт отмечен в ряде точек при отборе проб хвостов с глубины 1 м.

На рисунке 1.11, а приведено сопоставление значений влажности проб, отобранных 29 апреля и 13 мая 2019 г. на одной и той же площади южной части хвостохранилища. Ввиду того что в данный период наблюдалось минимальное количество атмосферных осадков, а также 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.



**Рис. 1.11.** Значения 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

Сопоставление влажности проб хвостов с поверхности и на глубине 1 м, отобранных 21 мая 2019 г. в северной, западной и восточной частях хвостохранилища, представлено на рис. 1.11, 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.

Таким образом, отмеченные выше наблюдающиеся в последние десятилетия тенденции изменения климата в районе расположения хвостохранилища свидетельствуют об увеличении продолжительности периода возможного интенсивного пыления пляжей и откосов хвостов при наступлении неблагоприятных метеорологических условий и, следовательно, частоты случаев превышения ПДК в атмосфере города Апатиты. Эти обстоятельства, с одной стороны, обуславливают целесообразность ведения мониторинга при наступлении неблагоприятных метеоусловий с отбором разовых проб воздуха, определений направления и скорости ветра, температуры и влажности воздуха непосредственно на хвостохранилище. С другой стороны, необходимы поиск и внедрение новых технологий для предотвращения пылеобразования. В следующем разделе рассмотрим основные методы, применяемые для рекультивации и консервации промышленных отвалов.



### 1.3. Обзор методов снижения пыления отвалов горнопромышленных отходов

В связи с высокой экологической опасностью эмиссии минеральных пылевых частиц активно разрабатываются методы рекультивации и консервации промышленных отвалов, среди которых могут быть выделены: механический, физико-химический и биологический [37; 38]. Механический метод консервации промышленного отвала основан на засыпке его поверхности инертным материалом — щебнем или гравием толщиной 0,15–0,20 м. Физико-химический метод направлен на создание на поверхности промышленного отвала противозерозионного покрытия путем обработки ее вяжущими составами. Он рекомендуется на действующих хвостохранилищах для кратковременного закрепления пылящих участков. Биологический метод — создание почвенного и растительного покрова на нарушенной территории путем нанесения на ее поверхность слоя плодородного грунта различной мощности (от 2 до 40 см и более) с последующим посевом или посадкой растений [37; 39]. Биологическая рекультивация применяется на законсервированных хвостохранилищах или для участков, выведенных из эксплуатации, например дамб обвалования, откосов. В условиях Мурманской области широко используется аборигенный вид — волоснец песчаный [40]. Разработана технология, обеспечивающая восстановление нарушенных земель в соответствии с концепцией естественного почвообразования формированием биологически активной среды в результате создания сеяного фитоценоза без нанесения плодородного слоя под полимерным покрытием [41].

Авторы [42] предлагают следующую классификацию способов закрепления поверхности пляжей: аэродинамический, гидротехнический, технологический, механический, биологический и химический.

Аэродинамический способ закрепления заключается в изменении аэродинамического режима хвостохранилища таким образом, чтобы скорость ветрового потока не смогла вызвать перехода частиц в аэрозольное состояние, например, устройством лесозащитных полос, защитных экранов и др. [42].

Гидротехнический способ предполагает постоянное увлажнение поверхности пляжа оросительными установками или дождевальными машинами с использованием воды из пруда-отстойника либо за счет изменения технологической схемы сброса пульпы [42]. На период консервации защиту хвостов от пыления можно обеспечить поддержанием постоянного уровня воды в хвостохранилище, при котором происходит затопление большей части поверхности пляжа. Следует отметить, что данное мероприятие достаточно энергоемкое и требует повышенного расхода воды.

На хвостохранилище Лебединского ГОКа для борьбы с пылением отходов обогащения применяют метод, основанный на орошении водой с помощью вертикальной гидравлической завесы, перехватывающей взвешенные в воздухе частицы пыли [42]. Для эффективной работы указанных конструкций необходимо обеспечивать высокую высоту подъема капель воды в воздушной

среде. С этой целью применяют сопла, устраивают высоконапорные системы подачи воды, утяжеляют капли введением специальных добавок и т. д. Применение метода в жаркую погоду малоэффективно.

На Михайловском ГОКе разработана и с 2000 г. внедряется технология круглогодичного производства гидромеханизированных работ по надводной укладке хвостов на пляжи хвостохранилища, чтобы использовать их для наращивания ограждающих дамб [43]. Проблема пыления решается подъемом уровня воды.

Технологическое закрепление предполагает добавление в поток пульпы какого-либо реагента, способного связывать твердые частицы после их отложения и закреплять хвосты в общей массе [44; 45]. Этот способ можно считать разновидностью химических методов. Так, в работе [46] обоснована возможность применения комплексных связующих веществ для закрепления поверхности сухих пляжей, распределяемых в хвостовой пульпе и аккумулируемых при намыве на площади наклонных сухих пляжей. Основа состава содержит глину вскрышных пород Стойленского ГОКа, скрепленную в процессе мелкодисперсного помола с целлюлозным составом — бумажной макулатурой — в массовой пропорции: 1 часть бумажных отходов и 7–10 частей глины.

Преимуществом технологического закрепления является отсутствие необходимости применения машин и механизмов для подготовки поверхности и нанесения закрепителей. Однако при его использовании часть реагента остается в отстойном пруде. Кроме того, закрепление всего объема хвостов может существенно затруднить дальнейшую переработку складываемых отходов [42; 46].

Если планируется доизвлечение компонентов из материалов, сложенных в отвал, хвосто- или шламоохранилище, предпочтительны физико-химические методы закрепления пылящих поверхностей в целях соблюдения санитарно-гигиенических норм. Химические закрепители пылящих поверхностей должны удовлетворять следующим требованиям: исключать ветровую эрозию; прочность закрепленной поверхности должна восстанавливаться после намывания по мере высыхания до величины, близкой к первоначальной; расход закрепителя должен быть минимальным, технология закрепления простой и предусматривать полную механизацию работ; выбранный закрепитель не должен загрязнять близлежащие водоемы, быть токсичным и коррозионно опасным, дорогостоящим и дефицитным, желательно, чтобы он был биологически разлагаемым [37].

Широко применяются методы цементации, силикатизации, битумизации. Исследования, проведенные еще в СССР Всесоюзным научно-исследовательским институтом безопасности труда в горнорудной промышленности (ВНИИБТГ), город Кривой Рог, показали, что для закрепления сухих пляжей может быть рекомендована битумная эмульсия 20 %-й концентрации с расходом 1,1–1,2 л/м<sup>2</sup>, а для закрепления откосов дамб и плотин — 30 %-я с расходом 1,5 л/м<sup>2</sup>. Для борьбы с ветровой эрозией широко применяются водорастворимые полимеры К-4, К-6, ПАА (полиакриламид). ВНИИБТГ для промышленных испытаний рекомендованы следующие закрепители пылящих поверхностей: госсиполовая эмульсия 20 %-й концентрации, нерозин, универсин (все с расходом 1 кг/м<sup>2</sup>) [37].

Рассмотрим некоторые предложенные недавно связующие реагенты и способы закрепления пылящих поверхностей хвостовых отвалов.

Авторами [47] разработан обеспыливающий состав, содержащий компоненты в следующих соотношениях, мас. %: сульфатное мыло или омыленный талловый пек 2–10, полиакриламид 0,05–0,20, вода остальное. В результате обеспечивается водостойкость покрытия на пылящих поверхностях и снижение расхода реагентов.

Запатентован экологически безопасный состав, содержащий акриловую дисперсию (50–60 %) 1–28 %, сополимер ацетата с виниловыми эфирами карбоновых кислот 2–10 %, олигомер полиэтилена 1–5 %, загуститель оксиэтилцеллюлоза 0,2–0,8 %, поверхностно-активное вещество алкилсульфат 0,8–1,8 %, вода остальное [48]. Применение состава обеспечивает повышение прочности, устойчивости к ветровой эрозии, долговечности.

Авторами [49] предложен состав, включающий 10–15 % пластификатора адипинового щелочного (отходов производства капролактама), 15–20 % келловейской порошкообразной глины, попутно извлекаемой с железной рудой, и технической воды. Расход приготовленного раствора от 3–4 л/м<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности обеспечивает повышение прочности и долговечности получаемых покрытий на пылящих поверхностях.

В качестве закрепляющего реагента предложен поливинилбутираль — высокомолекулярное соединение, которое смешивают с песком хвостохранилища [50; 51]. После нанесения смеси ее нагревают до температуры плавления поливинилбутираля. В результате такой обработки на пылящей поверхности образуется прочная стекловидная пленка. Полученное покрытие является атмосфероустойчивым, не разрушается под действием ветровых нагрузок, осадков, низких и высоких температур.

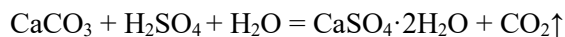
Согласно патенту [52], обеспыливание осуществляют водным раствором композиции, включающей 10–40 мас. % фосфолипидов, 20–80 мас. % ПАВ и около 1–20 мас. % присадки, выбранной из группы, состоящей из многоатомных спиртов, мочевины, моносахарида, полисахарида, полиакриловой кислоты, полиэтиленгликоля, полисилоксана, лигносульфонатов, микрокристаллического воска и их смесей.

Предложен способ предотвращения пыления гидроотвалов, заключающийся во введении в хвостовую пульпу совместно вяжущего материала и флокулянта [53]. В качестве вяжущего материала предлагается использовать технические лигносульфонаты в количестве 0,5–0,8 % (к твердому пульпы), а в качестве флокулянта — полиакриламид в количестве 0,002–0,005 %. Оба реагента предлагается вводить в пульпу в сухом виде в последние сутки намыва очередной карты хвостохранилища. При этом противоэрозионный слой хвостовых отложений должен быть мощностью не менее 3,0 см.

Ф. И. Лобановым с соавторами запатентован способ, согласно которому на пылящую поверхность последовательно наносят водный раствор полиакрилата натрия и водный раствор сополимера акриламида с производными акриловой кислоты [54]. В предпочтительном варианте реализации используют водный раствор полиакрилата натрия или калия концентрацией не менее 1 % в количестве 2,0–2,5 г/м<sup>2</sup> площади, также водный раствор сополимера акриламида с производными акриловой кислоты концентрацией не менее 0,5 % в количестве 1,0–2,0 г/м<sup>2</sup> площади.

Для возможности регулирования свойств закрепляющего слоя в способе [55; 56] используются неорганические реагенты. На пылящую поверхность наносится меловая суспензия с последующей обработкой ее разбавленным

раствором серной кислоты. С целью обеспечения минимального воздействия на окружающую среду и регулирования прочности закрепляемой поверхности, обработка поверхности раствором серной кислоты производится в стехиометрическом отношении к внесенному мелу в виде водного раствора с концентрацией от 3 до 15 % (по массе). По реакции



образуется поверхностный слой, по составу близкий к природному гипсу. При этом толщина и сроки твердения напрямую зависят от количества вносимого мела.

Эффективным покрытием является образование нетоксичной корки на поверхности материала [38]. Оно может быть получено путем смешения бентонитовой глины с грунтом или нанесения полимера гуаровой камеди на поверхность хвостов.

Пылеподавление на действующих хвостохранилищах ГОКов предложено проводить раствором природного бишофита (РПБ) путем смачивания поверхности хвостов гигроскопическим хлоридным раствором [57]. РПБ ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) имеет четвертый класс опасности, не горюч, не взрывоопасен, хорошо растворяется в воде. Для его транспортирования используются обычные железнодорожные цистерны (для транспортирования латексов при температурах меньше  $+10$  °С цистерна должна быть оборудована подогревом или термоизоляцией), любая специальная подготовка перед нанесением (разогрев и т. п.) отсутствует. Полученные результаты показали, что значения концентрации пыли в воздухе при закреплении хвостов РПБ не превышают ПДК в период до 90 дней даже при скорости ветра 15 м/с. Оптимальными являются затраты РПБ 1,5–2 л/м<sup>2</sup>. РПБ имеет низкую температуру замерзания ( $-35$  °С) и может использоваться для смачивания хвостов в любое время года [57].

Закрепление пылящих поверхностей грунтовыми смесями в виде окатышей заключалось в укладке закрепляющего материала шарообразной формы по пылящей поверхности, при этом окатыши изготавливались из глины, соломы (камыш), древесных опилок, скрепляющих добавок (ГИПАН, лигносульфонаты) и воды при следующих соотношениях ингредиентов, % по массе: глина — 68–75; дробленая солома, камыш или опилки — 3–8; лигносульфонаты или ГИПАН — 0,3–1; семена растений, вода — остальное [57]. Расход окатышей составлял 8–10 кг на 1 м<sup>2</sup>.

Биологический способ закрепления пылящих поверхностей действующих и законсервированных хвостохранилищ гидromеталлургических заводов заключается в укладке закрепляющего материала в виде глинистого раствора с добавками таких ингредиентов, как глина, чернозем, опилки, лигносульфонаты или ГИПАН, вода, удобрения, семена растений [57]. Расход раствора — 12–15 л на 1 м<sup>2</sup>.

Показано, что внедрение разработанных технологий, средств и способов борьбы с пылением на действующих и законсервированных хвостохранилищах позволит уменьшить уровни загрязнения воздуха рабочей зоны пылью, улучшить условия работы персонала и экологическую обстановку в районах складирования отходов гидromеталлургической переработки руд (город Желтые Воды, Украина) [58].

Представляет интерес еще одно предложение, сочетающее физико-химический и биологический методы [59]. На пылящие поверхности наносится смесь, получаемая соединением органических остатков естественного происхождения и высокомолекулярного соединения в соотношении 125 : 1, с ее одновременным естественным или искусственным увлажнением и внесением семян трав. Таким образом, создается основа для формирования прочного задернованного биопродуктивного слоя.

Для закрепления пылящих поверхностей техногенных массивов предложено использовать органическое, экологически чистое биоактивное вещество на основе сапропеля с помощью разработанной модульной установки для связывания пыли [60]. Экологическое действие сапропеля и его биоэффективность определены применительно к процессам биологической рекультивации. Сапропель при концентрации от 6 до 15 % повышает всхожесть семян, улучшает рост корешков и надземной части проростков. Показатели роста растений на почве, содержащей 9 % сапропеля, в 1,5–2 раза выше, чем в контрольной группе. Эффективность подавления пыли, сдуваемой с поверхности техногенных массивов, повышается, по сравнению с орошением водой, с 60 до 85 %. Минимальный срок укоренения травяной растительности с образованием сплошного дернового покрытия составляет 1–1,5 года против 3 лет при биологической рекультивации. Разработана схема установки для связывания аэрозолей и аэрогелей пыли на основе снегогенератора [61]. Технический результат обеспечивается дополнительной емкостью, заполненной биоклеящим раствором, и вводом системы подвода раствора к форсункам-диспергаторам.

Ряд технических решений посвящен разработке способов и устройств для нанесения связующих реагентов.

Так, запатентовано устройство для закрепления пылящих поверхностей [62]. Оно содержит раму, емкость с трубопроводами и соплами, средство для рыхления в виде рядов вогнутых дисков, установленных на осях с возможностью изменения угла осей к направлению движения устройства. Через сопла по трубопроводам от емкости подаются вода и реагент, при этом происходит рыхление поверхностного слоя и перемешивание его с водой и реагентом с дальнейшей укаткой почвы катком.

Авторами [63] предложено устройство, содержащее самоходное транспортное средство, например, понтонное плавсредство, на палубе которого установлены насос, емкость для реагента, гидромонитор с возможностью поворота в горизонтальной и вертикальной плоскостях, узел с рабочим органом для прокладки канала в береговой полосе и автономная электростанция, к которой подключены приводы всех механизмов. Транспортное плавсредство изначально устанавливается на зеркале воды хвостохранилища. Затем направляют к берегу в сектор орошения, где рабочий орган прокладывает в береговой полосе канал, по которому плавсредство продвигается. В гидромонитор закачивают насосом воду из хвостохранилища, добавляют реагент из емкости через дозатор и орошают пылящий участок.

Автором [17] разработан способ селективного закрепления открытых пляжей и бортов дамбы намывных техногенных массивов связующим реагентом с использованием мобильного комплекса оперативного пылеподавления на базе судна на воздушной подушке. Это обеспечивает закрепление всей

поверхности намывного массива, в том числе тех намывных пляжей, которые не прошли предварительную усадку и обладают слабой несущей способностью, а также возможность своевременного реагирования и оперативного пылеподавления в зонах интенсивного пыления независимо от метеорологических условий и состояния поверхности хвостохранилища в момент проведения работ.

В исследовании А. В. Немировского разработано технологическое мероприятие для нанесения на поверхность пылящего пляжа комплексных связующих веществ с использованием напорной струи воды и инжектора, обеспечивающих разброс связующих на расстояние 10–15 м от заградительной дамбы [46]. Обосновано применение минеральных связующих составов в виде карбонатов кальция, магния и глинистых пород, содержащихся в примесях исходной железной руды и хвостовой пульпе в количестве около 5 %, при их аккумуляции в процессе намыва вдоль уклонной приграничной поверхности пляжа. Для повышения устойчивости намывного хвостохранилища к ветровым нагрузкам предусматривается удлинение на 50 м распределительных пульповодов в глубину пруда-отстойника с возможностью формирования уклонных пляжей для накопления в приконтурной зоне минеральных связующих веществ. Данные рекомендации приняты к использованию на Стойленском ГОКе.

В районах с продолжительными отрицательными температурами воздуха на процесс пылеобразования влияют такие специфические факторы, как сезонное промерзание-оттаивание массива складированных отходов, сублимация и зимняя ветровая эрозия [64]. На открытых поверхностях надводных пляжей развивается активное пыление, сопровождающееся загрязнением атмосферы и поверхности почвы на прилегающей к отвалу территории, с токсическим воздействием на растительность и живые организмы. В то же время опыт эксплуатации отвалов и других промышленных накопителей в суровых природных условиях Центральной Сибири показывает возможность эффективного использования криогенных процессов для управления пылеобразованием.

Автором [64] разработана технология пылеподавления, включающая следующие основные этапы: намыв надводного пляжа шириной 25–50 м (с апреля по сентябрь); отсыпка временной отделительной дамбы вдоль уреза воды высотой до 1 м из золошлаков, отбираемых на других участках без нарушения нормальной эксплуатации золоотвала (сентябрь); отсыпка из золошлаков защитной призмы, исключающей прямой контакт с дамбой воды на затапливаемом пляже (сентябрь); установка насоса и дополнительного оборудования для перекачки воды из отстойного пруда на затапливаемый пляж (сентябрь); промораживание участка пляжа и последующее намораживание слоя льда (ноябрь-февраль); контролируемое оттаивание слоя льда и поверхностного мерзлого слоя золошлаков, сопровождающееся увлажнением пляжа. Увлажненный поверхностный слой предохраняет пляж от пыления в период наиболее интенсивного развития этого процесса. При создании ледяной теплоизоляции на поверхности промороженного пляжа оттаивание двухслойного мерзлого массива замедляется и значительно увеличивается продолжительность увлажнения пляжа (в условиях Центральной Сибири это апрель-май). При соблюдении основных этапов предлагаемой технологии становится возможным полное прекращение

пыления надводных пляжей золоотвалов в период наиболее активного развития процессов ветровой эрозии. Данная технология позволяет снизить фильтрационные нагрузки на ограждающую дамбу и тем самым обеспечить устойчивость сооружения.

Представленные технические решения, посвященные разработке способов и устройств для нанесения связующих реагентов, отличаются многообразием и адаптированы к локальным условиям конкретного хвостового хозяйства. Технические решения предусматривают как непрерывное орошение водой с помощью высоконапорных систем, так и нанесение связующих реагентов с помощью специальной техники по всей поверхности пылящих отвалов. Основным критерий успешности пылеподавления — снижение концентрации пыли в атмосферном воздухе до уровня ниже ПДК при минимальных экономических затратах [65].

В следующем разделе рассмотрим результаты исследований связующих реагентов для закрепления пылящей поверхности хвостохранилища АНОФ-2 КФ АО «Апатит».

#### **1.4. Исследования связующих реагентов для закрепления пылящей поверхности хвостохранилища АНОФ-2 Кировского филиала АО «Апатит»**

Закрепление хвостов АНОФ-2 КФ АО «Апатит» с 2003 г. осуществляли битумной эмульсией ЭБА-3. Для пылеподавления использовался рабочий раствор: товарная битумная эмульсия с разбавлением горячей водой в соотношении от 1 : 2 до 1 : 10. 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. Ее существенным преимуществом является долговечность, составляющая 4–6 месяцев, что позволяет ее использовать для закрепления не только намывных пляжей, но и поверхностей откосов и оснований дамб. Однако при неблагоприятных метеорологических условиях (скорость ветра  $\geq 10$  м/с) под действием ветровой эрозии поверхностная пленка разрушалась. Кроме того, для битума характерна низкая растворимость в холодной воде и, как следствие, недостаточная технологичность процесса обработки хвостов. Наблюдались единичные случаи плохой адгезии рабочего раствора к поверхности пляжа при неизменности его качества. Причина этого в наличии шламовых частиц намывного материала, который образуется в местах вытекания струи пульпы. Именно эти участки не выдерживали ветровой нагрузки и являлись центрами массовых срывов наносимых покрытий и основными источниками выносимой за пределы СЗЗ хвостохранилища мелкодисперсной пыли [35; 66].

В этой связи КФ АО «Апатит» проведен поиск и испытание новых связующих реагентов. Так, на территории хвостохранилища АНОФ-2 были пробно испытаны реагенты Alcotac, Dustbind и DS1Floset S44. При участии сотрудников ИППЭС КНЦ РАН был выполнен мониторинг в натуральных условиях и лабораторные исследования свойств покрытий, образованных связующими реагентами [66]. Рассмотрим результаты этих исследований.

### 1.4.1. Исследования инженерно-геологических свойств хвостов на участках нанесения реагентов

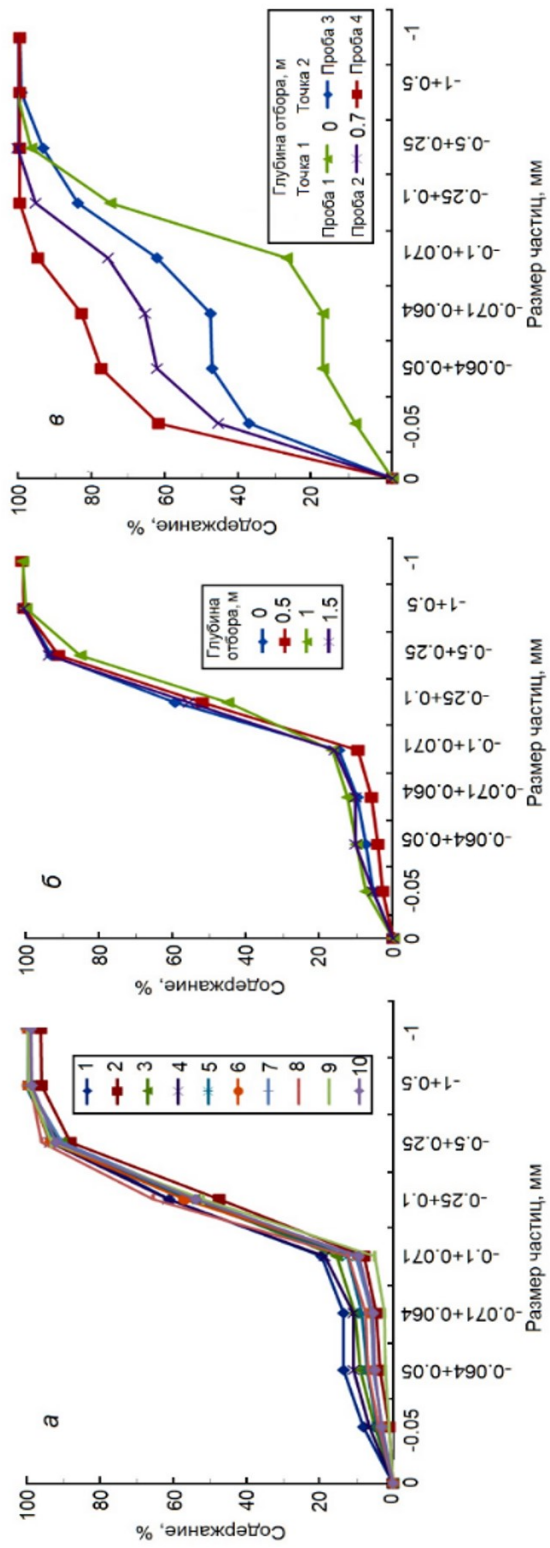
На участках будущего применения связующих реагентов предварительно были выполнены исследования некоторых инженерно-геологических свойств хвостов. Отобрано 10 проб хвостов с поверхности, а также 4 пробы в шурфе с шагом 0,5 м на глубину 1,5 м. В двух точках вблизи фронта намыва были отобраны пробы с поверхности и глубины 0,7 м (рис. 1.12, а). Пробы хвостов с ненарушенной структурой отбирали методом режущего кольца. Определение их основных физических свойств проводили согласно ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». Участки нанесения связующих реагентов представлены на рис. 1.12, б.



**Рис. 1.12.** Точки отбора проб хвостов (а), экспериментальная площадка с участками, обработанными связующими реагентами (б). Точки отбора проб хвостов с поверхности (1), хвостов в шурфе на 1,5 м с шагом 0,5 м (2), недавно намывных хвостов с поверхности и глубины 0,7 м (3)

На рисунке 1.13 представлены кумулятивные кривые гранулометрического состава хвостов. Как видно из данных рис. 1.13, а, гранулометрический состав поверхностного слоя хвостов обогащения на участке применения реагентов достаточно однороден. Хвосты характеризуются преобладанием фракций с размером зерен  $-0,5 + 0,25$  мм (29,8–41,5 %) и  $-0,25 + 0,1$  мм (38,7–53,2 %). В сумме на эти фракции приходится 70–80 % массы хвостов опытного участка. Таким образом, хвосты поверхностного слоя участка применения связующих реагентов по литологической классификации могут быть отнесены к мелко- и среднезернистым пескам [67]. Если сопоставить эти значения с данными по гранулометрическому составу пульпы перед подачей на хвостохранилище, то очевидно, что хвосты на участке применения реагентов характеризуются меньшим выходом мелких классов. Это объясняется гидравлической дифференциацией потока хвостовой пульпы, а также тем, что при высыхании хвостов мелкодисперсные частицы подверглись пылеуносу с поверхности и частично перешли в нижние горизонты вследствие суффозии. Такое же заключение можно сделать исходя из анализа кумулятивных кривых гранулометрического состава хвостов обогащения шурфа (рис. 1.13, б).





**Рис. 1.13.** Кумулятивные кривые гранулометрического состава хвостов обогащения на участке будущего применения реагентов: пробы поверхностного слоя (а) и пробы шурфа (б). Гранулометрический состав свежележженных хвостов обогащения (в)

Рисунок 1.13, в иллюстрирует гранулометрический состав хвостов обогащения текущего производства поверхности и глубины 0,7 м, при этом пробы отобраны с одинакового расстояния до уреза воды, а в точке 1 намыв произведен раньше, чем в точке 2. Как видно, для свеженамытых хвостов характерно отличие гранулометрического состава в зависимости от глубины отбора пробы. Если пробы с глубины 0,7 м характеризуются преобладанием фракций  $-0,05$  мм (46,3 и 62,3 % для проб 2 и 4 соответственно) и  $-0,064 + 0,05$  мм (16,3 и 15,3 %), то для пробы 1 характерен наибольший выход классов  $-0,5 + 0,25$  мм (21,1 %) и  $-0,25 + 0,1$  мм (47,0 %). В пробе 3 преобладает класс  $-0,05$  мм (38,3 %), но по сравнению с пробой 4 увеличивается выход класса  $-0,25 + 0,1$  мм. Очевидно, это можно объяснить суффозионными явлениями: шламовые частицы проникают в нижние слои хвостов при движении растворов по мере высыхания хвостов. В этой связи гранулометрический состав хвостов в точке 1 с поверхности более соответствует составу хвостов участка применения связующих реагентов.

Плотность хвостов поверхностного слоя в естественном залегании варьирует незначительно и составляет в среднем  $1,65$  г/см<sup>3</sup>. Достаточно выдержаны и значения плотностей хвостов в естественном залегании и в сухом состоянии в шурфе ( $1,58-1,68$  г/см<sup>3</sup>), а также свежеложенных хвостов ( $1,55-1,66$  г/см<sup>3</sup>).

Анализ величины влажности хвостов в шурфе показал, что она практически одинакова (7,0–7,4 %) и несколько снижается на глубине 1,5 м (4,43 %). Для свеженамытых хвостов характерна значительно большая величина влажности хвостов на глубине 0,7 м (проба 2 — 10,5 %, проба 4 — 23,8 %), чем на поверхности (проба 1 — 7,0 %, проба 3 — 11,7 %). Распределение величин влажности свежеложенных хвостов по глубине подтверждает протекание суффозионных процессов при высыхании и свидетельствует о потенциальной возможности пыления хвостов уже на ранних стадиях хранения после их намыва.

Истинная плотность хвостов варьирует в диапазоне от 2,76 до 2,88 г/см<sup>3</sup>. По величине пористости хвосты соответствуют пескам в условиях естественного залегания (пористость 25–45 %), пористость проб свежеложенных хвостов соответствует глинистым грунтам в условиях естественного залегания (пористость 30–60 %). Судя по значениям коэффициента пористости (0,76–1,31), все исследованные пробы хвостов по плотности сложения относятся к рыхлым грунтам [67].

Химический состав усредненной пробы хвостов, отобранных с поверхности экспериментального участка, представлен в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Химический состав хвостов обогащения

Содержание, %												
SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	ппп	Σ
39,04	2,42	23,10	6,13	3,20	5,00	1,09	11,94	5,00	1,21	0,15	1,10	99,38

Преобладающим минералом в образцах является нефелин, содержание которого превышает 50 %, а также эгирин, полевые шпаты, вторичные минералы по нефелину, апатит, титанит, магнетит, слюды.

#### **1.4.2. Мониторинг состояния закрепленной поверхности хвостохранилища на участках применения связующих реагентов**

Общая площадь экспериментальной площадки, предоставленной КФ АО «Апатит» на хвостохранилище фабрики АНОФ-2 для исследования закрепления пылящих хвостов связующими реагентами Alcotac DS1, Dustbind и Floset S44 трех фирм поставщиков, составила 8 га (см. рис. 1.12, б). При выполнении эксперимента старались не наносить раствор в условиях дождя, не допускать движения техники по недавно обработанной поверхности. Погодные условия в дни проведения работ были благоприятными: температура воздуха 10–21 °С, скорость ветра 1–5 м/с, без осадков. Нанесение раствора на поверхность хвостов осуществляли с использованием вездеходной техники (рис. 1.14, а).



**Рис. 1.14.** Нанесение раствора реагента на поверхность хвостов (а), покрытие из связанных песков (б), сформировавшаяся «корка» на поверхности хвостов (в), граница между закрепленной экспериментальной площадкой и соседним необработанным участком хвостохранилища (г), «корка» на поверхности хвостов в зимний период (д)

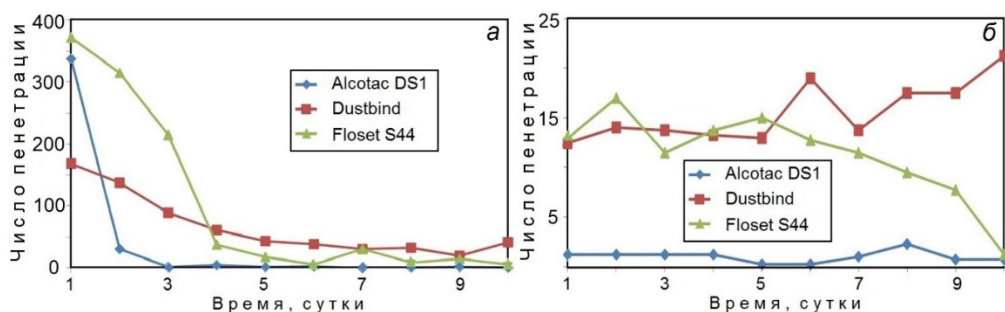
Спустя неделю после обработки реагентами на всей площади участка было образовано однородное покрытие из связанных песков (см. рис. 1.14, б). Затвердевшая поверхность образца позволяла вырезать ножом карту толщиной в 3–5 мм (см. рис. 1.14, в). На рис. 1.14, г представлена поверхность хвостов спустя одну неделю после закрепления, где четко видна граница между закрепленной экспериментальной площадкой и соседним необработанным участком хвостохранилища. Контроль закрепленной поверхности осуществляли в два этапа — через неделю после нанесения состава и в начале холодного периода. В конце октября, когда наступили устойчивые отрицательные среднесуточные температуры воздуха и выпал снег, было произведено опробование закрепленных площадей. На рис. 1.14, д представлен образец «корки» на поверхности, закрепленной реагентами. Образцы достаточно прочные в естественных условиях при температуре воздуха -4 °С.

### 1.4.3. Определение прочностных и фильтрационных характеристик покрытий связующих реагентов

Для лабораторных исследований были приготовлены керны хвостов обогащения, отобранных с опытного участка хвостохранилища, площадь поверхности составляла 16,62 см<sup>2</sup>. Согласно предоставленным производителями инструкциям приготовлены связующие реагенты с учетом их удельного расхода на обрабатываемую поверхность 30 г/м<sup>2</sup>: Alcotac DS1 — 5 %-й водный раствор, Floset S44 — 3 %-й водный раствор, Dustbind — 2 %-й водный раствор. Раствор наносили на поверхность керна хвостов с помощью пульверизатора, при этом контролировали расход распыляемого раствора. Толщина защитного слоя реагентов составила (мм): Alcotac DS1 — 10; Floset S44 — 1,5; Dustbind — 5,5.

Измерение прочности покрытия обработанных связующими реагентами хвостов производили с помощью пенетрометра М-984 ПК. Масса плунжера с иглой составляла 50 г. Для каждой пробы измерение повторяли трижды, вычисляли среднее значение глубины погружения иглы, которое принимали обратно пропорциональным условной прочности.

Кинетику набора прочности защитными покрытиями измеряли в течение 10 суток (рис. 1.15, а). Как видно, число пенетрации уменьшается с течением времени. Это говорит об образовании на поверхности хвостов полимерного защитного слоя. Наиболее прочным является покрытие, образованное реагентом Alcotac DS1. Этот же реагент демонстрирует наиболее быстрый набор прочности. Реагент Dustbind набирает прочность плавно, однако для него характерна наибольшая прочность через 1 сутки после нанесения слоя. Реагент Floset S44 демонстрирует промежуточные прочностные характеристики начиная с 4 суток после нанесения, однако набор прочности проходил медленно.



**Рис. 1.15.** Изменение условной прочности покрытия в течение 10 суток с момента нанесения раствора реагента (а) и в течение 10 суток (циклов) замораживания-оттаивания (б)

С учетом климатических характеристик района размещения хвостохранилища АНОФ-2 и результатов мониторинга к покрытиям, образованным связующими реагентами, предъявляются требования к устойчивости при переходе температуры воздуха к отрицательным значениям и обратно. В мае, первых числах июня и сентябре в районе хвостохранилища нередко наблюдаются заморозки. В этой связи была проверена устойчивость покрытий после их обработки в режиме замораживание-оттаивание. Для этого покрытия после набора ими прочности

в течение 10 суток помещали в морозильную камеру при температуре  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Образцы выдерживали в течение 18 часов. Затем их извлекали, оттаивали при комнатной температуре в течение 5 часов. Далее производили измерение условной прочности методом пенетрации. Затем цикл повторяли. Выполнено 10 циклов попеременного замораживания-оттаивания. Результаты измерений прочностных характеристик покрытий представлены на рис. 1.15, б. Как видно, покрытия, образованные всеми связующими реагентами, показали хорошую устойчивость к циклическому воздействию отрицательных температур. Следует отметить, что в натуральных условиях при эксплуатации связующих реагентов подобный жесткий температурный режим маловероятен.

Водопроницаемость (коэффициент фильтрации) является одним из важных параметров качества покрытия. Снижение водопроницаемости может приводить к образованию локальных обводненных участков в период дождей и взаимодействию покрытия с атмосферными выпадениями, а при последующем высыхании — к его повреждению. Фильтрационные свойства покрытий при обработке связующими реагентами эксплуатируемых хвостохранилищ необходимо учитывать и в связи с тем, что образование прослоек закрепленных хвостов с коэффициентом фильтрации, значительно меньшим, чем у намытых хвостов, может привести к подъему уровня кривой депрессии и выклиниванию фильтрационного потока на низовой откос.

Коэффициент фильтрации ( $K_{\phi}$ ) образцов хвостов и хвостов с нанесенными покрытиями определяли по ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации». Коэффициент фильтрации  $K_{\phi}$  (м/сут) рассчитывали по формуле:

$$K_{\phi} = \frac{864Q}{\tau F l},$$

где 864 — переводной коэффициент (из см/с в м/сут);  $Q$  — объем профильтровавшейся воды, мл;  $\tau$  — время, с;  $F$  — площадь поперечного сечения, см<sup>2</sup>;  $l$  — градиент напора,  $l = 1$ .

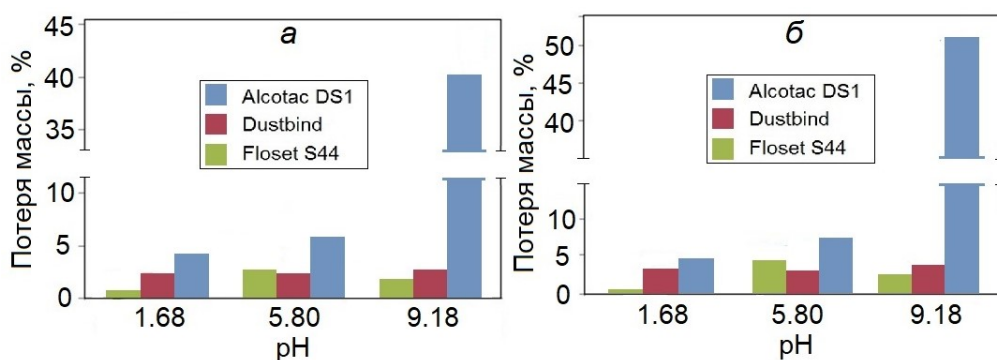
Коэффициент фильтрации измеряли по истечении 7 суток после нанесения реагентов. Обработка хвостов закрепляющими реагентами приводит к существенному снижению коэффициента фильтрации.  $K_{\phi} = 0,627$  м/сут хвостов соответствовал коэффициенту фильтрации пылеватых песков, после обработки связующими реагентами — суглинкам (0,005–0,4 м/сут) [67]. Степень водопроницаемости хвостов изменилась от водопроницаемых до слабоводопроницаемых. Наименьшее значение  $K_{\phi} = 0,008$  м/сут было получено при обработке хвостов реагентом Floset S44, наибольшее  $K_{\phi} = 0,082$  м/сут — при обработке Alcotac DS1. Реагент Dustbind ( $K_{\phi} = 0,013$  м/сут) занимает промежуточное положение.

#### ***1.4.4. Исследование выщелачивания связующих реагентов и влияния этих процессов на флотацию апатита и осветление оборотной воды***

Исследования выщелачивания компонентов реагентов проводили на образованных полимерных пленках. Предварительно растворы связующих реагентов, приготовленные по методике, описанной в подразделе 1.4.3, выдерживали в течение 7 суток до получения пленок.

Далее проводили водное выщелачивание при различных значениях pH среды (кислой, нейтральной и щелочной) в течение 4 и 7 суток. Соотношение Т : Ж составляло 1 : 50, температура 20 °С. Для выщелачивания использовали буферные растворы при pH = 1,68; 5,8 и 9,18. Растворы периодически перемешивали.

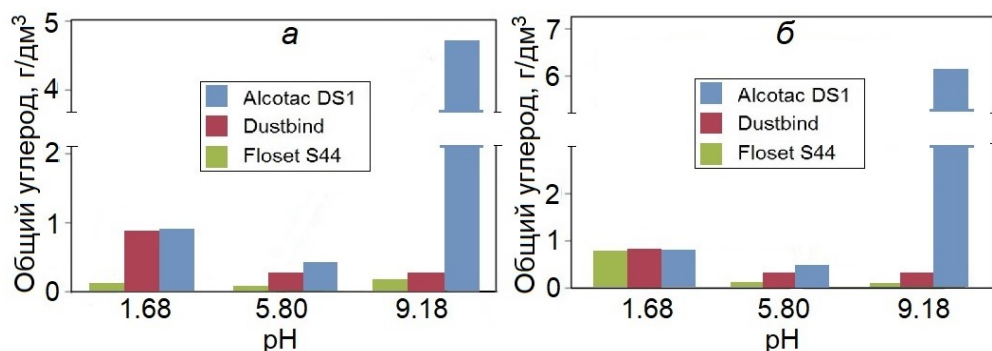
Результаты исследований представлены на рис. 1.16. В процессе выщелачивания во всех растворах наблюдаются потери массы полимерных пленок, образованных связующими реагентами. Следует отметить рост потери массы пленок при повышении pH раствора. Вместе с тем, потери для пленок, образованных реагентами Dustbind и Floset S44, незначительны во всем диапазоне величин водородного показателя и не превышают 3,3 % для первого и 4,3 % для второго (см. рис. 1.16). Существенно отличается выщелачивание пленки, образованной реагентом Alcotac DS1. Прежде всего, для данной пленки характерны более заметные потери массы во всем диапазоне pH растворов (см. рис. 1.16). При переходе к щелочному раствору наблюдается ее резкий — на порядок — рост (51,81 % после 7 суток выщелачивания). Вероятно, с этим обстоятельством может быть связана наибольшая величина коэффициента фильтрации хвостов, обработанных связующим реагентом Alcotac DS1.



**Рис. 1.16.** Зависимость потери массы пленок реагентов после выщелачивания в течение 4 (а) и 7 (б) суток при различных значениях pH растворов

Также представлял интерес анализ изменения концентраций общего углерода ( $C_{\text{общ}}$ ) в растворах после взаимодействия с полимерными пленками. На рис. 1.17 представлены зависимости концентраций общего углерода в растворе после выщелачивания пленок в течение 4 и 7 суток от pH среды. Как видно, для пленок, образованных реагентами Dustbind и Floset S44, максимальные концентрации  $C_{\text{общ}}$  наблюдаются в кислых растворах (см. рис. 1.17, б). Для пленки, образованной реагентом Alcotac DS1, наблюдается существенный рост концентраций  $C_{\text{общ}}$  в щелочной среде, причем с увеличением времени взаимодействия происходит рост концентраций с 4,7 до 6,0 г/л. Эти величины на порядок и более высокие, чем  $C_{\text{общ}}$  в растворе после взаимодействия с пленками, образованными реагентами Dustbind и Floset S44.

Таким образом, растворимость образованных полимерных пленок, в особенности в щелочной среде (процесс флотации апатит-нефелиновых руд ведут при pH = 9,6–9,7), необходимо учитывать при оценке свойств образованных связующими реагентами покрытий.



**Рис. 1.17.** Концентрации общего углерода в растворе после выщелачивания пленок реагентов в течение 4 (а) и 7 (б) суток при различных значениях pH растворов

Флотация апатит-нефелиновых руд на АНОФ-2 осуществляется с использованием на 80 % оборотной воды — слива хвостохранилища, где достигается высокая степень (~ 95 %) очистки стоков от взвешенных веществ. Кроме того, хвостохранилище является мощным буфером, обеспечивающим стабилизацию ионного состава оборотной воды. В нем происходит частичная очистка стоков от отдельных ионов вследствие протекающих различных физико-химических процессов (растворение, образование осадков, сорбция осадками, ионный обмен, поглощение углекислоты и т. д.), а также окисление органических реагентов.

Технологические показатели обогащения в условиях водооборота в значительной мере зависят от состава оборотной воды и минерального состава шлам, остаточной концентрации реагентов и продуктов их взаимодействия. При использовании закрепляющих реагентов не исключается их попадание с атмосферными осадками в водную акваторию хвостохранилища. В связи с этим рассмотрение ассортимента используемых реагентов для закрепления пылящих поверхностей хвостохранилища требует оценки их влияния на процесс обогащения.

За максимально возможную концентрацию принята концентрация, создаваемая в условиях, когда нанесенный на закрепляемую поверхность реагент полностью перейдет в водную акваторию хвостохранилища. Ввиду того что исследуемые связующие реагенты представляют собой водные эмульсии полимерных соединений, была проведена оценка содержания в них воды. Массовая доля воды определялась методом отгонки с органическим растворителем — толуолом (метод Дина — Старка). Результаты использованы для расчета истинной (по сухому веществу) максимально возможной концентрации реагента в оборотной воде. Она составила (мг/л): для Alcotac DS1 8,38, Dustbind 8,25, Floset S44 7. Эта величина использована нами при изучении влияния реагента-подавителя на показатели флотации руды на оборотной воде, а также на ее свойства. Учитывая, что все эти реагенты будут хорошо адсорбироваться минеральной поверхностью, реальная концентрация их в оборотной воде будет значительно ниже.

Исследования проводили на пробе апатит-нефелиновой руды, содержащей 13,80 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Раздробленная до крупности -2 мм руда измельчалась при Т : Ж : Ш = 1 : 0.5 : 6 до крупности -0,315 мм, при этом содержание



в измельченной руде класса +0,16 мм составило 21,3–22,5 % и класса -0,063 мм — 30,0–32,5 %, что соответствует требованиям по гранулометрическому составу питания флотации на АНОФ-2.

Флотацию руды проводили в замкнутом цикле на 6 навесках (360 г) по схеме, представленной на рис. 1.18, которая моделирует фабричную схему флотации получения апатитового концентрата. Основную флотацию вели при содержании твердого 36 %, перечистные операции — 20–25 %. Все операции, в том числе и измельчение, осуществляли на оборотной воде хвостохранилища АНОФ-2. Необходимая концентрация связующего реагента в оборотной воде достигалась путем растворения расчетного количества реагента при 18 °С. Обратная вода характеризовалась следующими показателями: pH = 8,6; содержание (мг/л) взвешенных веществ — 1513; общих солей — 683; Ca<sup>2+</sup> — 16,1; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> — 278,3; SiO<sub>2</sub> — 7,1; CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> — 3,8; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> — 170,5. Флотацию осуществляли при температуре пульпы ~ 18 °С, pH = 9,6–9,7, что создавалось добавлением едкого натра в количестве 30 г/т. В качестве депрессора сопутствующих апатиту минералов использовали жидкое стекло — 90 г/т (100 %-е). Собирателем служила 4-компонентная смесь, используемая для флотации апатита на АНОФ-2 и состоящая из 33,0 % Фосфолана РЕ 65; 19,0 % СТМхв.; 31,0 % СТМлист. и 7,0 % АБСК. Свойства пены, образуемой в основной флотации и при получении готового концентрата, оценивались по принятым в аналитическом центре АО «Апатит» коэффициентам пенообразования (K<sub>п</sub>) и разрушения (K<sub>р</sub>), а также минерализации пены (M, %).

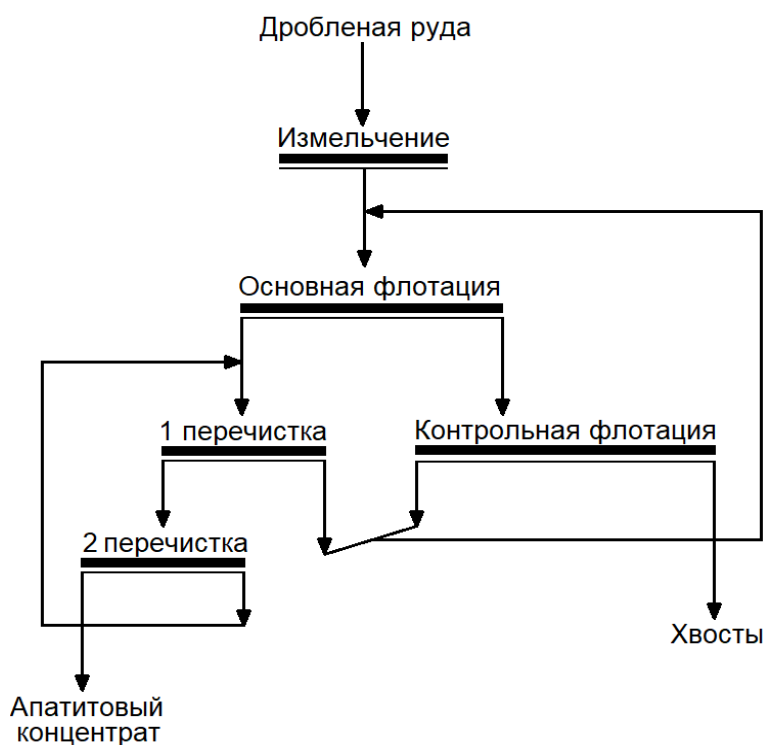


Рис. 1.18. Схема флотации апатит-нефелиновой руды в замкнутом цикле



$K_{\text{п}}$  представляет собой отношение объема пенного слоя ( $V_{\text{п}}$ ) к массе сухого твердого продукта в пенном слое ( $m_{\text{тв}}$ ):

$$K_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{m_{\text{тв}}},$$

где  $K_{\text{р}}$  — отношение разности объемов исходной ( $V_{\text{исх}}$ ) и разрушенной ( $V_{\text{р}}$ ) пены к объему исходного пенного слоя:

$$K_{\text{р}} = \frac{V_{\text{исх}} - V_{\text{р}}}{V_{\text{исх}}}.$$

Минерализация пены (М) — это отношение массы сухого твердого продукта ( $m_{\text{тв}}$ ) к массе пенного продукта ( $m_{\text{п}}$ ):

$$M = \frac{m_{\text{тв}}}{m_{\text{п}}} \cdot 100 \text{ \%}.$$

Установлено, что реагенты Dustbind и Floset S44 при максимально возможных их концентрациях в оборотной воде (8,5 и 3,6–7,2 мг/л соответственно) не оказывают заметного негативного влияния на технологические показатели получения апатитового концентрата. При концентрации Floset S44 в оборотной воде 7,2 мг/л имеет место повышение пенообразования ( $K_{\text{п}} = 2,8$  против 2,3–2,5 в штатном режиме) и образование в перемешивающей операции более устойчивой пены ( $K_{\text{р}} = 0,44$  против 0,47–0,53 в штатном режиме), однако это не нарушает селективности процесса. Для реагентов Dustbind и Floset S44 минерализация находилась на уровне штатного режима ( $M = 43\text{--}44 \text{ \%}$ ).

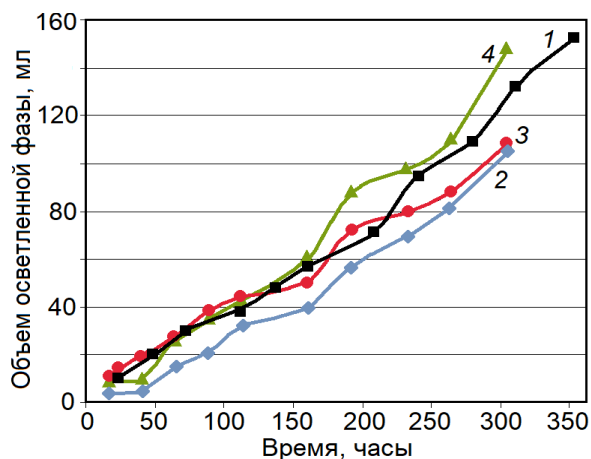
Реагент Alcotac DS1 при максимально возможной концентрации 8,6 мг/л приводит к повышению пенообразования ( $K_{\text{п}} = 2,7\text{--}2,9$  против 2,3–2,5 в штатном режиме), образуемая при этом пена характеризуется меньшей устойчивостью:  $K_{\text{р}}$  в основной флотации 0,52–0,58 против 0,48 и в перемешивающей операции 0,61–0,65 против 0,47–0,53 в штатном режиме. Для реагента Alcotac DS1 зафиксирована минерализация несколько меньше штатной — 39–41 %. Имеет место активация флотации, сопровождаемая увеличением выхода апатитового концентрата и снижением содержания в нем  $\text{P}_2\text{O}_5$ : 39,0–39,06 против 39,26–39,46 % в штатном режиме. Сохранение качества апатитового концентрата на уровне показателей штатного режима путем снижения расхода собирателя с 95 до 80 г/т не дало положительных результатов: получены некондиционные концентраты при тенденции увеличения устойчивости пены ( $K_{\text{р}} = 0,34$ ). При меньшей в 2 раза концентрации Alcotac DS1 в оборотной воде (4,6 мг/л) негативного его влияния зафиксировано не было.

Известно, что полимерные соединения (например, полиакриламиды) используются в качестве реагентов-флокулянтов, способствующих дестабилизации коллоидных суспензий и более быстрому осаждению микрочастиц. Попадание в хвостохранилище с атмосферными осадками рассматриваемых связующих реагентов может оказывать влияние на формирование оборотной воды и привести к изменению в ней баланса по взвешенным веществам.

Представлялось целесообразным провести оценку влияния связующих реагентов на процесс осаждения тонкодисперсных и коллоидных частиц в оборотной воде хвостохранилища АНОФ-2 АО «Апатит», характеризующейся значительным содержанием взвешенных веществ — 1650 мг/л.

Методика исследования заключалась в следующем. В цилиндр объемом 1 л помещали оборотную воду с добавлением заданного количества исследуемого реагента, соответствующего рассчитанной максимально возможной его концентрации.

Параллельно ставился холостой опыт. Через определенные промежутки времени измеряли объем осветленной (прозрачной) фазы. Полученные закономерности представлены на рис. 1.19. Результаты свидетельствуют о том, что при заданных концентрациях реагент Floset S44 способствует более быстрому осаждению взвешенных веществ в воде. Для других реагентов проявляется тенденция к повышению устойчивости суспензии, особенно для реагента Alcotac DS1.



**Рис. 1.19.** Кинетика осветленной оборотной воды (1) и оборотной воды при концентрации реагента, мг/л: 8,6 Alcotac DS1 (2); 8,5 Dustbind (3); 7,2 Floset S44 (4)

По результатам исследований, наиболее предпочтительным связующим реагентом признан Dustbind [66]. Основные его преимущества — достаточная прочность покрытия, высокая атмосферостойкость, водопроницаемость покрытия и устойчивость к выщелачиванию в водных растворах. Реагент Dustbind не оказывает негативного влияния на флотацию апатита и кинетику осветления оборотной воды. Реагент Dustbind успешно применялся КФ АО «Апатит» для пылеподавления хвостохранилища АНОФ-2 начиная с 2016 г., обеспечивая не только существенное сокращение трудозатрат, но и снижение времени обработки единицы площади хвостов.

Вместе с тем, как отмечено в разделе 1.2, в летний период наблюдаются случаи превышения ПДК пыли неорганической в атмосфере города Апатиты. В этой связи далее рассмотрим результаты мониторинга концентраций наиболее экологически опасных частиц  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ , выполненного в 2022 г.

## Выводы по главе 1

Хвостохранилище АНОФ-2 является крупнейшим намывным техногенным массивом КФ АО «Апатит» и Мурманской области. Данный объект относится к одним из наиболее интенсивных источников аэротехногенного воздействия на окружающую среду и здоровье населения района, приводит к ухудшению санитарно-гигиенической обстановки в городе Апатиты, загрязнению поверхностных вод и почв, нарушению и видоизменению ландшафта.

Выполнена оценка связи метеорологических параметров теплого периода и интенсивности пыления хвостов обогащения 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 сентябре, за исключением июня, зафиксировано незначительное повышение среднемесячной температуры. Средние скорости ветра и влажность за этот 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.

Приведен краткий обзор существующих и перспективных способов пылеподавления хвостов обогащения. Основным наименее затратным и наиболее широко применяемым способом пылеподавления намывных пляжей действующих хвостохранилищ является физико-химический метод, основанный на формировании на их поверхности искусственных покрытий, стойких к ветровой эрозии, путем обработки поверхности хвостовых отложений связующими реагентами.

Выполнены мониторинг в натуральных условиях хвостохранилища АНОФ-2 и лабораторные исследования свойств покрытий, образованных связующими реагентами Alcotac DS1, Dustbind и Floset S44. В целом можно отметить, что все исследованные связующие реагенты показали близкие характеристики. К преимуществам реагента Alcotac DS1 можно отнести наибольшую прочность покрытия, атмосферостойкость, в том числе стойкость покрытия в циклах замораживание-оттаивание. Однако для данного реагента характерны высокая стоимость обработки (на 38 % дороже, чем для Floset S44, и на 70 % в сравнении с Dustbind), возможное отрицательное влияние на селективность флотации и осветление оборотной воды при накоплении в ее составе, чему может способствовать его недостаточная устойчивость к выщелачиванию, особенно в нейтральных и щелочных растворах. Реагент Floset S44 продемонстрировал наибольшую устойчивость к выщелачиванию в водных растворах. Вместе с тем, атмосферостойкость, кинетика набора прочности и водопроницаемость покрытия оказались наихудшими по сравнению с остальными испытываемыми образцами. Реагент Floset S44 не оказывает негативного влияния как на показатели флотации, так и на кинетику осветления оборотной воды. Наиболее предпочтительным связующим реагентом следует признать реагент Dustbind. Основные преимущества — низкая стоимость обработки, хорошие атмосферостойкость, водопроницаемость покрытия и устойчивость к выщелачиванию в водных растворах. Реагент Dustbind не оказывает негативного влияния на флотацию апатита и кинетику осветления оборотной воды.

## ГЛАВА 2. МИКРОЧАСТИЦЫ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ГОРОДА АПАТИТЫ. ОБРАБОТКА ФОТОСНИМКОВ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ НА БАЗЕ ЦВЕТОВЫХ МОДЕЛЕЙ

### 2.1. Загрязнение атмосферного воздуха города Апатиты микрочастицами<sup>1</sup>

Как известно, частицы  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$  представляют особую опасность для здоровья человека. Они воздействуют на дыхательную систему и, проникая глубоко в легкие, вызывают или обостряют респираторные заболевания [68–75]. В России значения ПДК<sub>м.р.</sub> (м.р. — максимальные разовые) составляют для частиц пыли  $PM_{2.5}$   $0,16 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>,  $PM_{10}$   $0,3 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>. ВОЗ, признавая пыль в воздухе одной из серьезнейших опасностей и причин множества заболеваний дыхательных путей и сердечно-сосудистой системы, устанавливает более жесткие предельные (среднесуточные и среднегодовые) нормы, чем в России [72].

В докладе “Global assessment of sand and dust storms” Генеральной Ассамблеи ООН [76] и «Компендиум по песчаным и пыльным бурям» Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием [77] пыление от техногенных песчаных поверхностей (хвостохранилища и пр.) указывается как одна из важных проблем атмосферного загрязнения населенных пунктов. Кроме того, техногенная пыль представляет особую опасность, так как в ней концентрируется широкий спектр химических элементов, содержания которых существенно превышают кларки в природных средах [3].

Авторы монографии попытались исследовать динамику концентрации атмосферной пыли  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$  в черте города Апатиты и определить минеральный состав поверхностных слоев хвостохранилищ АНОФ и образцов пыли с последующим выявлением реальных источников загрязнения атмосферного воздуха.

В ходе работы производили опробование поверхностного слоя хвостохранилищ АНОФ-2 и АНОФ-3 (рис. 2.1, точки 1 и 2). Отбор осуществляли методом режущего кольца на глубину 0,15 м от поверхности. Инженерно-геологические свойства грунта, а именно плотность в естественном залегании, влажность, гранулометрический состав, определены в соответствии с ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». Гранулометрический состав техногенного грунта определяли на ситовом ударном анализаторе АС-200У (АО «НПК “Механобр-техника”», Россия).

Измерения концентрации пыли в атмосферном воздухе проводили в летний период 2022 г. с помощью прибора экологического контроля СЕМ DT-9881 (СЕМ, Shenzhen Everbest Machinery Industry CO., LTD, Китай) на высоте 1,5 м от поверхности в черте города Апатиты. В точке мониторинга запыленности приземного слоя атмосферного воздуха (см. рис. 2.1, точка 3) измерения содержания частиц  $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$  производили в дни без осадков на открытом участке, а также на защищенном участке, отделенном от потенциальных источников пыления полосой древесной и кустарниковой растительности. В зеленой зоне, выполняющей роль экрана, преобладают береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.)

---

<sup>1</sup> В исследовании принимали участие к. г.-м. н. А. А. Компанченко, А. В. Дуплищева, М. Ю. Глазунова.

и ива Шверина (*Salix schwerinii* E. Wolf.). Выбор времени измерения концентрации (13:00) обусловлен суточным максимумом количества людей, находящихся на открытом воздухе [78]. Выполнен отбор проб атмосферной пыли в моменты ее повышенной концентрации в атмосферном воздухе, а также фоновой пыли, накопленной за летне-осенний период (см. рис. 2.1, точка 4). Для сопровождения исследований были использованы метеоданные с сайта [www.https://tp5.ru](http://www.https://tp5.ru) для станции «Апатитовая», Россия, WMO\_ID = 22213, координаты 67,550737 с. ш., 33,364007 в. д.



**Рис. 2.1.** Карта-схема расположения пляжей хвостохранилищ апатит-нефелиновых руд (1, 2), точек отбора атмосферной пыли на участке мониторинга (3) и фоновой пыли (4), (карта-схема дополнена «розой ветров» за бесснежный период 2022 г.). Построение карты-схемы выполнено с применением программного продукта ArcGIS Online

Отобранные пробы атмосферной пыли, а также тонкие классы поверхностного слоя хвостохранилища апатит-нефелиновых руд исследовали в лабораторных условиях. Первичную диагностику минералов производили по физическим свойствам, наблюдаемым в стереомикроскопе Stemi 1000 (Carl Zeiss, Oberkochen, Германия). Количественный минералогический анализ проводили методом рентгеновской дифракции и подсчета зерен для образца пыли, отобранного в момент превышения ПДК. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре Rigaku SmartLab Miniflex II (Rigaku Corporation, Токио, Япония) в Центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ РАН. Во всех измерениях использовали медный анод, излучение Cu K $\alpha$ . Съемку образца вели при напряжении на рентгеновской трубке 40 кВ, силе тока 15 мА, углах отражения  $2\theta$  в диапазоне 3–90 ° с шагом 0,02 °, скорость съемки составляла 5 °/мин. Фазовый анализ проводили с использованием базы порошковых данных PDF-4.

Визуализация состояния атмосферного воздуха выполнена с помощью изображений, полученных с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Mavic 2 Enterprise Dual (SZ DJI Technology Co., Ltd, Китай).

Снимки выполнены над точкой 3, указанной на рис. 2.1. Устройство оснащено 12-мегапиксельной камерой, максимальный размер изображения 4000 × 3000. Построение графиков и диаграмм выполнено с помощью программного продукта Microsoft Excel.

Как отмечено ранее, для гранулометрического состава поверхностного слоя хвостохранилищ апатит-нефелиновых руд характерно преобладание фракций -0,5 + 0,25 и -0,25 + 0,1 мм. Среднее массовое содержание этих фракций в точке отбора пробы составило 51,79 и 31,10 % соответственно. Хвосты поверхностного слоя по литологической классификации могут быть отнесены к мелко- и среднезернистым пескам. Содержание частиц размером -0,1 мм достигает 18,5 %, что потенциально указывает на возможность возникновения пыления при определенных погодных условиях. На момент отбора проб значение влажности хвостов составляло 8,4 %. Плотность в естественном залегании равна 1,73 г/см<sup>3</sup>.

Количественный минеральный состав хвостов и образцов пыли представлен в табл. 2.1.

*Таблица 2.1*

Минеральный состав экспериментальных образцов (мас. %)

Минерал	1	2	3
Нефелин	33,98	3,69	16,37
ПШ	28,91	21,19	29,19
Пироксены	8,75	15,36	4,73
Содалит	8,01	0,5	1,28
Амфибол	4,79	5,71	4,64
Слюда	4,70	6,67	6,21
Натролит	4,24	1,07	1,28
Титанит	3,31	0,36	1,87
Каолинит	2,76	0	3,55
Кварц	0,55	25,67	22,49
Клинохлор	0,00	0,48	8,38
Другие*	0,00	19,3	0,00
Сумма	100,00	100,00	100,00

*Примечания:* 1 — хвосты крупностью -0,05 мм; 2 — пыль, отобранная в момент превышения ПДК<sub>м.р.</sub>; 3 — фоновая пыль. ПШ — полевые шпаты.

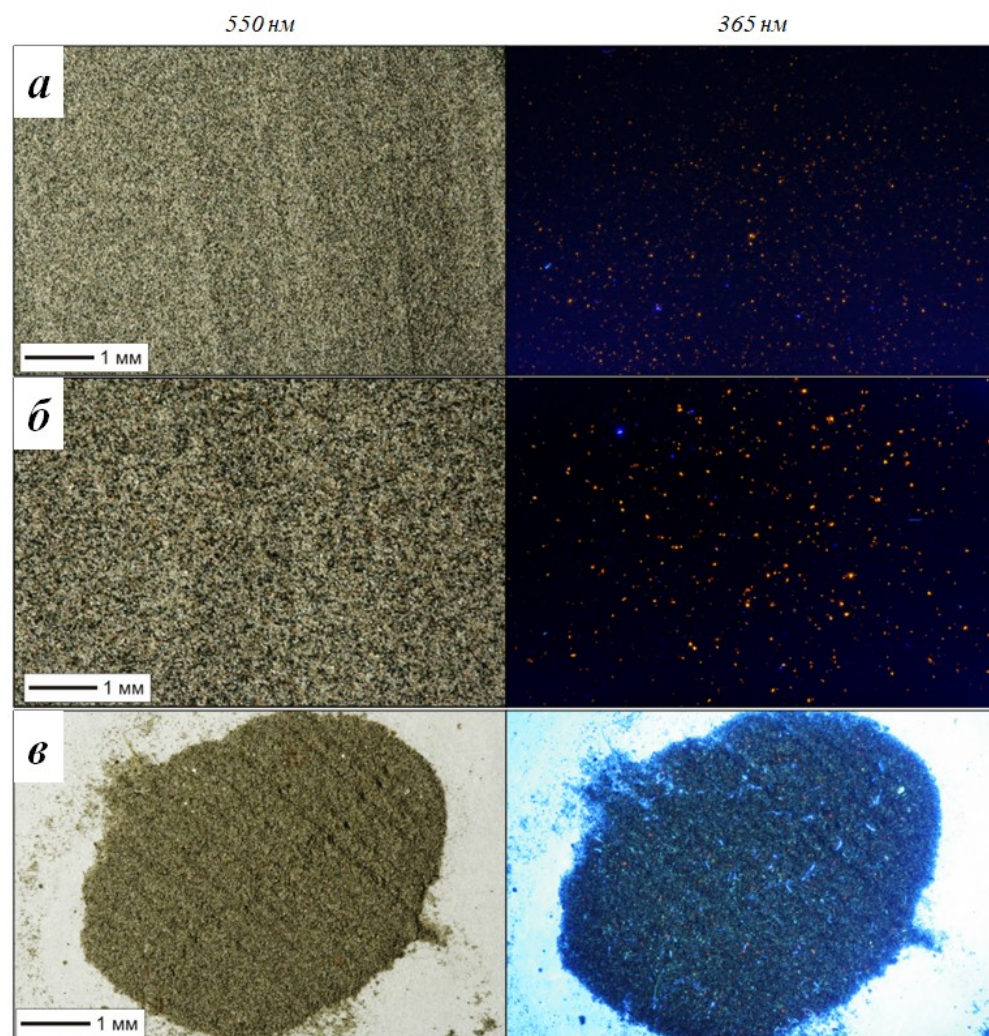
\* Оксиды и гидроксиды железа (магнетит, гематит, гётит), кальцит, техногенные образования (микропластик, стекло, окалина).

Все исследованные образцы имеют общие черты — слабая окатанность частиц, отсутствие налетов гидроксидов железа. Все пробы в том или ином количестве содержат минералы, характерные для отходов обогащения апатит-нефелиновых руд, — нефелин, титанит, натролит, содалит. Пробы атмосферной



и фоновой пыли отличаются гораздо меньшим их содержанием и преобладанием кварца. Кварц, полевые шпаты, слюды довольно широко распространены в подстилающих породах в районе исследований и попадают в воздух в процессе их дефляции.

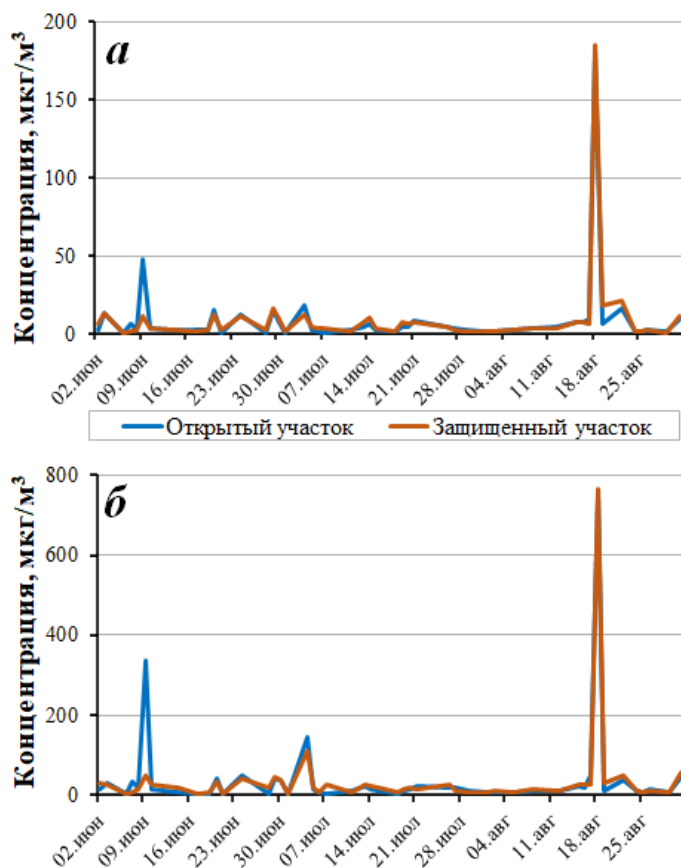
Индикатором загрязнения атмосферного воздуха города Апатиты пылью хвостов обогащения может служить минерал содалит. Этот минерал характерен для апатит-нефелиновых руд Хибинского массива, к тому же он легко диагностируется по свечению оранжевым цветом в УФ-свете (рис. 2.2). В пробах атмосферной пыли содалит присутствует в виде единичных зерен и малочисленных сростков с нефелином, в пробе фоновой пыли его содержание превышает 1 %.



**Рис. 2.2.** Снимки образцов: материал поверхностного слоя хвостохранилищ апатит-нефелиновых обогатительных фабрик крупностью:  
*a* —  $-0,05$  мм; *б* —  $-0,1 + 0,05$  мм; *в* — слой пыли, накопленный в городе Апатиты за бесснежный период 2022 г.

Помимо хвостохранилищ значительную нагрузку на атмосферный воздух оказывают транспорт, АТЭЦ, промышленные предприятия, расположенные в черте города, полигон твердых коммунальных отходов (ТКО), подверженный частому самовозгоранию, мелкие частицы мусора, который накапливается на территории города. В пробах атмосферной пыли зафиксировано присутствие мелких частиц окисленного железа, бесцветного пластика, круглые металлические шарики окалины, мелкие осколки темного стекла (см. табл. 2.1).

Случаи пыления хвостохранилищ с превышением ПДК<sub>м.р.</sub> в городской черте были зафиксированы в мае и сентябре 2022 г. Повышение загрязнения отмечено 09.06.2022 и 04.07.2022. При измерении концентрации пыли РМ<sub>10</sub> в июне (09.06.2022) зафиксировано превышение ПДК<sub>м.р.</sub> (рис. 2.3). Повышение концентрации частиц данного размера было связано с порывистым ветром северо-западного направления, скорость ветрового потока в черте города достигала 15 м/с. В данном случае была оценена замерами экранирующая способность полосы растительности. На открытом участке концентрация частиц РМ<sub>10</sub> достигла  $0,338 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>, а на участке, защищенном растительностью, концентрация пыли составляла  $0,050 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>.

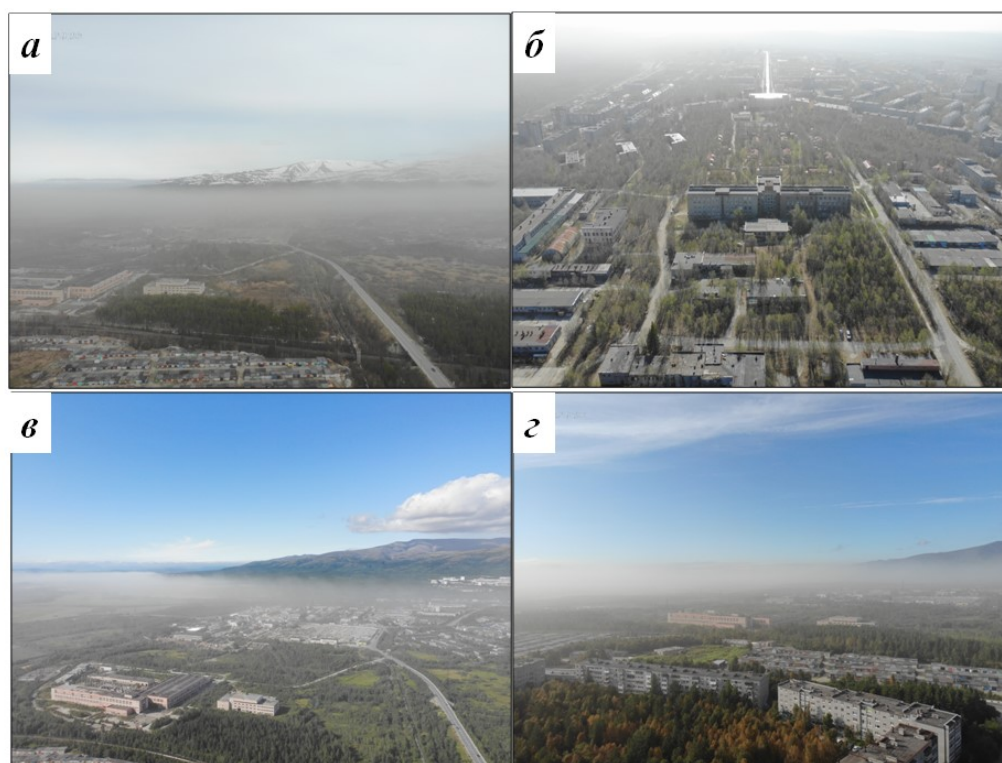


**Рис. 2.3.** Динамика концентрации частиц РМ<sub>2,5</sub> (а) и РМ<sub>10</sub> (б) в атмосферном воздухе города Апатиты за период наблюдений в 2022 г.



В августе (18.08.2022) зафиксированы единичные случаи превышения ПДК<sub>м.р.</sub>: для частиц PM<sub>2.5</sub> концентрация превысила  $0,180 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>, концентрация частиц PM<sub>10</sub> достигла  $0,765 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>, что в 2,5 раза выше установленного норматива. Согласно данным метеостанции города Апатиты, в эти дни наблюдался устойчивый северо-западный ветер.

Анализ фотоизображений, полученных с помощью БПЛА, также позволяет связать повышенные концентрации пылевых частиц в атмосферном воздухе города Апатиты с пылением хвостохранилищ АНОФ (рис. 2.4).



**Рис. 2.4.** Снимки приземного слоя атмосферного воздуха в моменты пыления хвостохранилищ в бесснежный период 2022 г.:  
*a* — май; *б* — июнь; *в* — июль; *г* — август

В результате мониторинга были выявлены следующие закономерности. Наиболее интенсивно пыление происходит после нескольких дней без атмосферных осадков (в зависимости от их интенсивности и длительности). При выпадении осадков на сухую поверхность пляжа хвостохранилища увлажнения, как правило, недостаточно, дренаж и испарение способствуют быстрому высыханию и нагреву поверхности пляжей. Полученные данные совпадают с результатами предыдущих исследований, согласно которым пыление хвостохранилищ возобновляется в интервале от несколько часов до 1–2 суток после выпадения осадков [79].

Гребень дамбы хвостохранилища АНОФ-2 имеет относительное превышение над окружающим рельефом более 70 м. При средней скорости ветра 11–14 м/с, скорость ветра на гребне достигает 20 м/с. Значения скоростей ветра,

превышающих 20 м/с, являются пороговыми для массового срыва мелкодисперсных несвязанных частиц, слагающих хвостохранилище. Гребни дамб и сухие пляжи становятся основными источниками выносимой за пределы санитарно-защитной зоны хвостохранилища мелкой пыли. Для превышения ПДК достаточно кратковременных порывов ветра в районе хвостохранилища. В городе Апатиты наибольшее число случаев превышения ПДК<sub>м.р.</sub> запыленности атмосферного воздуха приходится на ветры северо-западного направления.

В результате мониторинга было зафиксировано, что для случаев значительного превышения ПДК<sub>м.р.</sub>, роль зеленых зон в пределах санитарно-защитных полос и в черте городской застройки снижается. Наличие многоярусной растительности не оказывает существенного влияния на снижение концентрации пыли в приземном слое воздуха.

Наряду с поиском эффективных способов закрепления поверхности хвостохранилищ, необходимо сокращать выбросы промышленной и технической инфраструктуры в черте города, закреплять участки нарушенных грунтов, производить своевременную уборку и увлажнение территорий, дорожной сети, обеспечить центральное отопление гаражных хозяйств, минимизировать процессы горения на полигоне ТКО.

## **2.2. Взаимосвязь температуры и влажности материала хвостов обогащения на базе обработки цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов и цветочных моделей<sup>2</sup>**

Беспилотные летательные аппараты имеют широкий спектр применения в приложении к задачам горной промышленности [80–92]:

- планирование и отчетность горных работ;

- идентификация нарушений растительного покрова, в том числе связанных с геологическими аномалиями;

- оценка воздействия на окружающую среду горных работ, мониторинг процесса рекультивации;

- оценка устойчивости уклонов, детального и точного картографирования бортов карьеров, разведка отвалов;

- оценка геометрических параметров карьеров, хвостохранилищ, обследование подземных выработок и др.

Применительно к таким техногенным горнотехническим объектам, как хвостохранилища, использование БПЛА ограничено в основном либо осмотром, либо оценкой геометрических параметров. Вместе с тем, по нашему мнению, просматривается ряд направлений, по которым область применения БПЛА к техногенным объектам пыления может быть существенно расширена. Примерами таких научно-практических задач являются:

- мониторинг температуры и влажности атмосферы, температуры поверхности хвостохранилища с последующим выходом (через обработку и анализ результатов измерений) на влагонасыщенность поверхностного слоя материала;

- уточнение экспериментальных параметров гидрофизических зависимостей в известных подходах Brooks and Corey и van Genuchten;

- исследование профилей температуры и скорости ветра, влажности поверхностного слоя, концентрации пылевого загрязнения в слое атмосферы

---

<sup>2</sup> Компьютерная программа обработки фотоснимков разработана К. А. Малодушевым.

до 30–50 м с последующим выходом на формализованное описание горизонтального или вертикального потоков массы пыли;

фиксация динамики площади пыления с поверхности хвостохранилища в период пыльных бурь для валидации моделей процессов пыления с использованием онлайн интегрированной системы моделирования Enviro-Hirflam и последующим применением системы моделирования в прогнозных оценках загрязнения окружающей среды в эпизодических явлениях пыления на хвостохранилищах.

Весьма актуальной и интересной представляется задача по применению БПЛА для мониторинга температуры поверхности пылящих хвостов с привязкой к влажности материала, что позволит выполнять прогноз «готовности» конкретной площади хвостохранилища к началу процесса пыления. Именно в приложении к указанной задаче в лабораторном масштабе (пока не натурном эксперименте) выполнены исследования, результаты которых описаны в данном разделе.

Известен ряд публикаций, в которых почвоведы для диагностики почв и описания почвенных профилей как важное физическое свойство используют цвет [93–97]. При этом его количественную оценку получают с помощью спектрофотометров и фотоколориметров. Однако они довольно дороги и неудобны для эксплуатации в полевых условиях и, следовательно, недоступны для многих исследователей в целом и для измерения цвета в частности [95]. Напомним, что система Манселла [96; 97] по-прежнему остается основной при описании цвета.

Недорогой альтернативой спектрофотометрам и фотоколориметрам является использование цифровых камер для получения изображений и определения цветов. Цифровые камеры имеют ряд преимуществ перед 35-миллиметровой фотопленкой, поскольку они позволяют избежать несоответствий при ее проявке и ошибок, возникающих при сканировании [98], а также обеспечивают большую чувствительность, чем стандартная пленка [99]. Недорогие цифровые камеры могут иметь преимущества перед узкополосными изображениями для большинства приложений дистанционного зондирования, так как они уменьшают потребность в точных калибровке и моделировании физических характеристик окружения (атмосфера, функция распределения двунаправленного отражения (Bidirectional Reflectance Distribution Function) и т. д. [99]).

Цифровые камеры на сегодняшний день широко используются не только на бытовом уровне, но и во многих инженерных приложениях. Например, в работе [95] авторы упоминают приложения для измерения цвета поверхности пищевых продуктов [100], для выявления повреждений растений кукурузы [101], определения местоположения персонажей на изображениях сцен [102], автоматического мониторинга снежного покрова в Антарктиде [103], оценки гумусированности почв на основе обработки их цифровых фотоизображений [104; 105], простого анализа поровой структуры почв [106] и ряд других [107–111]. Отдельно отметим исследования сотрудников Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья (ИХТРЭМС) КНЦ РАН, в которых с применением цифровых изображений изучена способность модифицированного титаносиликатной добавкой цементного камня к самоочищению под воздействием видимого и ультрафиолетового (УФ) света [112–114].

Таким образом, цифровые камеры предоставляют новую и простую возможность охарактеризовать образцы почвы. Как и в случае стандартных приложений дистанционного зондирования, следует проявлять осторожность при анализе снятых цифровыми камерами изображений, чтобы избежать

несоответствий из-за источника света. Обычно используется настраиваемый источник искусственного освещения [100; 101]. Для точной калибровки также должны быть известны кривые квантовой эффективности матрицы и спектры пропускания объектива [98]. Однако производители цифровых камер часто не предоставляют их, поскольку они считаются промышленной тайной.

Во многих исследованиях стандартные цветные чипы, окрашенные деревянные панели или просто стандартный эталонный белый отображались внутри сцены («калибровка в полете»), чтобы обеспечить калибровку значений RGB [98–100; 115].

Используя цифровую камеру в лаборатории и при идеальных условиях освещения, авторы работ [116; 117] смогли предсказать содержание органического углерода в почве (soil organic carbon — SOC) для образцов, собранных в Бретани (Франция). Было отмечено, что лучшие корреляции наблюдались для увлажненных образцов. Кроме того, обнаружено, что измерения цвета с использованием значений интенсивности изображения RGB или цветовых координат Международной комиссии по освещению (Commission internationale de l'éclairage — CIE) Lab показывают хорошую реакцию на SOC (при более высоком содержании SOC, затемняющего почву). Дополнительно авторы обнаружили, что предсказания содержания SOC с использованием простых цветовых моделей с цифровой камеры сопоставимы с полученными с помощью данных спектрального отражения или даже лучше них.

Российские почвоведы отмечают, что цвет почвы является главным морфологическим и диагностическим признаком, который определяется ее химико-минералогическим составом и дает представление о составе почвы и его физико-химических свойствах [96]. Окраска почвы в видимом диапазоне (400–700 нм) связана с присутствием компонентов, способных поглощать или рассеивать излучение различных длины волны и интенсивности. Органическое вещество, оксиды железа, карбонаты, вода и химический состав глинистых минералов являются основными компонентами, влияющими на цвет почвы [95].

В наших лабораторных экспериментах при прочих равных условиях (содержание органического вещества, оксидов железа, карбонатов и химический состав глинистых минералов) именно наличие разного количества влаги в образцах будет оказывать влияние на цвет поверхности материала хвостохранилища.

Цель исследования заключалась в определении количественной взаимосвязи температуры и влажности материалов хвостов обогащения на базе анализа цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов посредством методик RGB и Lab.

В лабораторном масштабе проведена серия опытов, направленная на определение цветовых различий материала хвостов обогащения хвостохранилища АНОФ-2 в зависимости от содержания в нем влаги. Для этого были отобраны пробы поверхностного слоя хвостохранилища с применением режущего кольца объемом 815,1 см<sup>3</sup> на глубину 15 см от поверхности.

Для проведения лабораторных испытаний взяты 10 образцов массой 50 г. Хвосты высушивали в течение двух суток до воздушно-сухого состояния. Каждый образец орошали дистиллированной водой в следующем количестве (мл): № 1 — 24; № 2 — 21; № 3 — 18; № 4 — 15; № 5 — 12; № 6 — 9; № 7 — 6; № 8 — 4,5;

№ 9 — 3; № 10 — без орошения. После орошения образцы выдерживали в течение 12 часов. Затем измеряли температуру каждого образца и выполняли фотосъемку при естественном освещении и УФ-свете [112–114]. Понятно, что использование УФ-света возможно только в лабораторных экспериментах.

Измерение температуры производили с применением универсального цифрового термометра TP-101 (ООО «Теплоприбор», город Москва, Россия). Точность измерения составляет 0,1 °С. В табл. 2.2 представлены экспериментальные значения температуры и расчетные значения влажности образцов. Влажность хвостов обогащения определяли в соответствии с ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».

Таблица 2.2

Экспериментальные значения температуры  
и расчетные значения влажности образцов

№ образца	Влажность, усл. ед.	Температура, °С
1	0,3243	17,5
2	0,2958	17,3
3	0,2647	17,2
4	0,2308	17,5
5	0,1936	17,5
6	0,1525	19,7
7	0,1071	19,8
8	0,0826	19,7
9	0,0566	19,7
10	0	19,8

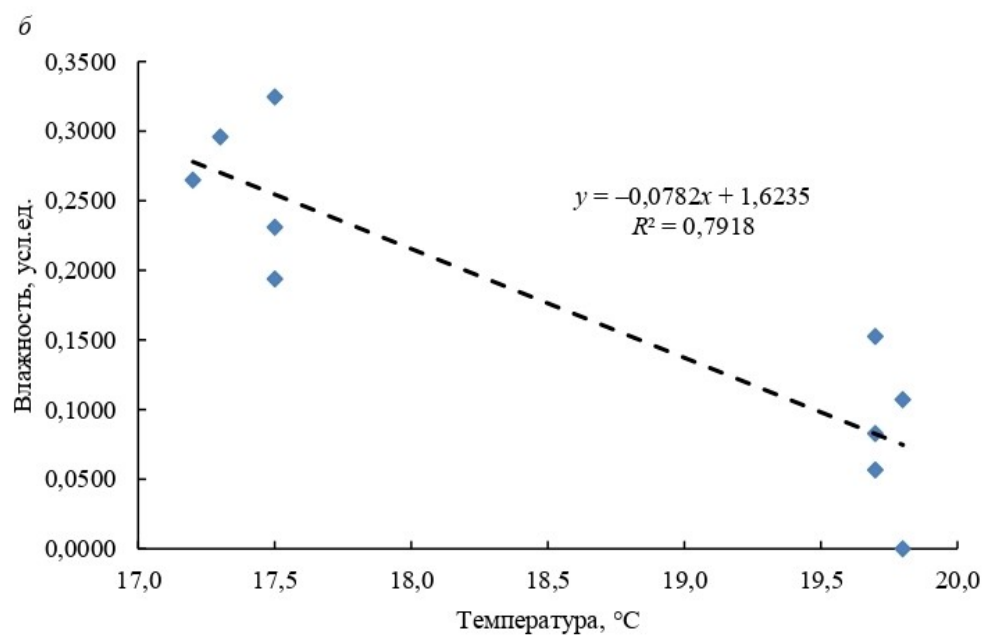
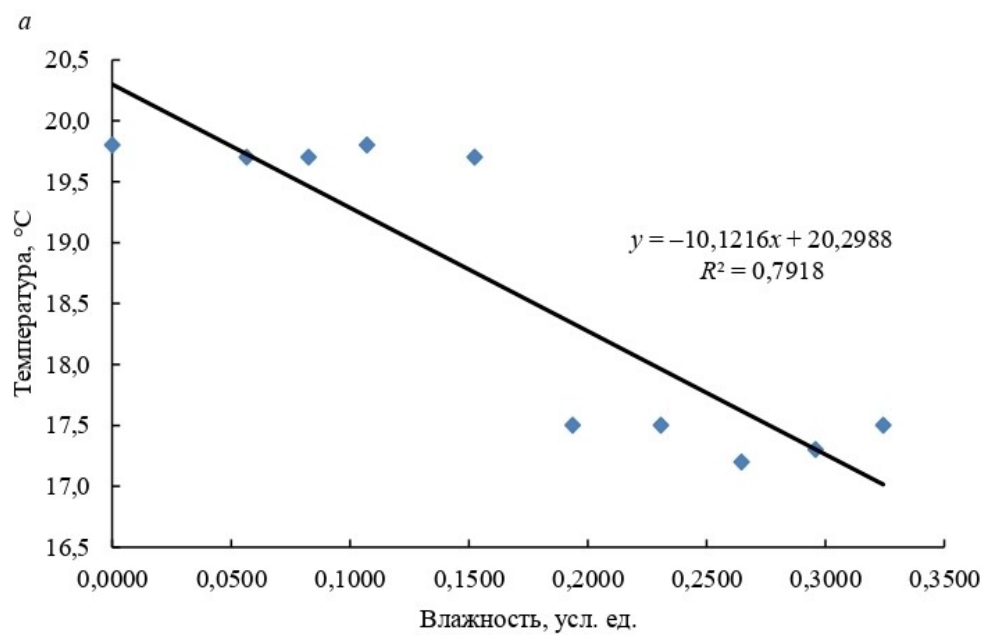
Построение в «нулевом» приближении графиков (и трендов) данных физического эксперимента дает следующие зависимости температуры от влажности (рис. 2.5, а) и наоборот (рис. 2.5, б):

$$T = -10,122w + 20,299; \quad w = -0,078T + 1,624,$$

где  $T$  — температура, °С;  $w$  — влажность, усл. ед.

Фотографические изображения получены с помощью камеры беспилотного летательного аппарата DJI Mavic 2 Enterprise Dual (SZ DJI Technology Co., Ltd, Китай). Аппарат оснащен оптической и термальной камерами M2ED (FLIR Systems Inc., США). Одновременно с фотосъемкой образцов фотографировались два эталона — черный и белый (рис. 2.6).

Весьма любопытно, какие аналогичные зависимости получатся по результатам обработки фотоснимков на базе методик RGB и Lab, принимая экспериментальные зависимости в качестве эталонных.



**Рис. 2.5.** Графики (и тренды) экспериментальных зависимостей температуры от влажности (*a*); влажности от температуры (*б*)



Рис. 2.6. Результаты фотосъемки при естественном свете и комнатной температуре

*Описание методик обработки фотоснимков*

*Методика RGB.* В большом количестве интернет-ссылок и печатных изданий имеется описание цветковых моделей RGB и Lab [118–122].

Отмечается, что система RGB (по первым буквам английских названий цветов: Red — красный, Green — зеленый, Blue — синий) является аддитивной цветовой системой. При восприятии цвета человеком именно они непосредственно воспринимаются глазом. Остальные цвета представляют собой смешение трех базовых цветов в разных соотношениях. Максимальные значения всех трех базовых составляющих соответствует белому цвету (255, 255, 255), минимальные — черному цвету (0, 0, 0). В обработке информации иногда используют нормировку цветковых компонент по следующим соотношениям:

$$\text{интенсивность } I = (R + G + B) / 3;$$

$$\text{цветовые компоненты } r = R / (R + G + B); g = G / (R + G + B); b = B / (R + G + B).$$

При этом для всех цветов сумма  $r + g + b = 1$ .

Для каждого образца на базе разработанной К. А. Малодушевым программы (см. приложение к разделу 2.2) получены осредненные по поверхности образцов значения цветковых компонент модели RGB. Количество пикселей, принятых в обработку, составляло не менее 16 тысяч.

Результаты физического эксперимента и компьютерной обработки снимков под методику RGB приведены в табл. 2.3.

В ряде прикладных исследований рекомендуют рассчитывать и анализировать не сами значения RGB или интенсивности, а 5 индексов цвета материала [93–95]: индекс яркости BI; индекс насыщения SI; индекс оттенка HI; индекс окраски CI; индекс покраснения RI:

$$BI = \sqrt{\{(R^2 + G^2 + B^2) / 3\}};$$

$$SI = (R - B) / (R + B);$$

$$HI = (2R - G - B) / (G - B);$$

$$CI = (R - G) / (R + G);$$

$$RI = R^2 / (BG^3).$$

Расчетные значения индексов исследуемых образцов представлены в табл. 2.4.



Таблица 2.3

Результаты эксперимента и обработки цифровых снимков по методике RGB

№ образца	Естественный свет				УФ-свет			
	Пиксели	R	G	B	Пиксели	R	G	B
1	17690	67,4	53,2	36,7	17673	12,5	50,1	41,1
2	18216	64,1	52,1	38,0	17316	12,8	50,4	43,0
3	19440	66,6	53,7	37,6	18432	13,0	54,5	43,2
4	18078	61,6	49,3	33,8	17810	12,9	52,8	40,5
5	18688	68,9	55,5	39,5	17835	18,7	70,7	55,4
6	16728	89,2	71,8	49,7	18034	23,8	87,5	66,8
7	17667	110,2	90,7	65,2	17388	34,5	118,2	97,3
8	18029	114,7	98,1	73,5	18354	30,3	105,5	89,3
9	17112	113,7	97,0	72,2	17955	25,7	91,0	79,9
10	18522	115,2	96,8	71,4	18090	31,4	106,8	96,9
Белый	20083	244,3	220,7	182,6	20066	81,7	246,8	216,9
Черный	19840	27,6	24,6	18,8	18696	14,5	55,2	58,9

Таблица 2.4

Расчетные индексы

№ образца	BI	SI	HI	CI	RI
Естественный свет					
1	53,913	0,295	2,721	0,118	8,22E-04
2	52,495	0,256	2,702	0,103	7,65E-04
3	53,954	0,278	2,602	0,107	7,62E-04
4	49,556	0,291	2,587	0,111	9,37E-04
5	55,940	0,271	2,675	0,108	7,03E-04
6	72,069	0,284	2,575	0,108	4,33E-04
7	90,594	0,257	2,529	0,097	2,50E-04
8	96,923	0,219	2,350	0,078	1,90E-04
9	95,829	0,223	2,347	0,079	1,96E-04
10	96,158	0,235	2,449	0,087	2,05E-04
УФ-свет					
1	38,103	-0,534	-7,356	-0,601	3,02E-05
2	38,957	-0,541	-9,162	-0,595	2,98E-05
3	40,847	-0,537	-6,345	-0,615	2,42E-05
4	39,134	-0,517	-5,488	-0,607	2,79E-05
5	52,970	-0,495	-5,797	-0,582	1,79E-05
6	65,025	-0,475	-5,155	-0,572	1,27E-05
7	90,607	-0,476	-7,010	-0,548	7,41E-06
8	81,696	-0,493	-8,284	-0,554	8,76E-06
9	71,474	-0,513	-10,766	-0,56	1,10E-05
10	85,209	-0,511	-14,232	-0,546	8,35E-06

*Методика Lab.* Успешной попыткой создания аппаратно независимой модели цвета, основанной на человеческом восприятии цвета, является модель Lab [123]. Любой цвет в Lab определяется яркостью (*lightness*) и двумя хроматическими компонентами: параметром *a*, который изменяется в диапазоне от зеленого до красного через серый, и параметром *b*, изменяющимся в диапазоне от синего до желтого через серый. Яркость в модели Lab полностью отделена от цвета. Это делает модель удобной для регулирования контраста, резкости и других тоновых характеристик изображения. Модель Lab является трехканальной. Ее цветовой охват включает охваты всех других цветовых моделей и соответствует видимому цветовому охвату стандартного наблюдателя.

Как и для модели RGB, для каждого образца на базе разработанной К. А. Малодушевым программы (см. приложение к разделу 2.2) получены осредненные по поверхности образцов значения цветовых компонентов модели Lab.

Следуя работам [96; 97], в цветовой модели Lab разница цвета вычисляется как показатель  $\Delta E_{abi}$  по формуле, которая рекомендована Международной комиссией по освещению [123]:

$$\Delta E_{abi} = \sqrt{(L_i - L_r)^2 + (a_i - a_r)^2 + (b_i - b_r)^2},$$

где  $L_r, a_r, b_r$  — референтные значения, полученные с помощью спектрофотометра для стандартного источника освещения;  $L_i, a_i, b_i$  — значения, полученные с помощью цифрового устройства для *i*-го образца.

В выполненном исследовании в качестве эталонных образцов использованы: **белый** (dEWh\_1 — естественный свет и dEWh\_2 — УФ-свет) и **черный** (dEBI\_1 — естественный свет и dEBI\_2 — УФ-свет). Результаты расчетов представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Расчетные значения  $\Delta E_{abi}$

№ образца	Естественный свет		УФ-свет	
	dEWh_1	dEBI_1	dEWh_2	dEBI_2
1	66,212	17,269	77,879	9,287
2	67,275	15,598	77,923	8,161
3	66,274	16,938	75,624	10,693
4	68,294	15,045	76,316	11,427
5	65,399	17,697	68,077	15,099
6	57,593	26,069	60,554	22,008
7	49,388	34,037	47,982	31,587
8	46,703	36,048	53,433	25,710
9	47,178	35,653	59,819	18,964
10	47,026	36,005	53,621	24,300

#### Анализ результатов обработки

*Методика RGB.* При естественном свете в «нулевом» приближении поиска взаимосвязи параметров построены графики (и тренды) индексов (SI и RI) (на рис. 2.7 представлены графики только индекса RI) в зависимости от температуры и влажности.

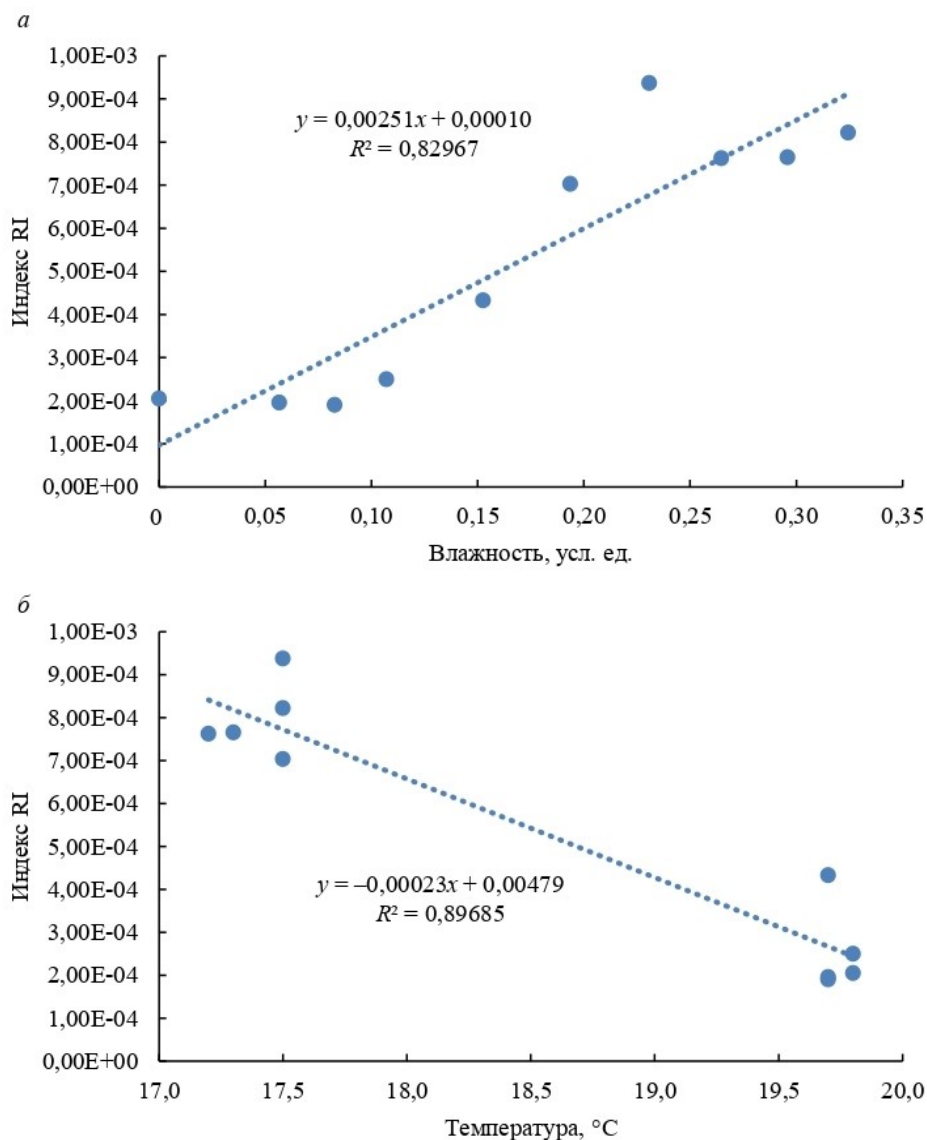
Приравнивая аналитические зависимости индекса  $RI(T)$  и  $RI(w)$  через линейные функции аппроксимации от температуры и влажности, имеем связь между этими физическими параметрами:

$$T = -10,913w + 20,391; \quad w = -0,092T + 1,869.$$

Аналогичная обработка через индекс SI дает следующие результаты:

$$T = -13,456w + 20,863; \quad w = -0,074T + 1,555.$$

При УФ-свете в «нулевом» приближении поиска взаимосвязи параметров также построены графики (и тренды) индексов (SI и RI) (аналоги графиков на рис. 2.7) в зависимости от температуры и влажности.



**Рис. 2.7.** Графики (и тренды) индекса RI при естественном свете в зависимости от влажности (а) и температуры (б)

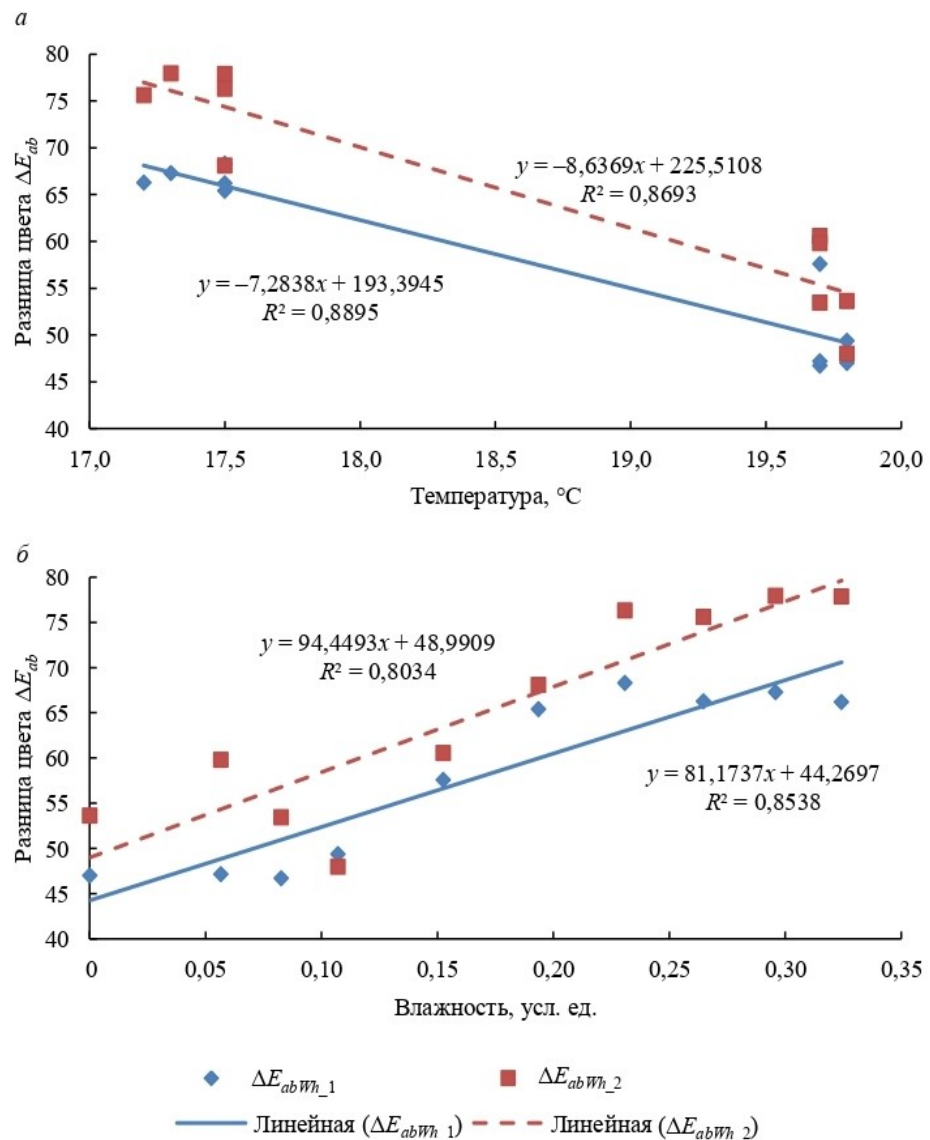
Приравнивая аналитические зависимости индекса  $RI(T)$  и  $RI(w)$  через линейные функции аппроксимации от температуры и влажности, имеем связь между этими физическими параметрами:

$$T = -11,501w + 20,534; \quad w = -0,087T + 1,786.$$

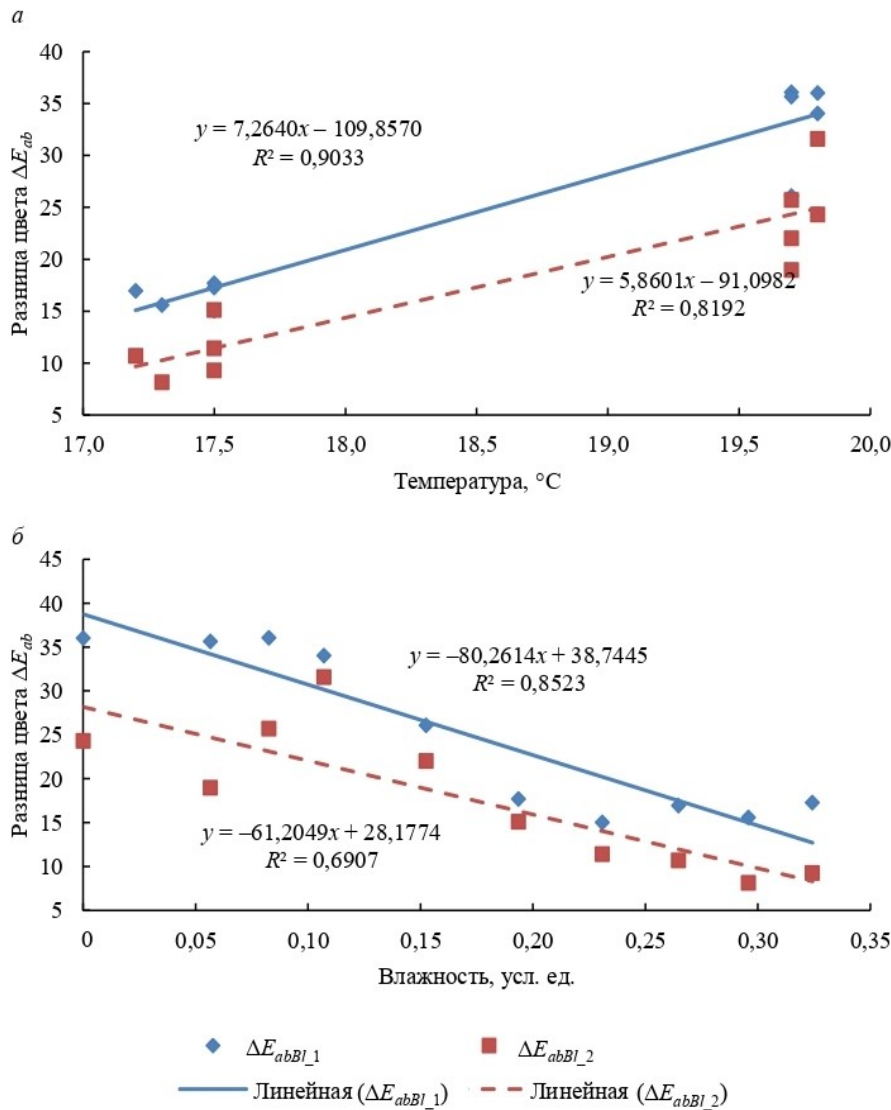
Аналогичная обработка через индекс  $SI$  дает следующие результаты:

$$T = -9,535w + 20,194; \quad w = -0,105T + 2,118.$$

*Методика Lab.* В «нулевом» приближении поиска взаимосвязи параметров построены графики (и тренды) показателю  $\Delta E_{abi}$  в зависимости от температуры и влажности (рис. 2.8 и 2.9 и введенные ранее обозначения).



**Рис. 2.8.** Расчетные значения показателя  $\Delta E_{abi}$  в зависимости от температуры (а) и влажности (б) образцов при белом эталоне



**Рис. 2.9.** Расчетные значения показателя  $\Delta E_{abi}$  в зависимости от температуры (а) и влажности (б) образцов при черном эталоне

Приравнивая соответствующие значения  $\Delta E_{abi}$  через функции аппроксимации от температуры и влажности, имеем связь между этими физическими параметрами.

При естественном свете (эталон — белый):

$$T = -11,144w + 20,474; \quad w = -0,089T + 1,837.$$

При естественном свете (эталон — черный):

$$T = -11,049w + 20,457; \quad w = -0,091T + 1,852.$$

При УФ-свете (эталон — белый):

$$T = -10,936w + 20,438; \quad w = -0,091T + 1,869.$$

При УФ-свете (эталон — черный):

$$T = -10,444w + 20,354; \quad w = -0,096T + 1,949.$$

В таблицах 2.6 и 2.7 представлены рассчитанные отклонения коэффициентов  $a$  и  $b$  расчетных линейных зависимостей  $y = ax + b$  от соответствующих коэффициентов экспериментальных функций. Табл. 2.6 соответствует применению естественного света, а табл. 2.7 — использованию УФ-света.

Таблица 2.6

Отклонения коэффициентов  $a$  и  $b$  расчетных линейных зависимостей  $y = ax + b$  от соответствующих коэффициентов экспериментальной функции при естественном свете

Источник данных	Зависимость	$\Delta a, \%$	$\Delta b, \%$
$T = aw + b$			
Эксперимент	$T = -10,122w + 20,299$		
RGB (RI)	$T = -10,913w + 20,391$	<b>0,791 (7,8)</b>	<b>0,092 (0,5)</b>
RGB (SI)	$T = -13,456w + 20,863$	3,334 (32,9)	0,564 (2,8)
Lab (белый)	$T = -11,144w + 20,474$	1,022 (10,1)	0,175 (0,9)
Lab (черный)	$T = -11,049w + 20,457$	<b>0,927 (9,2)</b>	<b>0,158 (0,8)</b>
$w = aT + b$			
Эксперимент	$w = -0,078T + 1,624$		
RGB (RI)	$w = -0,092T + 1,869$	0,014 (18,0)	0,245 (15,1)
RGB (SI)	$w = -0,074T + 1,555$	<b>-0,004 (-5,1)</b>	<b>-0,069 (-4,3)</b>
Lab (белый)	$w = -0,089T + 1,837$	0,011 (14,1)	0,213 (13,1)
Lab (черный)	$w = -0,091T + 1,852$	0,013 (16,7)	0,228 (14,0)

Таблица 2.7

Отклонения коэффициентов  $a$  и  $b$  расчетных линейных зависимостей  $y = ax + b$  от соответствующих коэффициентов экспериментальной функции при УФ-свете

Источник данных	Зависимость	$\Delta a, \%$	$\Delta b, \%$
$T = aw + b$			
Эксперимент	$T = -10,122w + 20,299$		
RGB (RI)	$T = -11,501w + 20,534$	1,378 (13,6)	0,235 (1,2)
RGB (SI)	$T = -9,535w + 20,194$	<b>-0,587 (-5,8)</b>	<b>-0,105 (-0,5)</b>
Lab (белый)	$T = -10,936w + 20,438$	0,814 (8,0)	0,139 (0,7)
Lab (черный)	$T = -10,444w + 20,354$	<b>0,322 (3,2)</b>	<b>0,055 (0,3)</b>
$w = aT + b$			
Эксперимент	$w = -0,078T + 1,624$		
RGB (RI)	$w = -0,087T + 1,786$	<b>0,009 (11,5)</b>	<b>0,162 (10,0)</b>
RGB (SI)	$w = -0,105T + 2,118$	0,027 (34,6)	0,494 (30,4)
Lab (белый)	$w = -0,091T + 1,869$	0,013 (16,7)	0,245 (15,1)
Lab (черный)	$w = -0,096T + 1,949$	0,018 (23,1)	0,325 (20,0)

*Для естественного света* можно отметить следующее.

*Зависимость температуры от влажности:*

минимальные отклонения имеют расчетные зависимости, полученные по RGB-методике для индекса RI и по Lab-методике для черного эталона; абсолютно выбиваются результаты для индекса SI.

*Зависимость влажности от температуры:*

минимальные отклонения имеют расчетные зависимости, полученные по RGB-методике для индекса SI;

остальные результаты чрезвычайно неудачные.

*Для УФ-света* можно отметить следующее.

*Зависимость температуры от влажности:*

минимальные отклонения имеют расчетные зависимости, полученные по RGB-методике для индекса SI и по Lab-методике для черного эталона; результаты по RGB-методике для индекса RI и по Lab-методике для белого эталона менее удачны.

*Зависимость влажности от температуры:*

минимальные отклонения имеют расчетные зависимости, полученные по RGB-методике для индекса RI и по Lab-методике для белого эталона;

результаты по RGB-методике для индекса SI и по Lab-методике для черного эталона также менее удачны.

Таким образом, в условиях естественного освещения (как наиболее реального) при анализе результатов аналогичных лабораторных и натуральных экспериментов для описания зависимости температуры от влажности могут быть рекомендованы к использованию индекс RI и черный эталон в цветовых моделях RGB и Lab соответственно. В то же время для описания зависимости влажности от температуры можно использовать индекс SI в цветовой модели RGB. Кроме того, было бы весьма полезно повысить точность измерения температуры с целью более аккуратного математического описания результатов измерений.

Представляется, что полученный результат дает определенные основания к проведению дальнейших исследований как в лабораторном масштабе с целью изучения динамики значений компонент цветовой модели при изменении температуры поверхности пыления, так и непосредственно на объекте пыления с использованием БПЛА. В частности, в период пыления предстоит выполнить фотографирование поверхности хвостохранилища цифровой и инфракрасной камерами для измерения температуры различных участков поверхности и последующего анализа данных. В качестве эталонов для применения Lab-методики могут быть использованы самые светлые (сухие) и темные (влажные) участки объекта.

Использование цифровых изображений поверхности пляжа хвостохранилищ в перспективе может сделать процедуру принятия решений по нанесению реагентов более оперативной и эффективной.



## Описание программы для анализа фотоизображения

**Назначение программы:** считать количество пикселей фотоизображения и цвет этих пикселей, вывести необходимую информацию об изображении в формате цветовых моделей RGB и Lab после обработки данных.

**Выходная информация:** количество пикселей, значения цветовых компонент в форматах RGB, XYZ, Lab и другие параметры.

### Загрузка и настройка изображения

Загрузка изображения в Unity и настройка его для анализа. Для этого изменяем исходный тип изображения на Sprite (2D and UI), что позволяет Unity воспринимать изображение не просто как картинку, а как объект, с которым можно взаимодействовать.

Размещение изображения в рабочей зоне, которая является объектом типа Raw Image с соответствующим компонентом.

### Код программы

Программа написана по принципам объектно-ориентированного программирования (ООП). Программа логически разбита на части.

#### 1. Анализ изображения и счет пикселей.

Используя метод GetPixels в классе Texture 2D, прочитываем цвет всех пикселей изображения и их количество. Получаем список цветов и находим его длину с помощью метода Length. Далее просматриваем все элементы списка и ищем цвет каждого пикселя, добавляя его в новый массив.

#### 2. Центральное тело.

С использованием встроенного в Unity метода массив цветов переводим из формата Unity Color в HEX.

По формулам [124] переводим цвет в формате HEX в формат RGB и вычисляем среднее арифметическое по каждой компоненте.

#### 3. Вспомогательные классы и методы.

Реализуем два класса: класс XYZ, который принимает цвет в формате RGB, и класс Lab, который принимает цвет в формате XYZ.

Класс XYZ: в классе созданы три поля  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , которые хранят соответствующие компоненты. В классе присутствует конструктор, который принимает цвет в RGB и по формулам [125] преобразует компоненты в цвет в формате  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и записывает их в поля объекта.

Класс Lab: в классе Lab имеется три поля  $L$ ,  $a$ ,  $b$ , которые хранят соответствующие компоненты. В классе присутствует конструктор, который принимает в себя цвет в формате XYZ и по формулам [126] преобразует компоненты в цвет в формате  $L$ ,  $a$ ,  $b$  и записывает их в поля объекта.

## Выводы по главе 2

Определены инженерно-геологические свойства (гранулометрический и минеральный составы, плотность, влажность и др.) поверхностного слоя (глубиной до 15 см) хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд. Установлено, что содержание фракции  $< 0,05$  мм в поверхностном слое хвостохранилищ составляет  $> 5$  %.

Определена динамика концентраций минеральных частиц малого размера ( $PM_{2.5}$  и  $PM_{10}$ ) в пробах приземного слоя атмосферного воздуха в черте города Апатиты, которые являются одним из наиболее существенных факторов влияния загрязненного воздуха на здоровье населения. В течение летнего периода 2022 г. на основе ежедневных замеров в атмосферном воздухе города Апатиты отмечено несколько случаев превышения ПДК<sub>м.р.</sub>.

На связь загрязнения атмосферного воздуха с пылением поверхности хвостохранилища указывает наличие в пробах пыли минерала содалита, характерного компонента апатит-нефелиновых руд.

Основная составляющая проб пыли содержит минеральные частицы подстилающих пород, выбросов транспорта и городских технических объектов. Наряду с поверхностью хвостохранилищ значительную долю в загрязнение атмосферного воздуха в городской черте вносят выбросы транспорта, объектов тепловой энергетики, технической инфраструктуры, промышленных предприятий, полигоны ТКО. Суммарный эффект воздействия всех источников загрязнения атмосферы приводит к повышению частоты случаев превышения ПДК<sub>м.р.</sub> в приземном атмосферном слое на территории города Апатиты.

Требуется совершенствование методов закрепления пылящих поверхностей хвостохранилищ, а также оптимизация технологических процессов, позволяющая сокращать выбросы промышленной и технической инфраструктуры в черте города.

Представлены результаты исследований по определению количественной взаимосвязи температуры и влажности материалов хвостов обогащения на базе анализа цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов посредством методик RGB и Lab. Используются пробы поверхностного слоя хвостохранилища АНОФ-2 (город Апатиты, Мурманская область).

Рассмотрены два вида освещения: естественный и УФ-свет. В методике RGB проанализированы индексы насыщения и покраснения, в методике Lab использованы два эталона — белый и черный.

В качестве «нулевого» приближения исследована простейшая (линейная) аналитическая зависимость температуры от влажности и наоборот. Выполнено сравнение коэффициентов расчетных линейных зависимостей с соответствующими коэффициентами прямой обработки экспериментальных данных.

Показано, что при естественном освещении:

минимальные отклонения коэффициентов расчетной зависимости температуры от влажности соответствуют использованию индекса покраснения в RGB-методике и черного эталона в Lab-методике;

минимальные отклонения коэффициентов расчетной зависимости влажности от температуры соответствуют использованию индекса насыщения в RGB-методике.

Продемонстрировано, что при УФ-свете:

минимальные отклонения коэффициентов расчетной зависимости температуры от влажности соответствуют использованию индекса насыщения в RGB-методике и черного эталона в Lab-методике;

минимальные отклонения коэффициентов расчетной зависимости влажности от температуры соответствуют использованию индекса покраснения в RGB-методике и белого эталона в Lab-методике.

Указанные индексы и цвета эталонов могут быть рекомендованы при обработке подобных лабораторных и натуральных экспериментов.

Намечены пути дальнейших исследований в лабораторном и натурном масштабах. Использование цифровых изображений поверхности пляжа хвостохранилищ в перспективе может сделать процедуру принятия решений по нанесению реагентов более оперативной и эффективной.

### **ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЫЛЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА И ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ (НА ПРИМЕРЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩА АНОФ-2 И ГОРОДА АПАТИТЫ)**

Современный уровень технологического развития добычи полезных ископаемых основывается на разрушении вещества литосферы за счет использования механической энергии или энергии взрыва, что неизбежно приводит к формированию мощного потока минеральной пыли, выбрасываемой добывающими предприятиями в атмосферу. Взаимодействие горного производства с атмосферой Земли предусматривает активное использование ее ресурсных, транзитных и депонирующих функций. В экологическом плане это взаимодействие распадается на две составляющие: рудничная вентиляция и загрязнение атмосферы техногенными аэрозолями [127]. Именно вторая составляющая и находится в центре внимания авторов монографии. Доминирующие в настоящее время технологические решения формируют однотипную качественную структуру состава техногенных аэрозолей, поступающих в атмосферу Земли при работе горно-обогатительного предприятия. При этом характерной особенностью горно-обогатительного производства является существование вторичных источников загрязнения атмосферы. Среди последних ведущее место занимают источники техногенных загрязнителей, существующие за пределами комплекса добычных работ и первичной переработки добытого полезного ископаемого (например, отвалы вскрышных пород и забалансовых руд, хвостохранилища, транспортные коммуникации и др.). В отчете “Global assessment of sand and dust storms” Генеральной Ассамблеи ООН [76] пыление от техногенных песчаных поверхностей (хвостохранилища и пр.) указывается как одна из важных проблем атмосферного загрязнения населенных пунктов.

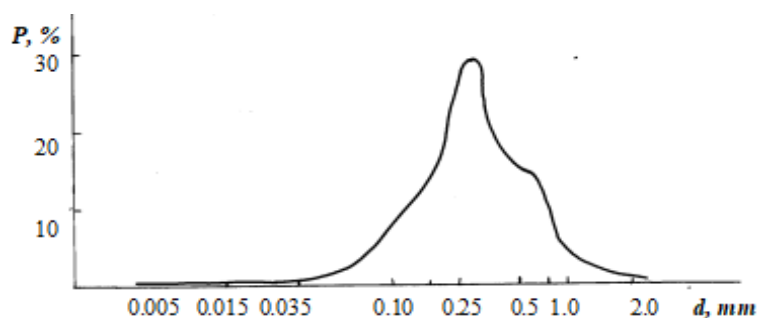
#### **3.1. Предыстория исследований процессов пыления на хвостохранилище АНОФ-2 и загрязнения атмосферы на базе компьютерного моделирования**

##### **3.1.1. Исследования 1980–2000-х годов**

Работы по применению методов численного моделирования для исследования процессов пыления хвостохранилища АНОФ-2 явились в определенной мере естественным продолжением ранее выполненных в институте изысканий. В 1980–1990-х гг. сотрудники КНЦ РАН под руководством А. А. Бакланова [128–130] провели исследования, связанные с численным моделированием процесса рассеяния пыли на ближайшем к городу Апатиты хвостохранилище. При этом расчеты выполнялись по авторским моделям и компьютерным программам, в которых уравнения, описывающие процессы аэротермогазодинамики решались конечно-разностными методами на неравномерных прямоугольных сетках.

Представленные в работах [128; 129] результаты моделирования во многом опирались на многолетний экспериментальный материал сотрудников КФ АН СССР по объекту пыления, обобщенный в отчетном материале [131]. В частности, показано, что пески хвостохранилища АНОФ-2 представляют собой рыхлый, несцементированный зернистый материал неправильной формы.

Твердая компонента пульпы представлена в основном нефелином, эгирином и другими сопутствующими минералами. Гранулометрический состав пульпы (рис. 3.1), соответствующий используемым на тот момент технологиям, представлен преимущественно фракциями частиц от 0,1 до 1,0 мм при среднем диаметре 0,34 мм. Из функции распределения видно, что интервал размеров частиц лежит в пределах от нескольких микрон до 2 мм, но предел колебания по объему зерен более значителен.



**Рис. 3.1.** Функция распределения количества частиц по их размерам для нефелиновых хвостов [129]

Определение количества срывааемых воздушным потоком частиц пыли с поверхности является сложной теоретической задачей. Отрыв частиц с поверхности происходит с помощью двух основных механизмов [132]: за счет напряжения трения Рейнольдса и за счет захвата взлетевшими частицами других частиц с поверхности. При движении большого количества частиц в воздушном потоке турбулентная энергия потока существенно уменьшается за счет затрат на отрыв и поддержание частиц в воздухе. Поэтому распространение частиц и движение самого потока должны рассматриваться взаимосвязано. Как показано в [133], если работа потока на взвешивание частиц мала и частицы достаточно долго пребывают в потоке, а не сальтируют (путем последовательных подскоков и падений на поверхность), распространение таких частиц можно исследовать на основе диффузионной теории. Математически это условие можно описать неравенством  $w_g / (\kappa \cdot u_*) < 1$ , где  $w_g$  — скорость осаждения частиц;  $\kappa$  — постоянная Кармана;  $u_*$  — динамическая скорость.

При движении частицы диффундируют за счет турбулентных пульсаций и испытывают влияние сил тяжести и сопротивления воздуха. Скорость оседания частиц на землю часто определяют из закона Стокса [129]  $w_g = \alpha \cdot \rho_d \cdot r_d^2$ , где  $\alpha = 0,013 \cdot 10^{-8}$ ;  $\rho_d$  — плотность частиц пыли, кг/м<sup>3</sup>;  $r_d$  — радиус частиц, мкм. Поскольку диапазон размеров срывааемых и переносимых частиц обычно достаточно широк, то уравнения переноса приходится применять для нескольких интервалов размеров частиц пыли.

Более аккуратно зависимость порогового диаметра частиц  $d_{crit}$  (мкм) может быть определена из соотношения  $d_{crit} = 2\sqrt{\kappa \cdot u_* / (\alpha \cdot \rho_d)}$ . В частности, для оценки загрязнения атмосферы в районе хвостохранилища АНОФ-2 в работе [129] предложено ограничиться частицами размером до 200 мкм.

Из соображений размерности теоретически определить интенсивность пыления для конкретных условий и частиц очень трудно. Большинство исследователей XX столетия определяли эту величину на основе эмпирических оценок.

Для получения более четкого представления о формализации интенсивности пыления песчаной поверхности авторами отчетного материала [131] выполнено на основе препринта Г. И. Баренблата и Г. С. Голицина [132] сравнение результатов наблюдений различных авторов:

$$q = 2 \cdot 10^{-4} \cdot V_{1,0}^{4,63} \text{ (Г·мин}^{-1}\text{)} \text{ А. А. Комаров, З. Е. Альтшулер; } \quad (3.1.1.1)$$

$$q = 0,053 \cdot (V_{1,0} - 4)^3 + 0,054 \text{ (Г·мин}^{-1}\text{)} \text{ М. Б. Бельгибаев, О. Е. Семенов; } \quad (3.1.1.2)$$

$$q = 1,07 \cdot 10^{-5} \cdot V_{1,0}^5 \text{ (Г·см}^{-1}\text{·мин}^{-1}\text{)} \text{ Б. Н. Сенкевич; } \quad (3.1.1.3)$$

$$q = 0,008 + 0,013 \cdot V_{0,05} \text{ (кг·м}^{-1}\text{)} \text{ С. М. Талалаев; } \quad (3.1.1.4)$$

$$q = 0,0295 \cdot V_{1,0}^3 \text{ (Г·м}^{-1}\text{·с}^{-1}\text{)} \text{ Б. В. Иванов; } \quad (3.1.1.5)$$

$$q = 0,0334 \cdot (1 - 4/V_{1,0}) \cdot V_{1,0}^3 \text{ (Г·м}^{-1}\text{·с}^{-1}\text{)} \text{ А. К. Дюнин; } \quad (3.1.1.6)$$

$$q = V_{10}^{(0,35V_{10}-1,35)} / f^{(0,14V_{10}-0,24)}, \text{ если } V = 3 \div 9 \text{ м·с}^{-1}, \text{ (МГ·м}^{-2}\text{·с}^{-1}\text{)} \text{ и}$$

$$q = V_{10}^{(0,145V_{10}+0,95)} / f^{(0,15V_{10}+0,49)} + V_{10}^{(0,25V_{10}+0,3)} / 2,3^{(0,05V_{10}+0,23)},$$

$$\text{если } V = 9 \div 15 \text{ м·с}^{-1}, \text{ В. Г. Борисов; } \quad (3.1.1.7)$$

$$q = 0,011 \cdot V_{1,0}^{3,5} - 0,68 \text{ (Г·см}^{-1}\text{·с}^{-1}\text{)} \text{ А. А. Комаров; } \quad (3.1.1.8)$$

$$q = 0,092 \cdot V_{1,0}^3 \text{ (Г·м}^{-1}\text{·с}^{-1}\text{)} \text{ Д. М. Мельник; } \quad (3.1.1.9)$$

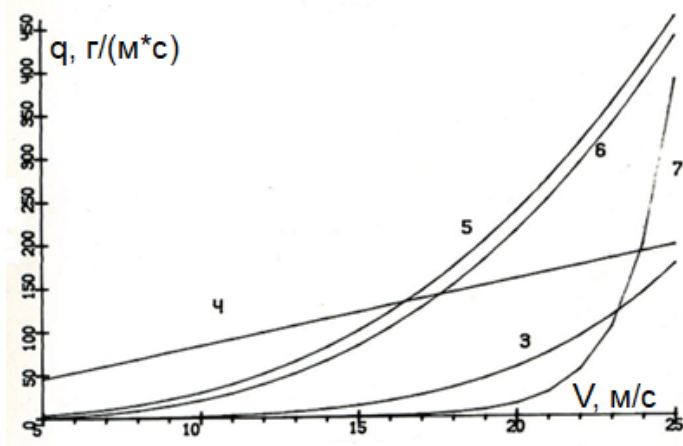
$$q = 0,16 \cdot (V_{1,0} - 4,1)^3 \text{ (Г·м}^{-1}\text{·с}^{-1}\text{)} \text{ Р. С. Закиров, } \quad (3.1.1.10)$$

где  $V_{0,05}$ ,  $V_{1,0}$ ,  $V_{10}$  — скорость ветра на высоте измерения: 0,05; 1,0 и 10,0 м;  $f$  — влажность почвы, %.

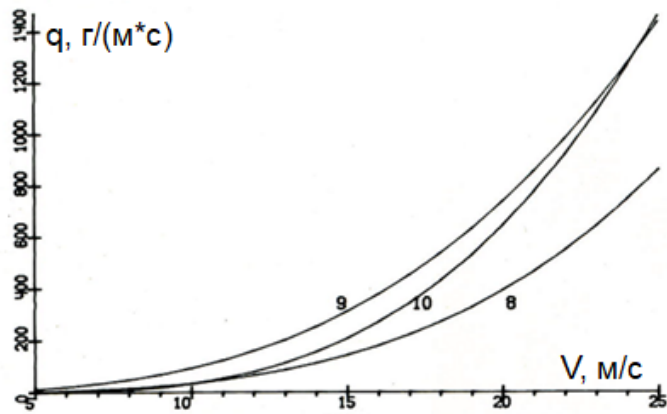
Анализ эмпирических зависимостей интенсивности пыления исходя из скорости ветра, полученных различными авторами (после приведения скорости ветра к одной высоте в соответствии с логарифмическим распределением и интенсивности к единым единицам измерения,  $\text{Г·м}^{-1}\text{·с}^{-1}$ ), показывал, что, при наличии общих закономерностей степенного увеличения интенсивности пыления от скорости ветра, количественно они дают достаточно большой разброс значений (рис. 3.2 (числа у графиков соответствуют последним цифрам номера формул)).

Это объясняется различными условиями натуральных наблюдений, различной плотностью переносимого материала, использованием разных приборов. Кроме того, вносит свой вклад и высота измерения скорости ветра.

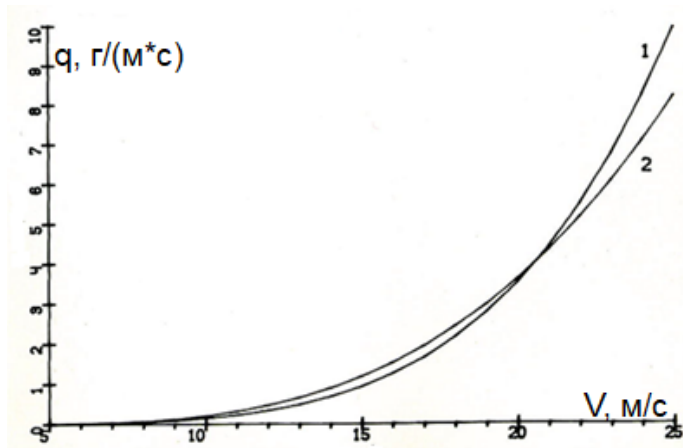
Наиболее близки зависимости интенсивности пыления (3.1.1.3)–(3.1.1.7). Именно они наиболее реально отражают процесс срывания частиц пыли с поверхности. Формула (3.1.1.4), в силу линейной зависимости от скорости ветра, может использоваться только в диапазоне скоростей 16–24 м/с. К сожалению, все формулы (за исключением (3.1.1.7)) не принимают во внимание влажность песков.



a



б



в

Рис. 3.2. Зависимость интенсивности пыления хвостохранилищ от скорости ветра (см. формулы (3.1.1.1)–(3.1.1.10)) [131]



Представляется, что интенсивности пыления пляжей хвостохранилищ должны определяться для конкретных типов песков различных месторождений в разных отраслях горной промышленности, так как они во многом определяются составом, формой частиц, их плотностью, влажностью песков и другими факторами. Так, известно, что песчинки пустынь значительно отшлифованы, спектр их распределения уже, а техногенные пески горных предприятий, как правило, неправильной формы, их сцепляемость выше.

Большинство из приведенных формул и численные данные измерений для различных хвостохранилищ могут быть объединены в обобщенную зависимость интенсивности пыления от скорости ветра и влажности песков ( $\text{г} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ):

$$q = a_0 \cdot V_{10}^{a_1} \cdot f^{a_2} + a_3. \quad (3.1.1.11)$$

Коэффициенты  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  определяются характеристиками песков и состоянием поверхности хвостохранилища. Например, автор диссертации [134] на основе анализа экспериментальных данных удельной сдуваемости угольной пыли с поверхности хвостохранилища углеобогажительных фабрик на базе двух методов получил следующие наборы коэффициентов:

$a_0 = 0,0268$ ;  $a_1 = 4,61$ ;  $a_2 = -0,872$ ;  $a_3 = 0$  (метод множественного регрессионного анализа [134, с. 66]);

$a_0 = 0,0083$ ;  $a_1 = 5,491$ ;  $a_2 = -0,7267$ ;  $a_3 = 0$  (метод нелинейного регрессионного анализа (алгоритм поиска Марквардта) [134, с. 68]).

На основе анализа результатов численных экспериментов авторами работ [128; 129] были построены графики скорости ветра и коэффициента ветра на высоте пляжа хвостохранилища в зависимости от высоты пляжа и угла откоса. Было показано, что в соответствии со степенным законом изменения интенсивности пыления от скорости при увеличении высоты пляжа пыления резко увеличивается срыв частиц с его поверхности. Рис. 3.3 представляет графическую зависимость интенсивности пыления от высоты пляжа при описании интенсивности пыления по формулам (5, Иванов — 3.1.1.5) и (7, Борисов — 3.1.1.7).

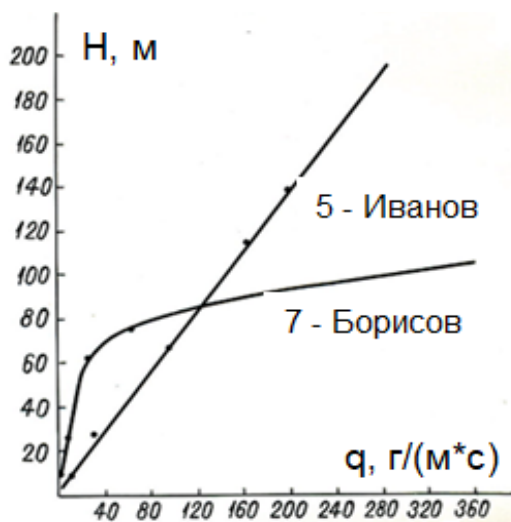
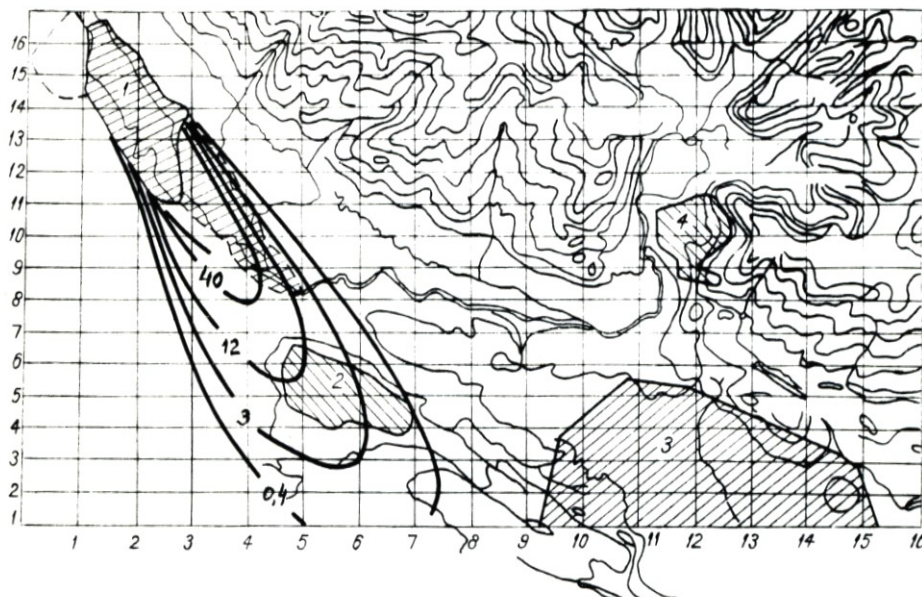


Рис. 3.3. Функциональные зависимости интенсивности пыления и высоты дамбы

Авторы монографии не приводят здесь детального описания формулировки математической модели и результаты расчетов скоростных полей и пространственно-временных распределений концентрации пыли, полученных по моделям, подробно описанным в работах [128–130], а отсылают заинтересованных читателей непосредственно к первоисточникам. А в качестве примера на рис. 3.4 представлен вариант прогноза запыленности района со сложной орографией при развитии хвостохранилища (изолиниями отмечена концентрация пыли в нижнем слое атмосферы при фоновой скорости ветра 5 м/с).



**Рис. 3.4.** Изолинии приведенной концентрации пыли в районе хвостохранилища для неблагоприятных метеоусловий [131]

### **3.1.2. Двухмерное CFD-моделирование процессов загрязнения атмосферы мультidisперсной примесью**

Примерно в 2011 г. сотрудники КНЦ РАН вернулись к задаче моделирования процессов переноса пыли. Проблемы пыления от хвостохранилищ продолжала оставаться актуальной. Для моногородов (например, Апатиты Мурманской области) вопрос пыления время от времени выходит на первое место по обсуждаемости как среди населения города, так и среди специалистов градообразующих предприятий (АО «Апатит») и представителей научной общественности в лице сотрудников КНЦ РАН. Некоторое время на сайте города Апатиты функционировала обновляемая страничка по данной проблеме [135].

За прошедшие годы сделан существенный прогресс в разработке моделей и компьютерных кодов, позволяющих выполнять расчеты процессов распространения загрязнений в разных средах. Примерами таких программ можно указать PHOENICS, PORFLOW, AQUA3D, COMSOL, ANSYS FLUENT, FLOWVISION и др.

Задача, посвященная прогнозу рассеяния пыли от ближайшего к городу Апатиты хвостохранилища в связи с изменением его высоты до максимальной высотной отметки, приобрела новую актуальность. Авторы, возвращаясь

к обозначенной проблеме, попытались промоделировать указанный процесс с помощью интегрированной математической модели атмосферной динамики и переноса мультidisперсной пыли, реализованной на основе современной компьютерной программы COMSOL [136].

Основная цель исследования — оценить влияние высоты пляжа пылящей поверхности на потенциальное загрязнение воздушной среды при переносе сдуваемой сильным ветром мультidisперсной пыли.

Работоспособность построенного моделирующего «инструмента» первоначально было решено проверить на двухмерной задаче.

### ***Вариация высоты хвостохранилища***

*Постановка задачи.* Численные эксперименты по расчету аэродинамических параметров обтекания и конвективно-диффузионного переноса примеси выполнены на численной модели в плоской постановке с использованием программы COMSOL [136]. Размер моделируемой области  $3000 \times 300$  м. Расчет аэродинамики с заданием необходимых начальных и граничных условий выполнен на базе ( $k$ - $\epsilon$ )-модели турбулентности. Значение горизонтальной скорости на входной и верхней границах модели выбрано равным 20 м/с. Высота пляжа хвостохранилища варьировалась от 20 до 40 м с шагом 10 м. Поверхность за объектом пыления моделируется плоской.

Интенсивность пыления на поверхности пляжа хвостохранилища промоделирована для двух ситуаций:

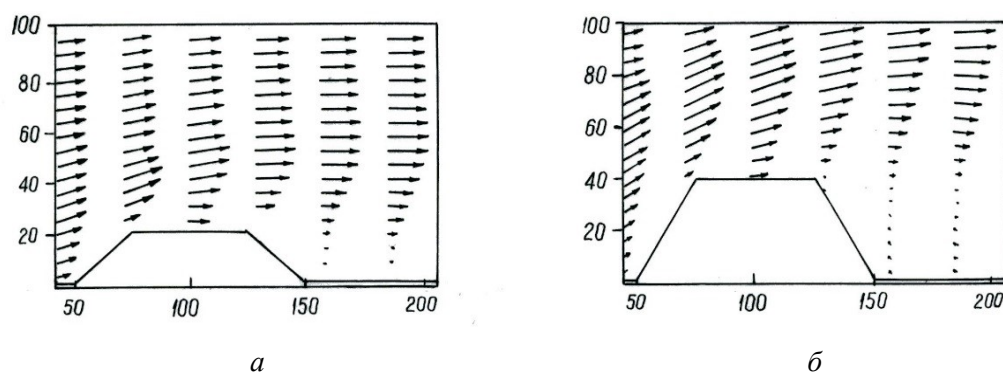
1-я ситуация: независимо от высоты пляжа задавалась постоянная интенсивность пыления 27 г/(м $\cdot$ с);

2-я ситуация: принята во внимание линейная зависимость интенсивности пыления от высоты (см. рис. 2.3) — 27, 42 и 57 г/(м $\cdot$ с) — на указанных ранее высотах пляжа.

В качестве оседающей примеси рассматривались три возможных типа загрязнения: пассивная примесь с нулевой скоростью оседания; мелкодисперсная пыль с очень малой скоростью оседания на уровне 0,005 м/с; частицы пыли размером (по радиусу) порядка 6 мкм, когда скорость оседания в приближении Стокса составляет 0,01 м/с.

*Анализ результатов расчетов.* Высокая скорость ветрового переноса и турбулентного перемешивания обеспечивает быстрый выход пространственного распределения загрязнений на стационарный режим.

Отметим отчетливые изменения в структуре поля скорости для различных высот хвостохранилища, особенно в непосредственной близости, за пляжем хвостохранилища, где прогнозируется образование вихревых течений. В качестве примера на рис. 3.5, *а* и *б* представлены фрагменты поля скорости непосредственно за пляжем хвостохранилища для минимальной и максимальной высоты объекта (20 и 40 м). Несомненно, изменение структуры потока воздуха должно привести к определенным видоизменениям пространственного распределения загрязнений.



**Рис. 3.5.** Структура поля скорости вблизи пляжа хвостохранилища при вариации его высоты (м):  
*a* — 20; *б* — 40

Вблизи пляжа хвостохранилища (область отрывных течений) имеют место максимальные значения концентрации загрязнений. Например, для скорости оседания 0,01 м/с значения максимальных концентраций пыли с ростом высоты пляжа хвостохранилища (20, 30, 40 м) равны следующим величинам: 1-я ситуация — 10,06; 11,85; 10,59 г/м<sup>3</sup> и 2-я ситуация — 10,06; 18,42; 22,36 г/м<sup>3</sup> соответственно.

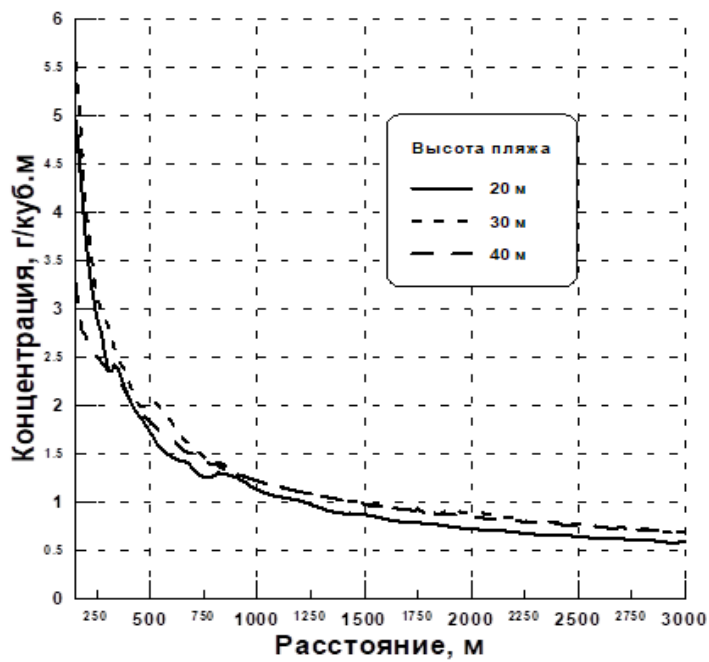
Указанная особенность более существенного скачка максимальной концентрации пыли при высоте хвостохранилища в 30 м отчетливо повторяется и на кривых (рис. 3.6, *a* и *б*), демонстрирующих распределение загрязнения вдоль горизонтальной оси на высоте человеческого роста (примерно 2 м).

Как видно на рис. 3.6, *a* и *б*, на высоте 2 м непосредственно вблизи пляжа хвостохранилища высотой 30 м прогнозируется заметно более высокое значение концентрации пыли (1-я ситуация ~ 5,6 г/м<sup>3</sup> и 2 ситуация ~ 8,6 г/м<sup>3</sup>), чем при высотах 20 м (1-я ситуация ~ 4,9 г/м<sup>3</sup> и 2-я ситуация ~ 5,0 г/м<sup>3</sup>) и 40 м (1-я ситуация ~ 3,3 г/м<sup>3</sup> и 2-я ситуация ~ 6,9 г/м<sup>3</sup>) м. Причиной указанного факта являются различия в структуре скоростных потоков непосредственно за пляжем хвостохранилища (о чем указывалось ранее).

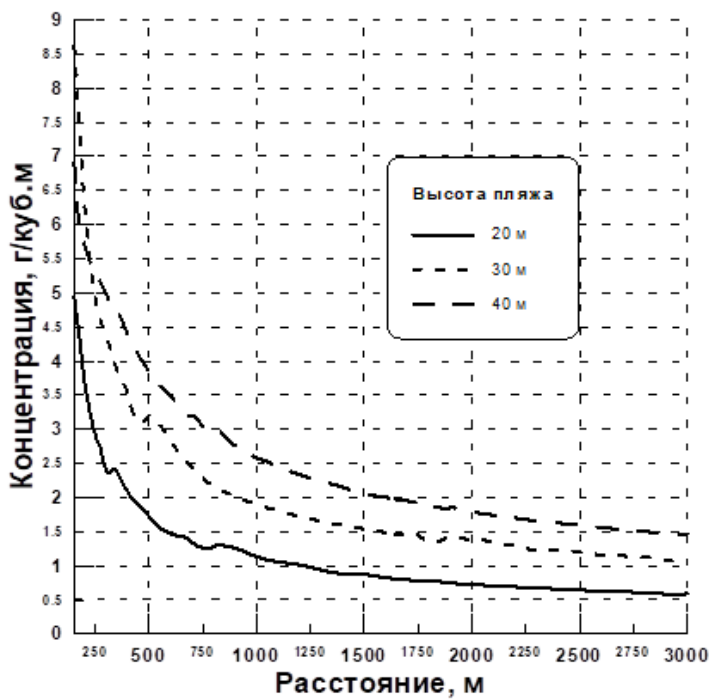
По мере удаления от хвостохранилища (около 100 м) устанавливается стабильное превышение концентрации примеси, отвечающей большим высотам пляжа. Но если в 1-й ситуации указанное превышение не столь значимо, то во 2-й ситуации (увеличение интенсивности пыления с высотой) кривые, соответствующие высотам 30 и 40 м, располагаются на графике существенно выше.

Некоторые количественные показатели концентрации загрязнения воздуха (высота 2 м от поверхности) на различных расстояниях от источника пыления при вариации скорости оседания приведены в табл. 3.1.

Как видно из представленного анализа, имеется заметное различие в полученных результатах. Причем недоучет физических зависимостей (интенсивность пыления от высоты) приводит к недооценке потенциальной опасности в «дальней» зоне и переоценке опасности в «ближней» зоне таких объектов для окружающей среды.



*a*



*б*

**Рис. 3.6.** Зависимость концентрации примеси со скоростью оседания 0,01 м/с на высоте 2 м вдоль горизонтальной оси при вариации высоты пляжа: *a* — 1-я ситуация; *б* — 2-я ситуация

Таблица 3.1

Концентрация примеси в фиксированных точках расчетной сетки при вариации скорости оседания примеси (высотная отметка 2 м), г/м<sup>3</sup>

Высота пляжа хвостохранилища	Скорость оседания 0,000 м/с			Скорость оседания 0,005 м/с			Скорость оседания 0,010 м/с		
	Координаты точек, м			Координаты точек, м			Координаты точек, м		
	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
	1-я ситуация								
20 м	1,118	0,711	0,579	1,123	0,716	0,584	1,129	0,722	0,590
30 м	1,204	0,875	0,683	1,212	0,882	0,690	1,219	0,889	0,696
40 м	1,209	0,835	0,682	1,215	0,841	0,688	1,413	0,847	0,694
	2-я ситуация								
20 м	1,118	0,711	0,579	1,123	0,716	0,584	1,129	0,722	0,590
30 м	1,874	1,362	1,063	1,884	1,372	1,073	1,895	1,383	1,083
40 м	2,552	1,763	1,440	2,565	1,775	1,453	2,578	1,787	1,466

Сравнение показателей загрязнения, приведенных в табл. 3.1 и на рис. 3.б, а и б, позволяет для рассмотренных ситуаций утверждать следующее:

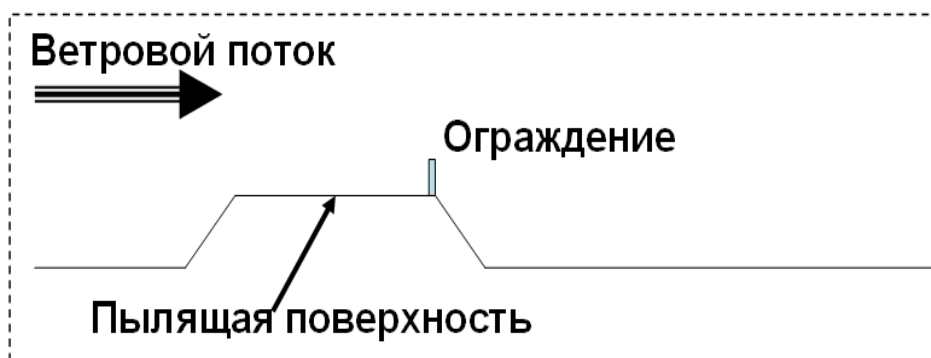
1-я ситуация	2-я ситуация
С ростом высоты пляжа хвостохранилища прогнозируется увеличение концентрации примеси по направлению воздушного потока на расстояниях более 300 м от источника	100 м от источника
В абсолютных величинах увеличение концентрации пыли на расстояниях более 1000 м при удвоении высоты хвостохранилища не превышает коэффициент 1,2	превышает коэффициент 2
В относительных единицах максимальный прирост концентрации прогнозируется для высоты хвостохранилища в 30 м (почти 23 % на отметке 2000 м и почти 18 % на расстоянии 3000 м)	В относительных величинах увеличение концентрации пыли в воздухе на различных расстояниях от хвостохранилища при вариации его высоты составляет от ~ 50 до ~ 150 %
В «ближней» зоне хвостохранилища отсутствует однозначность увеличения опасности загрязнения атмосферы с ростом высоты пляжа	Заметное увеличение уровня опасности указывает на возможность возникновения пылевых бурь и на необходимость для реальных объектов пыления (например, хвостохранилища вблизи города Апатиты) аккуратных оценок при принятии ответственных решений по изменению высоты пляжа

Таким образом, рост высоты пляжа хвостохранилища всего на 20 м существенным образом увеличивает концентрацию пыли на уровне человеческого роста вниз по потоку движения воздуха. А значит, при принятии решения по изменению высоты пляжа на объектах пыления должны быть сделаны аккуратные оценки прогноза негативного воздействия на окружающую среду.

Результаты исследований прошли апробацию в докладах на российских и международных конференциях [137–140].

### **Влияние высоты ограждения пылящей поверхности на загрязнение атмосферы**

В процессе представления результатов исследований на различных семинарах и конференциях часто возникали вопросы о возможностях снижения загрязнения, в том числе и с использованием инженерных решений. В качестве примера использования инженерных мероприятий по снижению пыления авторы проанализировали влияние высоты ограждения пылящей поверхности хвостохранилища на загрязнение атмосферы (автор идеи — академик РАН Н. Н. Мельников). Речь идет об ограждении с подветренной стороны пляжа хвостохранилища (рис. 3.7).



**Рис. 3.7.** Схематичное изображение обсуждаемой модели

По сути, идея не является новой и сам принцип давно и успешно используется, например, для защиты дорог от снежных заносов.

*Постановка задачи.* Численные эксперименты по расчету аэродинамических параметров обтекания и адвективно-диффузионного переноса примеси выполнены на численной модели в плоской постановке с использованием программы COMSOL [136]. Математическая сторона вопроса в полной мере представлена в более ранних работах авторов [128; 137; 140; 141], поэтому ограничимся исключительно описанием необходимых для расчета исходных данных.

Размер моделируемой области  $3000 \times 300$  м. Расчет аэродинамики с заданием необходимых начальных и граничных условий выполнен на базе  $(k-\epsilon)$ -модели турбулентности. Численные эксперименты выполнены при значении горизонтальной компоненты скорости на входной и верхней границах модели, равной 20 м/с.

Высота пляжа хвостохранилища зафиксирована на уровне 40 м. Высота моделируемого ограждения, обустройстваемого с подветренной стороны пляжа (см. рис. 3.7), варьировалась от 0 м (отсутствие ограждения) до 2 м с шагом 0,5 м. Поверхность за объектом пыления принята плоской.

Интенсивность пыления на поверхности пляжа хвостохранилища высотой 40 м принята равной  $57 \text{ г}/(\text{м}\cdot\text{с})$ , что соответствует линейной зависимости Б. В. Иванова (см. рис. 3.3). Необходимо заметить, что, принимая величину интенсивности пыления постоянной вне зависимости от высоты ограждения, авторы тем самым оценивают влияние барьера на пространственное

распределение загрязнения лишь через изменение структуры турбулентного потока за хвостохранилищем. Вместе с тем, авторы понимают, что в общем случае необходимо принимать во внимание и фактор влияния высоты ограждения на интенсивность пыления с поверхности хвостохранилища, особенно в той зоне пляжа, где изменения поля скорости будут наиболее существенными.

В качестве оседающей примеси рассматривались два возможных типа загрязнения: мелкодисперсная пыль с малой скоростью оседания на уровне 0,01 м/с и частицы пыли размером (по радиусу) порядка 13 мкм, когда скорость оседания в приближении Стокса составляет 0,05 м/с.

*Анализ результатов расчетов.* Высокая скорость ветрового переноса и турбулентного перемешивания обеспечивает быстрый выход пространственного распределения загрязнений на стационарный режим. По этой причине обе задачи (аэродинамическая и переносная) решались как стационарные.

В первую очередь отметим отчетливые изменения в структуре поля скорости для различных высот ограждения. Особенно это проявляется в непосредственной близости за пляжем хвостохранилища, где прогнозируется образование вихревых течений. Причем структура разномасштабных вихреобразований неодинакова. В качестве примера на рис. 3.8, представлены фрагменты (1000 × 300 м) поля скорости и линий тока непосредственно за пляжем хвостохранилища для трех высот ограждения: 0,0; 0,5 и 1,0 м соответственно. На всех приведенных рисунках изображение векторов скорости и линий тока производилось при задании одинаковых параметров.

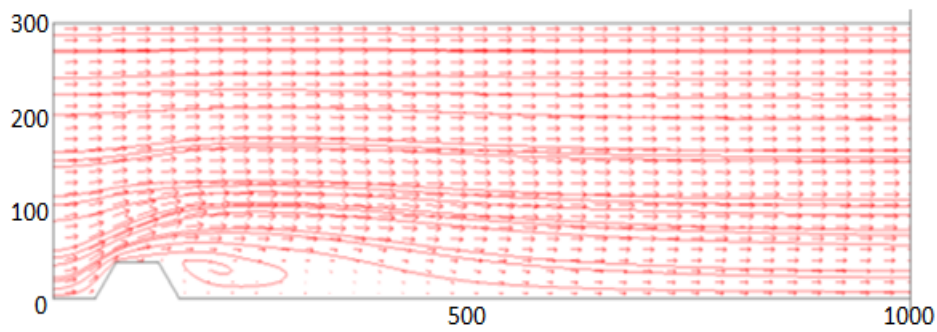
Несомненно, изменение структуры потока воздуха должно привести к определенным видоизменениям пространственного распределения загрязнений. Наиболее существенные изменения в распределении концентрации загрязнения следует ожидать именно в областях заметной модификации структуры поля скорости (см. поведение линий тока непосредственно за пляжем хвостохранилища на рис. 3.8).

По рисунку 3.9, *а* и *б* можно проследить пространственное распределение концентрации загрязнения вниз по ветровому потоку на высоте 2 м от поверхности в зависимости от высоты ограждения с подветренной стороны пылящей поверхности. Прекрасно видно, что определенный положительный эффект снижения уровня загрязнения воздуха за счет использования ограждения достигается. Оценим этот эффект количественно следующим образом: разобьем пространство вниз по потоку на «ближнюю» зону (до отметки 1000 м) и «дальнюю» зону (за отметкой 1000 м).

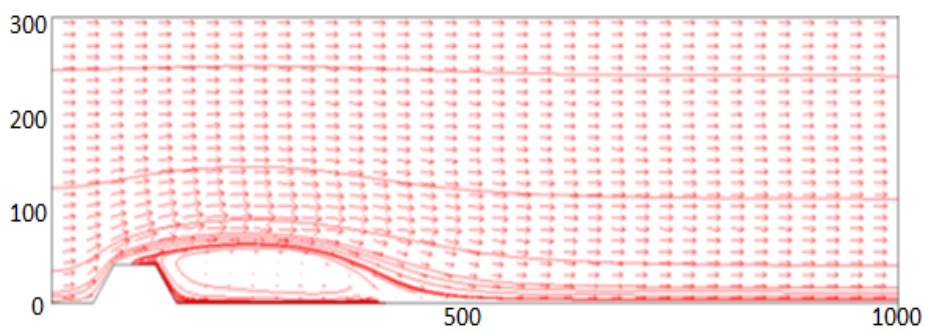
Начнем с «дальней» зоны. Сравним относительное изменение значений концентрации пыли для двух значений скорости оседания на фиксированных расстояниях от пылящей поверхности (табл. 3.2 и 3.3 соответственно) по сравнению с эталонной ситуацией, когда отсутствует ограждение.

Из данных таблиц 3.2 и 3.3 хорошо видно, что максимальное снижение концентрации пыли, достигаемое установкой ограждения с подветренной стороны пылящей поверхности, на различных расстояниях от объекта колеблется в диапазоне 14–20 % (по модулю).

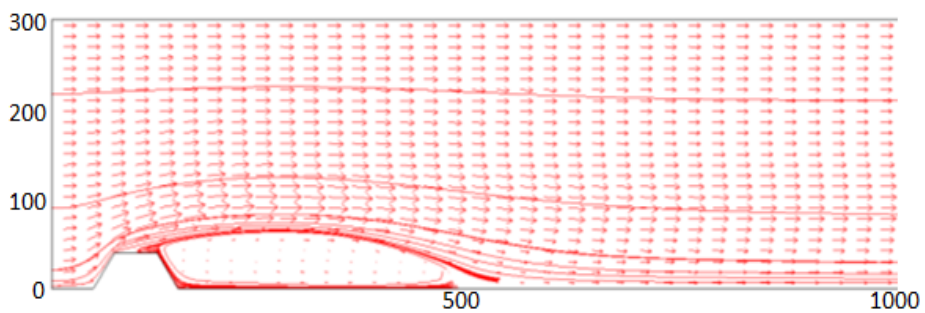




*a*

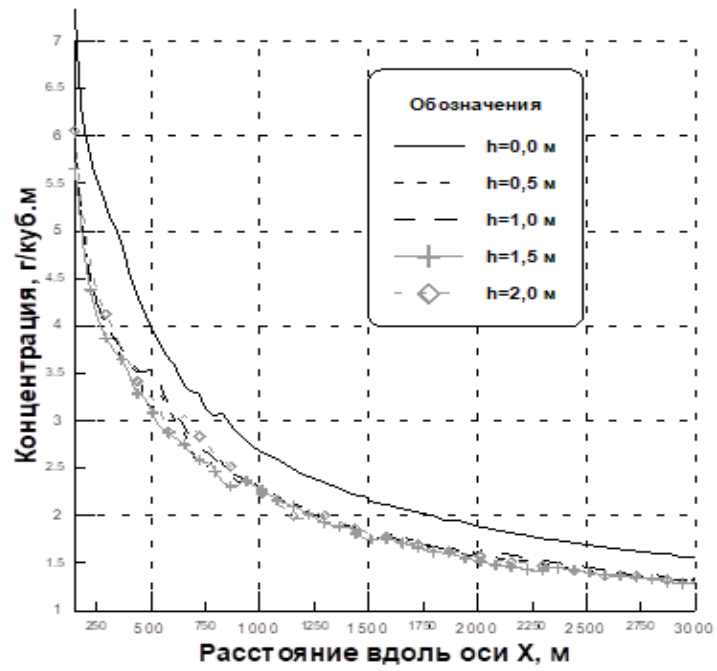


*б*

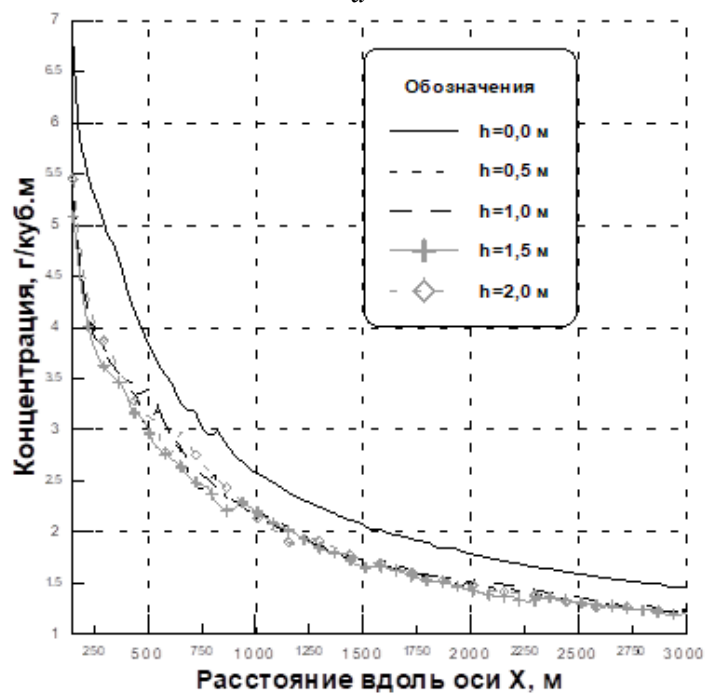


*в*

**Рис. 3.8.** Фрагменты поля скорости и линий тока  
при вариации высоты барьера (м):  
*a* — 0,00; *б* — 0,50; *в* — 1,00



*a*



*б*

Рис. 3.9. Пространственное распределение загрязнения вниз по потоку при вариации скорости оседания примеси (м/с):  
*a* — 0,05; *б* — 0,01

Таблица 3.2

Относительное изменение концентрации пыли вниз по ветровому потоку при вариации высоты ограждения, % (скорость оседания 0,01 м/с)

Координаты контроля, м	Высота ограждения, м			
	0,5	1,0	1,5	2,0
1000	-14,4	-16,3	-14,4	-16,7
2000	-15,6	-15,6	-20,1	-17,3
3000	-15,7	-16,3	-18,4	-17,0

Таблица 3.3

Относительное изменение концентрации пыли вниз по ветровому потоку при вариации высоты ограждения, % (скорость оседания 0,05 м/с)

Координаты контроля, м	Высота ограждения, м			
	0,5	1,0	1,5	2,0
1000	-14,2	-15,4	-14,6	-16,5
2000	-14,8	-14,8	-19,1	-16,4
3000	-14,7	15,3	-17,2	-16,6

Приведенные значения убедительно свидетельствуют, что, безусловно, эффект ограждения срабатывает в желаемом направлении. Причем максимальное снижение загрязнения на «значительных» расстояниях (координаты точек контроля 2000 и 3000 м) прогнозируется для высоты ограждения 1,5 м. В то же время для точки контроля с координатой 1000 м аналогичного явного преимущества не наблюдается. В целом можно сделать вывод: поскольку различие в снижении уровня загрязнения атмосферы в зависимости от высоты ограждения укладывается в 5 %, то с учетом экономических соображений по созданию дополнительных конструкций вполне можно предлагать мероприятия по строительству невысоких ограждений (на уровне полуметра). Отметим еще раз, что сформулированный вывод справедлив только для «значительных» расстояний — порядка 800 м от пылящего объекта. Внутри «ближней» зоны хвостохранилища ситуация, на взгляд авторов, более сложная и неоднозначная. Свидетельством этого служит поведение кривых на рис. 3.9, *а* и *б*. При определенном различии в численных значениях кривых рис. 3.9, *а* и *б* наблюдается существенное качественное сходство в их поведении на расстояниях до 800 м от объекта.

Безусловное преимущество в достижении желаемого результата принадлежит ситуации, когда высота ограждения составляет 1,5 м: кривые концентрации (см. рис. 3.9, *а* и *б*) при указанной высоте ограждения располагаются ниже остальных графиков.

В ситуациях моделирования ограждения с высотой 0,5 или 1,0 м прогнозируется снижение желаемого эффекта в области, характеризующейся координатами ~ 500–550 м. Применение самого высокого ограждения (2,0 м) приводит к «аномально» высокому значению концентрации пыли в области с координатой около 700 м.

Анализ распределения концентрации на высоте 2 м вниз по потоку достаточно убедительно свидетельствует, что предложение о создании ограждения справедливо и желаемый результат, а именно снижение уровня

загрязнения, достигается. При этом наибольший эффект прогнозируется при высоте ограждения 1,5 м. Вместе с тем, если речь идет о предотвращении загрязнения атмосферы на расстояниях порядка 1000 м и более (наиболее реальная ситуация), то с учетом экономических соображений можно рекомендовать создание более дешевого ограждения высотой 0,5 м.

Результаты исследования опубликованы в «Горном журнале» [142].

### **3.2. Трехмерное моделирование процессов пыления и загрязнения атмосферы мультидисперсной примесью вниз по ветровому потоку**

Решением Координационного совета по промышленной и экологической безопасности Мурманской области № 9 от 10 декабря 2012 г. Институту проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) КНЦ РАН рекомендовано выполнить работу по оценке влияния увеличения проектной высоты пляжа хвостохранилища АНОФ-2 (со 180 до 200 м) на загрязнение приземного слоя атмосферы в районе города Апатиты. Таким образом, представляемые результаты изысканий, помимо исследовательской стороны, имеют и важное практическое приложение.

#### **3.2.1. Характеристики модели**

*Основные источники информации.* В рамках подготовки и обоснования параметров трехмерной компьютерной модели района «хвостохранилище АНОФ-2 — г. Апатиты» с поперечными размерами площадки 15000 × 7000 м выполнены следующие исследования и мероприятия:

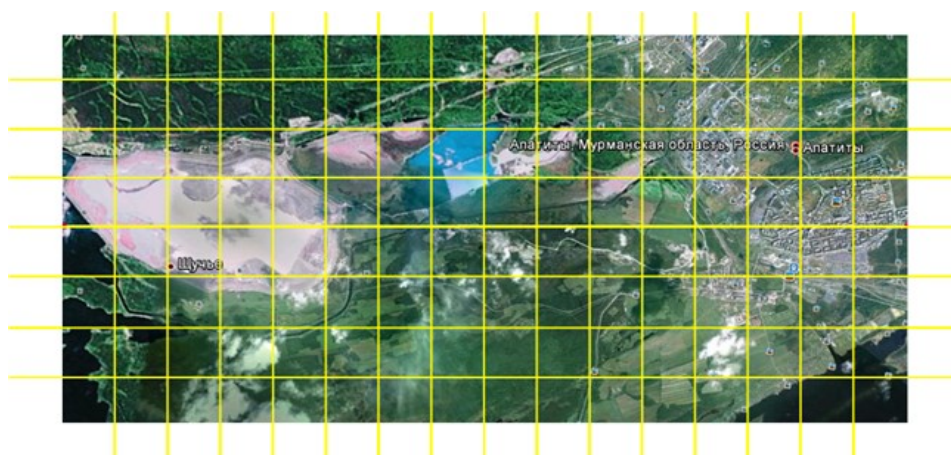
1) анализ опубликованных материалов по проблеме пыления на хвостохранилищах [19; 129; 131; 143–147]: а) монографические; б) отчетные и статейные материалы сотрудников ИППЭС и Горного института КНЦ РАН; в) пояснительные записки по реконструкции хвостохранилища АНОФ-2 до отметки 200 м, подготовленные ЗАО «Механобр Инжиниринг» и ООО «Приоритет»;

2) обсуждения и дискуссии с представителями ОАО «Апатит», а также выезд (15 мая 2013 г.) на хвостохранилище АНОФ-2 для визуального осмотра объекта (рис. 3.10).

*Геометрические параметры модели.* На базе карт GOOGLE EARTH района «хвостохранилище АНОФ-2 — г. Апатиты» (15000 × 7000 м) с шагом сетки 500–700 м (рис. 3.11) подготовлен файл исходных данных, необходимых для создания геометрии моделируемой области в среде COMSOL [136]. В качестве реперной высотной отметки принимается поверхность озера Имандра (126 м, основание модели). Очевидно, что помимо самого объекта пыления и города Апатиты в модели должны быть учтены предгорья Хибин и некоторые возвышенности. Было предпринято несколько попыток создания геометрии моделируемой области. Наибольшие опасения вызывало достижение устойчивого счета в численных экспериментах по расчету поля скорости над неоднородной орографической поверхностью большого масштаба.



**Рис. 3.10.** Участок пляжа хвостохранилища на 15 мая 2013 г. с фрагментом пылевой бури



**Рис. 3.11.** Сетка для оцифровки района площадки (карта из GOOGLE EARTH)

Используемая далее геометрия модели (седьмая попытка) в целом отвечает данным карт GOOGLE EARTH, естественно, без конкретизации деталей рельефа. Отметим, что при численном моделировании постоянно приходится делать выбор между желаемой точностью выполнения расчетов и возможностями компьютерной техники.

Наиболее сложной оказалась задача, связанная с построением источника пыления. Потребовалось неоднократное уточнение значений геометрических характеристик хвостохранилища и его формы. Результатом выполненных

работ явился обоснованный и согласованный выбор конкретных базовых геометрических параметров источника пыления с учетом водоема. Приняты во внимание следующие геометрические характеристики хвостохранилища:

генеральное заложение низового откоса 1 : 4;

длина хвостохранилища по гребню дамбы ~ 11 км;

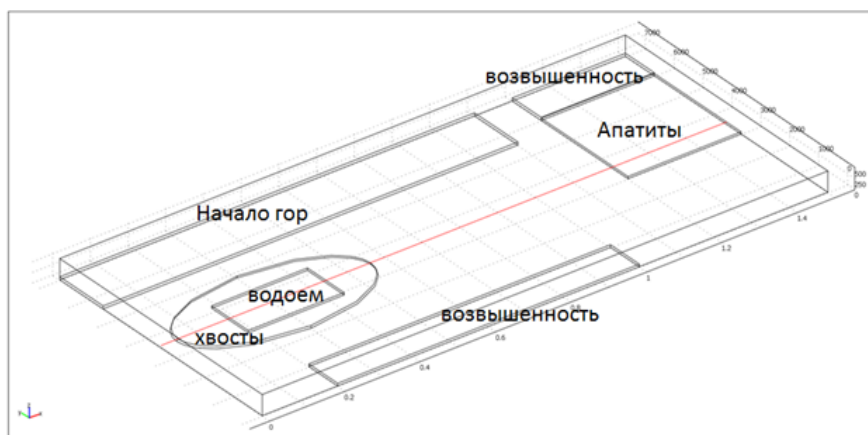
площадь зеркала 325 га;

пляжи основного поля хвостохранилища по данным на 2011–2012 гг. составляют ~ 420–405 га.

При этом закрепилось постоянство отношения продольного и поперечного размеров хвостохранилища как 2 : 1, что следует из указанных выше отчетных материалов.

Таким образом, модель пылящей поверхности хвостохранилища представляет собой эллипс с вырезанным зеркалом водоема, который задан в форме прямоугольника.

На рисунке 3.12 представлен один из последних вариантов геометрии модели района «хвостохранилище АНОФ-2 — г. Апатиты». Границы города Апатиты вдоль оси  $X$  — 12000–15000 м, вдоль оси  $Y$  — 3000–6000 м.



**Рис. 3.12.** Предложенная модель района площадки «хвостохранилище АНОФ-2 — г. Апатиты» (создана в программе COMSOL)

Несмотря на хорошие вычислительные характеристики задействованного компьютера ASUS K95VJ даже при сетке крупнее, чем нормальная (рекомендуемая разработчиками программного продукта COMSOL [136]), размер требуемой для выполнения расчетов оперативной памяти достигает 5 Гб. Дальнейшее увеличение разрешения модели приведет к операциям записи на диск и существенному возрастанию времени счета, что с учетом неопределенностей по ряду параметров модели представляется нецелесообразным. По этой причине было предложено остановиться на представленной геометрии.

*Описание интенсивности пыления.* В данном вопросе использованы результаты ранее выполненных исследований (см. подраздел 3.1.1). В частности, предложено воспользоваться формализацией описания интенсивности пыления от высоты пляжа хвостохранилища. Графические зависимости (см. рис. 3.12) были получены А. А. Баклановым и О. Ю. Ригиной [129; 131] на основе анализа

и обработки эмпирических зависимостей интенсивности пыления от скорости набегающего потока. Например, зависимость интенсивности пыления  $q$  (по Б. В. Иванову) в диапазоне высот  $h$  от 0 до 280 м может быть описана линейной функцией  $q = 15,2 + 1,2 \cdot h$ , г/(м<sup>2</sup>·с). Для высот хвостохранилища 180 и 200 м значения интенсивности пыления составляют 80 и 104 г/м<sup>2</sup>·с соответственно, т. е. имеем 30-процентный рост.

Для анализа загрязнения атмосферы использовались частицы пыли размером до 200 мкм. Указанный диапазон разбит на 5 интервалов (рис. 3.13). Исследование процессов турбулентного переноса пыли выполнено поинтервально с учетом соответствующей скорости оседания (по закону Стокса). Количественные поинтервальные показатели параметров переносимой пыли («вес» и скорости оседания) приведены в табл. 3.4.

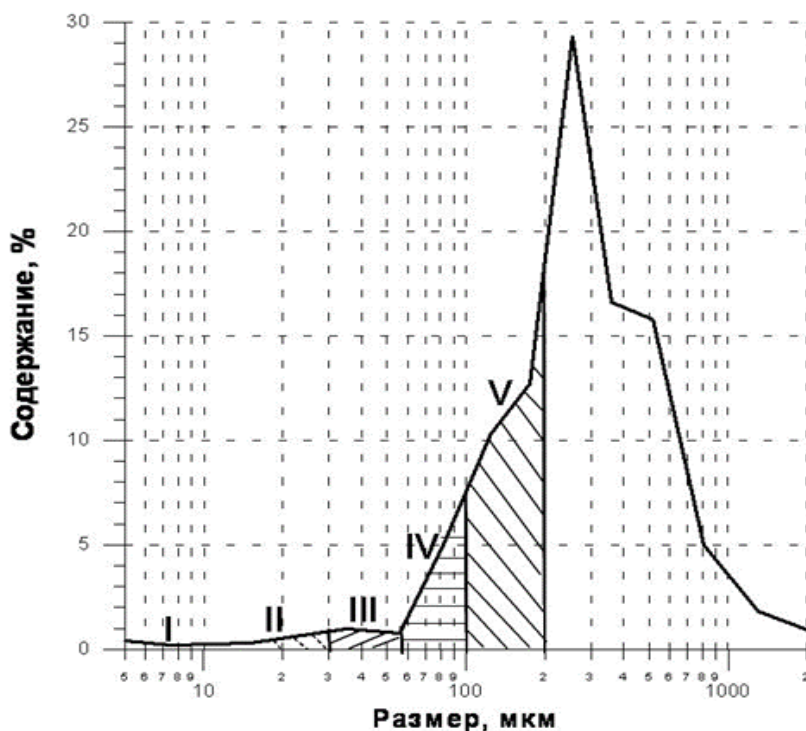


Рис. 3.13. Предлагаемые для анализа интервалы функции распределения количества частиц по их размерам

Таблица 3.4

«Вес» и скорости оседания пыли по предлагаемым интервалам функции распределения частиц от размера

Диапазоны по интервалам	I инт. (5–10 мкм)	II инт. (10–30 мкм)	III инт. (30–60 мкм)	IV инт. (60–100 мкм)	V инт. (100–200 мкм)
«Вес» интервала	0,001	0,004	0,019	0,116	0,861
Скорость оседания, м/с	0,0047	0,0335	0,17	0,537	1,89

Согласно данным отчетных материалов, пыление пляжей хвостохранилищ начинается при скоростях ветра 3 м/с и выше. А при скорости ветра до 7 м/с происходит полное выдувание (переход в аэрозольное состояние) нефелиновых песков. При дальнейшем увеличении скорости ветра возможно пыление песков, увлажненных до 10 %. Для выполнения численных экспериментов предлагается остановиться на скорости ветра порядка 6 м/с.

*Управляющие уравнения модели*

I этап. Для расчета аэродинамических параметров предлагается применить модель несжимаемой жидкости, дополненную стандартной ( $k$ - $\varepsilon$ )-моделью турбулентности. Расчет при изотермических условиях выполняется до выхода на стационарный режим.

Управляющие уравнения модели аэродинамики, используемые в программе COMSOL [136], имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} - \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \cdot (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T) \right] + \rho \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} + \nabla P = \mathbf{F} \\ \nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_{\mu} k^2}{\sigma_k \varepsilon} \right) \nabla k \right] + \rho \mathbf{U} \cdot \nabla k = \\ = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{2\varepsilon} (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)^2 - \rho \varepsilon \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_{\mu} k^2}{\sigma_{\varepsilon} \varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho \mathbf{U} \cdot \nabla \varepsilon = \\ = \rho C_{\varepsilon 1} \frac{k}{2} (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned}$$

II этап. Для определения пространственно-временного распределения загрязнения предлагается к использованию уравнение адвективно-диффузионного переноса (нестационарная и стационарная задачи):

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i + c_i \mathbf{u}) = R_i$$

Подробное описание всех функций и переменных приведено в документации кода COMSOL [136]. Представим основные переменные и функции:  $\rho$  — плотность;  $\bar{U}$  — осредненная скорость;  $t$  — время;  $\eta$  — динамическая вязкость;  $k$  — энергия турбулентности;  $\varepsilon$  — скорость диссипации турбулентности;  $p$  — давление;  $\bar{F}$  — массовые силы;  $C_{\mu}, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_{\varepsilon}$  — константы модели турбулентности;  $C_i$  — концентрация примеси;  $D_i$  — коэффициент диффузии;  $R_i$  — параметр, описывающий генерацию примеси;  $\nabla$  — оператор Гамильтона;  $T$  — транспонирование.



Для каждой интегрируемой физической величины задаются соответствующие начальные и граничные условия.

При численном решении системы уравнений I этапа и уравнения II этапа используются общепринятые стандартные начальные и граничные условия, предложенные создателями программного продукта COMSOL [136].

Например, при расчете аэродинамических параметров для скорости задействованы следующие условия:

на входной и верхней границах модели условие 1-го рода (на входной — логарифмический профиль скорости, на верхней — постоянное значение, отвечающее максимальной высоте модели);

на твердой поверхности условие логарифмической функции стенки.

При решении конвективно-диффузионного уравнения предполагается, что пыль химически не взаимодействует с материалом поверхности, на входной границе поступает «чистый» воздух, а на выходной границе «работает» условие конвективного потока, предполагающее вынос примеси из области моделирования.

*Метеорологические параметры.* По данным отчетных материалов «Механобр Инжиниринг» [19], ближайшая к объекту исследования метеостанция «Апатит» расположена на северном берегу залива Тик-Губа озера Имандра в 2,5–3 км к юго-западу от станции «Апатиты» железной дороги Мурманск — Санкт-Петербург.

Господствующие ветры — северо-западного и юго-восточного направлений (вдоль озера Имандра). По временам года господствующими ветрами являются: зимой — юго-восточные и западные, летом — северо-восточные и северо-западные.

Среднегодовые скорости ветра изменяются от 3 до 7 м/с и не имеют заметных отклонений по времени года. Максимальные скорости ветра достигают 28 м/с.

Данные о температуре атмосферного воздуха и скоростях ветра приведены в табл. 3.5.

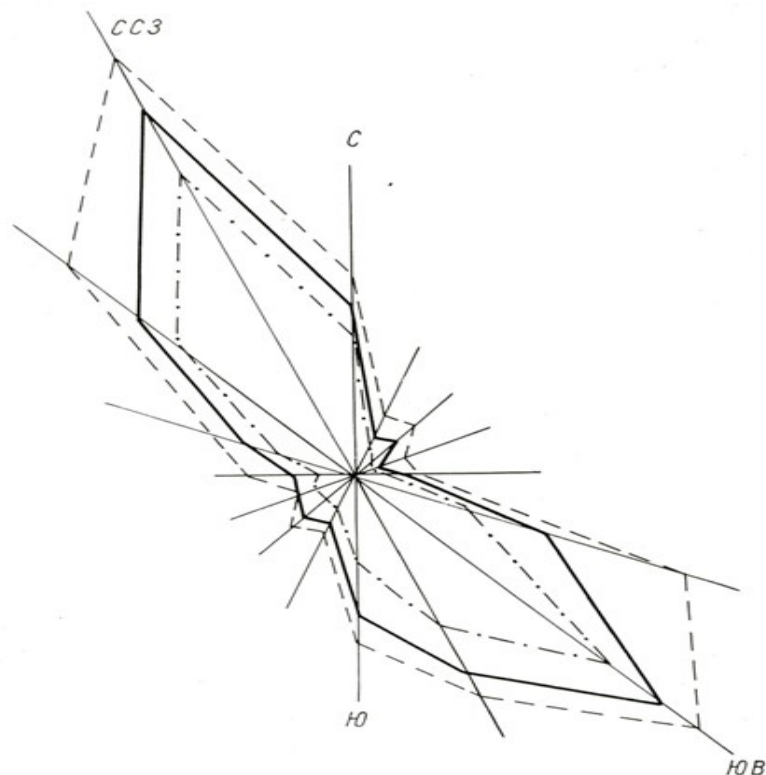
Таблица 3.5

Среднемесячные (годовые) метеорологические характеристики (температура  $t$ , °C и скорость ветра  $U$ , м/с) [131]

	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
$t$	-10	-12	-8	-1	+6	+11	+14	+14	+10	0	-1	-10	-1,08
$U$	6-7	4-5	3-5	3-5	4-6	5-7	3-5	3-5	4-6	3-5	4-6	3-5	4-6

Приведенные выше метеорологические данные подтверждаются и более ранними исследованиями, например отчетными материалами Горного института КНЦ РАН [131; 144]. В частности, на рис. 3.14 представлена средняя многолетняя роза ветров для летнего сезона с границами средних месячных вариаций.

В последующих численных экспериментах будут анализироваться именно ветра северо-западного направления, которые обуславливают наибольшую вероятность переноса пыли на городские районы.

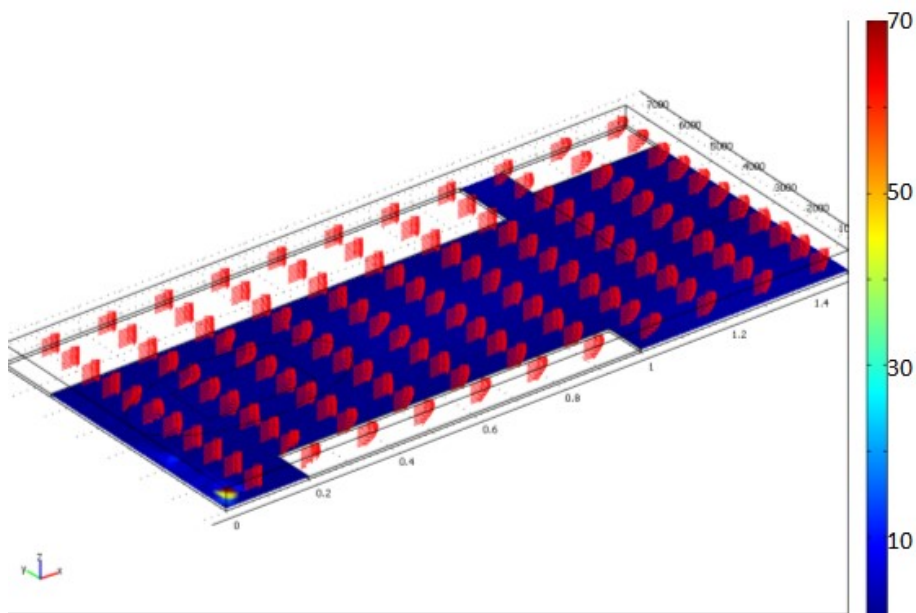


**Рис. 3.14.** Средняя многолетняя роза ветров летнего сезона с границами средних месячных вариаций [131]

*Примеры результатов расчетов аэродинамических параметров модели.* В качестве примера на рис. 3.15–3.18 представлены некоторые результаты расчетов по тестированию созданных моделей. Во всех ситуациях задается северо-западный ветер, но меняется высота пляжа хвостохранилища.

На рисунке 3.15 для высоты пляжа хвостохранилища 180 м приведены структура поля скорости воздушных потоков, а также распределение в одном из сечений модели (+1 м над поверхностью пыления) коэффициентов турбулентной динамической вязкости. На рис. 3.16 при том же ветре и той же высоте пляжа хвостохранилища приведено распределение коэффициента турбулентной динамической вязкости в центральном вертикальном сечении модели (+1 м над пылящей поверхностью, вдоль оси  $X$ ) для района модели «хвостохранилище АНОФ-2 — г. Апатиты».

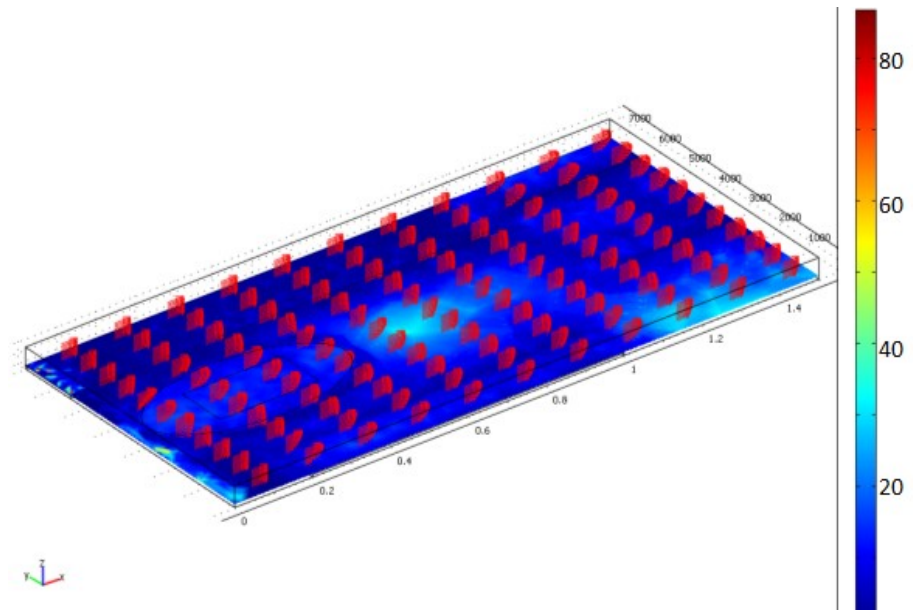
На рисунке 3.17 для высоты пляжа хвостохранилища 200 м приведены структура поля скорости воздушных потоков, а также распределение коэффициентов турбулентной динамической вязкости в одном из сечений модели (+1 м над поверхностью пыления). На рис. 3.18 при том же ветре и той же высоте пляжа хвостохранилища приведено распределение коэффициента турбулентной динамической вязкости в центральном вертикальном сечении модели (+1 м над пылящей поверхностью, вдоль оси  $X$ ) для района модели «хвостохранилище АНОФ-2 — г. Апатиты».



**Рис. 3.15.** Структура поля скорости и распределение коэффициента турбулентной динамической вязкости (Па·с) района площадки «хвостохранилище АНОФ-2 — г. Апатиты» в сечении +1 м над поверхностью пыления (высота пляжа хвостохранилища 180 м)



**Рис. 3.16.** Распределение коэффициента турбулентной динамической вязкости (Па·с) в центральном вертикальном сечении модели (+1 м над пылящей поверхностью) для района модели «хвостохранилище АНОФ-2 — г. Апатиты» (высота пляжа хвостохранилища 180 м)



**Рис. 3.17.** Структура поля скорости и распределение коэффициента турбулентной динамической вязкости (Па·с) района площадки «хвостохранилище АНОФ-2 — г. Апатиты» в сечении +1 м над поверхностью пыления (высота пляжа хвостохранилища 200 м)



**Рис. 3.18.** Распределение коэффициента турбулентной динамической вязкости (Па·с) в центральном вертикальном сечении модели (+1 м над пылящей поверхностью) для района модели «хвостохранилище АНОФ-2 — г. Апатиты» (высота пляжа хвостохранилища 200 м)

Детальный анализ распределений компонентов вектора скорости в различных областях модели, обтекания природных и техногенных препятствий воздушным потоком, изменений в значениях по пространству модели коэффициентов турбулентной динамической вязкости свидетельствует о достаточно объективной картине расчетных аэродинамических параметров модели. В частности, прекрасно видно заметное изменение поведения функции коэффициента турбулентной динамической вязкости: увеличение скорости воздуха с ростом высоты пляжа хвостохранилища приводит к возрастанию и определенному «сглаживанию» коэффициента турбулентной динамической вязкости (см. рис. 3.16 и 3.18). Указанный факт физичен и указывает на необходимость уточнения величины коэффициента турбулентной диффузии в расчетах переноса загрязнений.

Для решения адвективно-диффузионного уравнения на II этапе вычислений требуется задание величины коэффициента турбулентной диффузии. С целью обеспечения единого подхода (на данном этапе) для разных высот пляжа хвостохранилища предложено осуществить операцию осреднения распределений коэффициента турбулентной динамической вязкости (см. рис. 3.16 и 3.18) только вдоль хвостохранилища. Далее через число Прандтля — Шмидта перейти в терминологию коэффициентов турбулентной диффузии. Оказалось, что для высоты пляжа 180 м коэффициент турбулентной диффузии равен  $10 \text{ м}^2/\text{с}$ , а для высоты 200 м —  $15 \text{ м}^2/\text{с}$ . Указанные значения и были использованы в численных экспериментах.

Численные эксперименты по переносу мультidisперсной пыли были выполнены (зависимости Б. В. Иванова и В. Г. Борисова (см. рис. 3.3)) с учетом осаждения для двух высот пляжа хвостохранилища — 180 и 200 м. Методом проб и ошибок подобраны формы представления и анализа результатов численных экспериментов в области моделирования:

изоповерхности распределения концентрации пыли на высоте +2 м над поверхностью хвостохранилища и на высоте +2 над поверхностью города Апатиты;

пространственное поинтервальное распределение концентрации пыли в центральном сечении вдоль оси  $X$  на высоте +2 м над поверхностью хвостохранилища и на высоте +2 над поверхностью города Апатиты;

пространственное поинтервальное распределение концентрации пыли в центральном сечении вдоль оси  $X$  на высоте +2 м над поверхностью основания модели;

пространственное поинтервальное распределение концентрации пыли в поперечном сечении на высоте +2 м над поверхностью города Апатиты;

поинтервальное распределение концентрации пыли по высоте над поверхностью города Апатиты.

По результатам анализа расчетных данных пространственного распределения поинтервальной концентрации пыли сделан прогноз влияния высоты пылящей поверхности хвостохранилища на уровень загрязнения приземного слоя атмосферы города Апатиты.

Основные результаты следующие.

1. Для линейной зависимости увеличения интенсивности пыления с высотой на 30 % прогнозируется различное изменение поинтервальной концентрации пыли для района города Апатиты. Величины изменения

осредненной поинтервальной концентрации пыли над поверхностью города Апатиты составляют: интервал I — +16,0 %; интервал II — +15,2 %; интервал III — +11,5 %; интервал IV — +2,7 %; интервал V — -19,0 %.

Таким образом, прогнозируемый рост уровня концентрации пыли для района города Апатиты весьма неравномерен. Для мелкодисперсной пыли (интервалы I–III) речь идет об увеличении концентрации всего лишь на ~ 15 %. Для пыли максимальной крупности (интервал V), наоборот, расчетные данные свидетельствуют об уменьшении уровня концентрации практически на ~ 20 %.

Для функциональной зависимости пыления по В. Г. Борисову, когда возрастание более существенное (практически 250 %), чем в зависимости Б. В. Иванова, также прогнозируется, при сохранении прежней тенденции, различное изменение поинтервальной концентрации пыли.

2. Установлено (через анализ поперечного распределения концентрации), что более подвержен загрязнению приземный слой атмосферы района Старые Апатиты. В определенной степени полученный результат подтверждает физичность созданных цифровых моделей.

3. Значения адвективной составляющей потока пыли с поверхности хвостохранилища существенно превышают значения диффузионной составляющей для обеих рассмотренных высот хвостохранилища. С ростом его высоты для адвективной составляющей потока пыли прогнозируется снижение количественных показателей. Для диффузионной составляющей такой однозначности нет.

4. На базе созданных компьютерных моделей выполнена оценка эффективности мероприятий, проводимых природоохранной службой КФ АО «Апатит» по снижению интенсивности пыления пляжей хвостохранилища. Анализ результатов расчетов по распределению в продольном направлении поинтервальной концентрации пыли в районе города Апатиты свидетельствует, что «работает» простое линейное соотношение, т. е. прогнозируется пропорциональное снижение уровня поинтервальной концентрации пыли с увеличением эффективности защитных мероприятий.

5. Для выполнения оценок переносимой ветровым потоком пыли в абсолютных единицах измерения необходимо разобраться с современными подходами к формализации описания интенсивности пыления, разработать методический подход к оценке интенсивности пыления в зависимости от высоты пылящей поверхности и скорости ветра, а для объективных оценок загрязнения атмосферы определиться с потенциальной площадью пыления хвостохранилища АНОФ-2.

Более подробно результаты исследований представлены в монографии [148].

### **3.2.2. Формализованное описание интенсивности пыления (описание подходов, пороговая скорость и др.)**

*Подходы к формализованному описанию процессов пыления.* Моделирование пылевого цикла признается относительно новым направлением научных исследований. В настоящее время оно активно развивается для прогноза пыльных бурь в рамках программы ВМО “Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System” (SDS-WAS) [149; 150]. Организованный авторами поиск

в сети Интернет показал, что имеется большое количество публикаций и докладов, посвященных исследованиям процессов переноса пыли и, в частности, по проблеме формализованного описания процессов пыления.

В работах [151–153] рассмотрены вопросы, связанные с моделированием пылевого цикла с демонстрацией основных физических процессов движения песков, возникающих при наличии сильного ветра. Аналогичную и дополнительную информацию можно найти и в других цитируемых ниже работах (рис. 3.19).

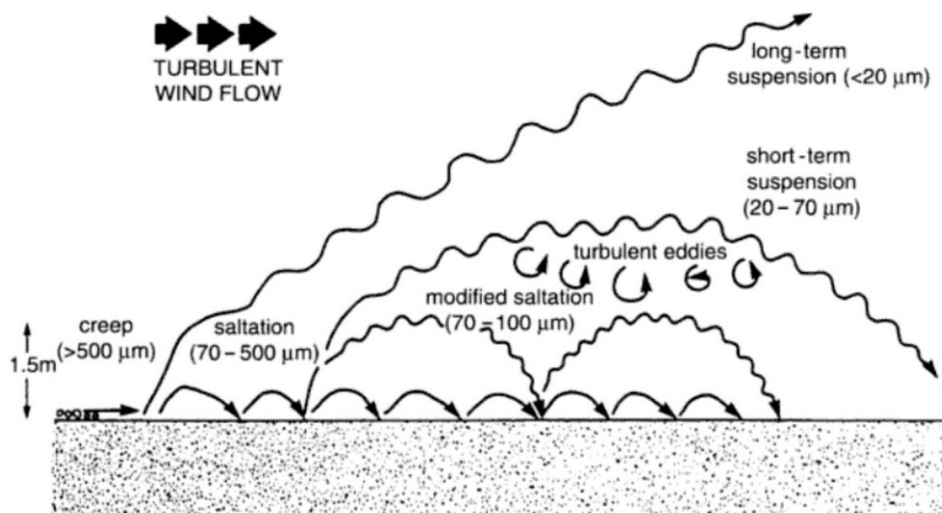
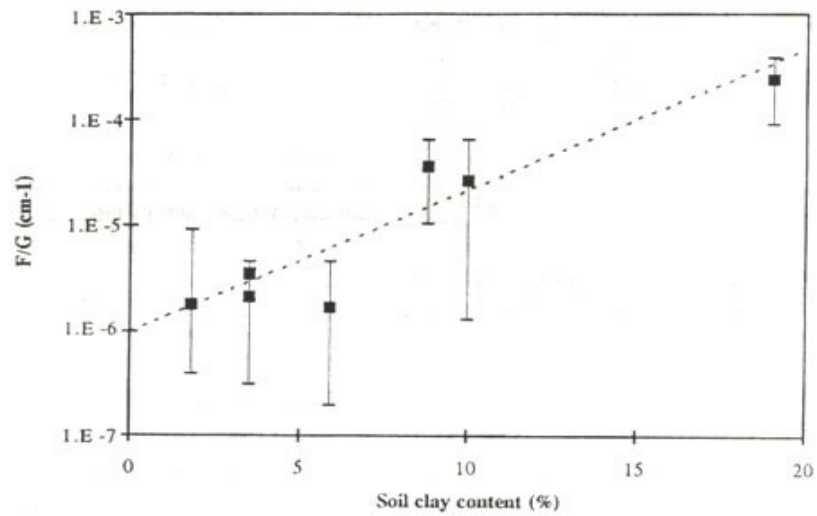


Рис. 3.19. Типы транспортирования частиц пыли [76; 152; 154]

Согласно терминологии в вопросах описания процессов пыления различают горизонтальный ( $G$ ) и вертикальный ( $F$ ) потоки массы (ГПМ и ВПМ). Они имеют разные размерности: горизонтальный —  $[кг/(м \cdot с)]$  и вертикальный —  $[кг/(м^2 \cdot с)]$ . Для решаемой задачи интересен именно вертикальный поток массы пыли, который «работает» в уравнениях конвективно-диффузионного переноса примеси как граничное условие на поверхности объекта пыления. В ряде авторитетных публикаций ВПМ и ГПМ связывают линейным соотношением  $F = \alpha \cdot G$  [155], где коэффициент пропорциональности имеет размерность  $[см^{-1}]$ , а его значение зависит от содержания глины в пылящей почве [156; 157]. В частности, при нулевом содержании глины  $\alpha = 10^{-6} [см^{-1}]$  (см., например, рис. 3.20). Авторы публикации [158] определяют коэффициент  $\alpha$  как массовую эффективность обдуваемости потоком. По мнению авторов цитируемой работы, обсуждаемый коэффициент является мерой того, как эффективно сальтирующие частицы способны бомбардировать поверхность с высвобождением большого количества мелкодисперсного материала.



**Рис. 3.20.** Отношение ВПМ к ГПМ для каждого типа почвы в зависимости от содержания глины в почве [156] (горизонтальная ось — содержание глины в почве; вертикальная ось — коэффициент  $\alpha$ )

В ряде работ предпринимаются попытки обобщения известных подходов моделирования пылевого цикла [154; 159]. Хорошая подборка подходов, используемых для описания потока массы сальтирующих частиц, представлена в работе [154]. В тезисах S. Shannon [159] из 16 приведенных моделей, 15 используют кубическую зависимость потока массы от скорости ветра (в таблице и тексте не указано, о какой скорости идет речь, а наибольшей популярностью пользуется с некоторыми модификациями модель, описанная в работе [156]) и лишь одна, самая ранняя (1990 г.), имеет линейную функцию.

Знакомство с другими иностранными публикациями подтверждает, что именно кубическая зависимость потока массы пыли от скорости является наиболее применимой и теоретически обоснованной.

Ниже представлены некоторые используемые подходы по формализованному описанию интенсивности пыления с краткими пояснениями по основным параметрам моделей.

1. В подходе, который называют схема GOCART (Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport) [160–166], ВПМ  $F_p$  класса  $p$  размера частиц пыли с поверхности пыления определяется через горизонтальную скорость ветра на высоте +10 м над пылящей поверхностью  $u_{10}$  и пороговую скорость  $u_*^{tp}$  для ветровой эрозии частицы размером класса  $p$  [159].

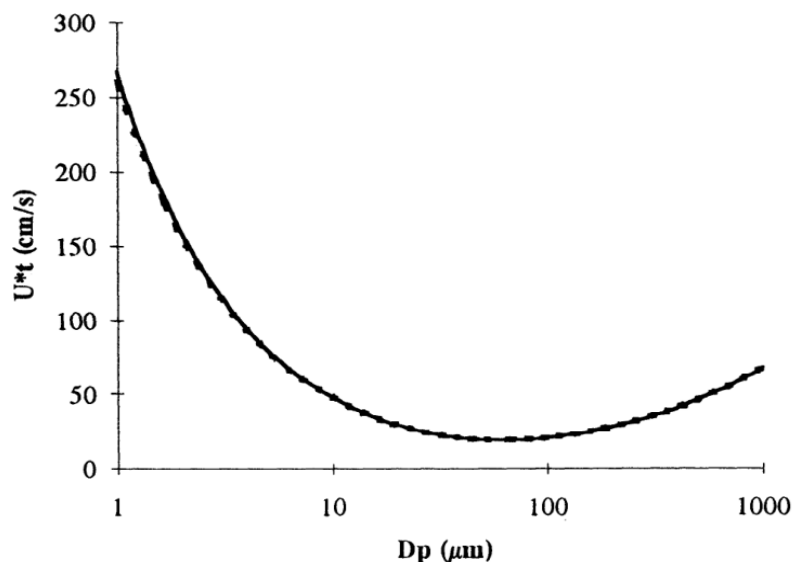
$$F_p = CS_s u_{10}^2 (u_{10} - u_*^{tp}) \quad \text{при } u_{10} \geq u_*^{tp}, \quad (3.2.2.1)$$

где  $C$  — эмпирический коэффициент размерности, который равен 1 [мкг·с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>];  $s_p$  — доля каждого моделируемого класса размера частиц пыли;  $S$  — функция источника, которая описывает долю поверхности, способной к ветровой эрозии.

Пороговая скорость трения является функцией различных свойств поверхности и размера частицы [156; 162; 165; 167]. Эксперименты свидетельствуют, что  $u_*^{tp}$  возрастает как с увеличением размеров частиц, поскольку требуется



больше энергии по преодолению силы гравитации, чтобы мобилизовать тяжелую частицу, так и с уменьшением размера частиц пыли, поскольку они являются связанными вместе посредством значительных сил сцепления между этими мелкими частицами [167–169] (рис. 3.21).



**Рис. 3.21.** Связь пороговой скорости трения с диаметром частицы: пунктирная кривая из работы [167]; сплошная кривая из уравнений (6) и (7) работы [156]

В публикациях [162; 165] обсуждается влияние влажности почвы на величину пороговой скорости трения и представлено выражение, которое позволяет учесть наличие влаги в почве (до величины 0,5). Естественно, что максимальная интенсивность пыления отвечает физически минимальному значению влажности почвы.

2. В подходе, который называется схемой DEAD (Dust Entrainment and Deposition) [155; 156; 159; 160; 170–172], ГПМ описывается через динамическую скорость или скорость трения  $u_*$  (ветровое напряжение на поверхности) на высоте пылящей поверхности в 3-й степени для частиц размером класса  $p$ :

$$G_p = c \frac{\rho_a}{g} u_*^3 \left( 1 - \left( \frac{u_*^p}{u_*} \right)^2 \right) \left( 1 + \frac{u_*^p}{u_*} \right) \cdot s_p, \quad (3.2.2.2)$$

где  $c$  — константа;  $\rho_a$  — плотность воздуха;  $g$  — ускорение свободного падения. В работе [156], которая имеет очень высокий показатель цитируемости, значение константы  $c$  рекомендовано выбрать равной 2,61. Уточняется, что это значение получено по результатам нескольких экспериментальных исследований [173; 174].

Поток массы сальтирующих частиц (горизонтальный поток массы) зависит от превышения ветровой скорости трения над пороговой скоростью трения ветра (в терминологии О. Е. Семенова [175] — критическая скорость начала переноса).

Значение динамической скорости  $u_*$ , которая является функцией скорости ветра, размера шероховатости и устойчивости атмосферы, предлагается вычислять с помощью известного соотношения [151]:

$$u_* = u_{10} \frac{\kappa}{\ln(H_{10}/z_0)}, \quad (3.2.2.3)$$

где нижний индекс 10 отнесен к высоте +10 м ( $H_{10}$ ) над поверхностью пыления;  $z_0$  — параметр шероховатости, м;  $\kappa$  — постоянная Кармана.

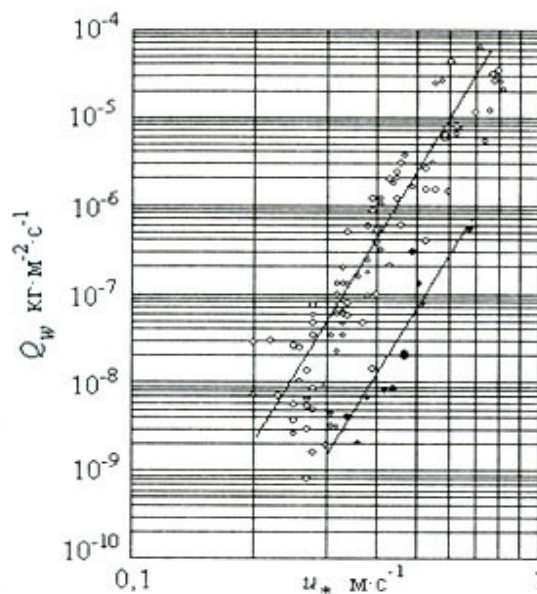
3. В диссертационной работе К. С. Johnson [176] для разработки системы анализа и предсказания аэрозолей (NAAPS) автор успешно использовал модель Westphal D. L. et al. [177]. Указанная модель, при условии выполнения двух критериев эмиссии (влажность не более 0,3, динамическая скорость не менее 0,6 м/с) для частиц песка размером от 0,2 до 160 мкм, предлагает для вычисления ВПМ опираться на динамическую скорость  $u_*$  в 4-й степени:

$$F = 2,9 \cdot 10^{-14} u_*^4 \text{ [г/(см}^2 \cdot \text{с)]}. \quad (3.2.2.4)$$

В выражении (3.2.2.4) используется динамическая скорость с размерностью см/с.

Указанная зависимость интенсивности пыления от динамической скорости в 4-й степени имеет своих сторонников среди советских исследователей [178–180].

4. Известный исследователь процессов пыления в пустынях О. Е. Семенов [175] для описания ВПМ над поверхностью, сложенной из мелкого песка, предложил аппроксимирующую зависимость как функцию динамической скорости  $u_*$  в степени 6,5. Анализ материалов метеорологических наблюдений привел О. Е. Семенова к выводу, что в указанной на рис. 3.22 области значений динамической скорости  $u_*$  следует выделить две зависимости вертикального потока массы частиц от динамической скорости потока  $F = f(u_*)$ .



**Рис. 3.22.** Зависимость вертикального потока массы частиц мелкого песка (менее 73 мкм) от динамической скорости потока при песчаных бурях [175]

Первая (нижняя) кривая описывает вертикальный поток массы аэрозоля над поверхностью, сложенной крупным песком (средний геометрический размер частиц 210–270 мкм). Эти пески практически не содержат мелких частиц, способных участвовать в турбулентном переносе. Последнее замечание позволяет в последующих расчетах турбулентного переноса пыли отказаться от рассмотрения частиц пыли большой крупности. Вторая (верхняя) кривая описывает поток массы  $F$  над поверхностью, сложенной из мелкого песка (средний геометрический размер частиц 105–108 мкм). Эта кривая аппроксимируется зависимостью [175, с. 232]:

$$F = 1,41 \cdot 10^{-4} \cdot u_*^{6,5}, \quad (3.2.2.5)$$

где поток массы измеряется в кг/(м<sup>2</sup>·с), а динамическая скорость в м/с.

Диапазон изменения потока массы над мелким песком охватывает 5 порядков: от 10<sup>-9</sup> до 10<sup>-4</sup> кг/(м<sup>2</sup>·с) при изменении динамической скорости от 0,2 до 0,82 м/с. При этом большой разброс данных измерений О. Е. Семенов объясняет зависимостью процесса переноса песка во времени, когда он носит прерывистый характер, влиянием температурной стратификации (инверсии температуры) и состоянием поверхностного слоя песка (сухой или влажный). В результате все это приводит к снижению потока массы песка. Для определения динамической скорости им предложена собственная эмпирическая формула [175]:

$$u_* = 0,0125 \cdot u_9^{1,5}, \quad (3.2.2.6)$$

где нижний индекс 9 отнесен к высоте +9 м ( $H_9$ ) над поверхностью пыления.

5. Авторы работы [181] сделали шаг к улучшению моделирования пылевого цикла на базе комбинации теории и численного моделирования с целью получения физически обоснованной параметризации выбросов пыли. Представленную параметризацию легко реализовать в крупномасштабных моделях, поскольку она зависит только от скорости трения ветра и пороговой скорости трения почвы. Кроме того, дополнение авторов работы объясняет два процесса, отсутствующих в большинстве современных параметризаций. Полученное авторами выражение для вертикального потока массы пыли  $F_d$  имеет следующий вид:

$$F_D = C_d f_{bare} f_{clay} \frac{\rho_a (u_*^2 - u_{*t}^2)}{u} \left( \frac{u_*}{u_{*t}} \right) C_a^{\frac{u_{*st} - u_{*st0}}{u_{*st0}}}, \quad (u_* > u_{*t}),$$

$$C_d = C_{d0} \exp\left(-C_e \frac{u_{*st} - u_{*st0}}{u_{*st0}}\right), \quad C_{d0} = \gamma \epsilon C_{ns} C_{fr0} / C_V, \quad (3.2.2.7)$$

где ряд параметров идентичны ранее описанным, а новые имеют следующий физический смысл:  $\rho_a$  — плотность воздуха, кг·м<sup>-3</sup>;  $f_{bare}$  — доля поверхности открытой почвы;  $f_{clay}$  — глинистая фракция почвы;  $u_*$  — скорость трения почвы, полученная из напряжения сдвига  $\tau_s$  на открытой почве, м·с<sup>-1</sup>;  $u_{*t}$  — пороговая скорость трения грунта, выше которой происходит сальтация, м·с<sup>-1</sup>;  $u_{*st}$  — пороговая скорость трения грунта, стандартизированная по стандартной плотности атмосферы, м·с<sup>-1</sup>;  $u_{*st0}$  — стандартизированная пороговая скорость трения оптимально эродлируемого грунта, м·с<sup>-1</sup>;  $C_e$  — безразмерная константа, масштабирующая экспоненциальное уменьшение  $C_d$  с  $u_{*st}$ ;  $C_{d0}$  — безразмерная константа, масштабирующая коэффициент пылевыделения;  $C_{ns}$  — безразмерная

константа, масштабирующая количество ударов сальтатора;  $C_{fr0}$  — значение  $C_{fr}$  для оптимально подверженной эрозии почвы;  $C_V$  — безразмерная константа, масштабирующая среднюю скорость удара сальтатора.

Предлагаемый подход к этим процессам подкрепляется подборкой измерений вертикального потока пыли с контролируемым качеством. Кроме того, схема воспроизводит доступные наборы измерений со значительно меньшей погрешностью, чем существующие параметры пылевого потока, с которыми авторы выполнили сравнение. Критическое понимание предлагаемой теории, как и результатов измерений, заключается в том, что потоки пыли существенно более чувствительны к пороговой скорости трения почвы, чем учитывается большинством существующих схем. При этом авторы подхода отказываются от поинтервального разбиения пыли по размерам.

6. Разработчики программного продукта MONARCH (Multiscale Online Non-hydrostatic Atmosphere Chemistry model) в работе [182] представили обновленный вариант своей программы. В новой версии представления пылевых процессов улучшены с акцентом на эмиссию пыли (параметры эмиссии, пороги уноса, учет влажности почвы и поверхностного покрова), нижние граничные условия (шероховатость, потенциальные источники пыли) и взаимодействия пылевого излучения. Актуальная версия программы MONARCH позволяет моделировать глобальные и региональные циклы минеральной пыли, используя принципиально разные парадигмы, начиная от сильно упрощенных и заканчивая параметрами, основанными на глубоком понимании физики процессов. В указанной публикации представлено подробное описание обновлений вместе с четырьмя глобальными эталонными моделями, в которых используются концептуально разные параметры выбросов пыли.

7. В 1980-е и 1990-е гг. под руководством А. А. Бакланова в Горном институте и ИППЭС КНЦ РАН (ранее АН СССР) была проведена большая работа (см. подраздел 3.1.1.) по анализу эмпирических зависимостей горизонтального и вертикального потоков массы пыли в зависимости от скорости ветра [129]. Анализ эмпирических зависимостей, предложенных различными отечественными исследователями (А. А. Комаров, З. Е. Альтшулер, О. Е. Семенов, Б. Н. Сенкевич, С. М. Талалаев, Б. В. Иванов, А. К. Дюнин, В. Г. Борисов, Д. М. Мельник, Р. С. Закиров), после приведения скорости ветра к одной высоте (в соответствии с логарифмическим профилем) и интенсивности пыления к единым единицам измерения ( $г/(м·с)$ ) позволил сделать вывод о том, что, при наличии общих закономерностей степенного увеличения интенсивности пыления от скорости ветра, количественно они дают достаточно большой разброс значений. Указанный разброс может быть объяснен различными условиями натуральных наблюдений, различной плотностью переносимого материала, использованием различных приборов, а также высотой измерения скорости ветра.

В 2000-е гг. проблема пыления хвостохранилищ и пустынь по-прежнему оставалась в поле зрения российских ученых, преподавателей вузов горного профиля, производственников и других специалистов. Определенный вклад в обоснование модельных представлений интенсивности пыления с поверхности указанных объектов, разработку мониторинга пыльных бурь, развитие геоинформационных моделей загрязнения пограничного слоя атмосферы

внесли следующие специалисты: О. Е. Семенов, Т. В. Дедова, Э. А. Закарин, И. Г. Гранберг с коллегами из Института физики атмосферы им. А. М. Обухова, Ю. В. Шувалов, А. П. Бульбашев, О. С. Галаева, С. К. Камалов и др.

В оценках интенсивности пыления автор диссертационной работы [4], посвященной снижению аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха от производственных объектов АО «Ковдорский ГОК», использует выражение, подобное формуле (3.1.1.11) [134], в котором скорость ветра  $V_{10}$  имеет степень 3,05, а влияние влажности описывается экспоненциальной функцией, которая равна единице в сухом состоянии пыли.

Таким образом, выполненный анализ подходов по формализации вертикального потока массы свидетельствует об отсутствии общепринятого взгляда на данную проблему. Единым является утверждение, что вертикальный поток массы является функцией скорости (либо динамической, либо некоторой, фиксируемой на референтной (чаще всего +10 м) высоте). Причем показатель степени у скорости варьируется в широком диапазоне.

Оценив собственные возможности по использованию компьютерных программ по анализу результатов численного моделирования процессов распространения мелкодисперсной примеси, а также полноту информации по приведенным выше подходам, авторы при отработке методического подхода провели собственное исследование на базе 4 вариантов:

*подход GOCART* (через скорость ветра  $u_{10}$  на высоте +10 м над пылящей поверхностью в степени 3 с учетом класса  $p$  крупности пыли и формулу (3.2.2.1));

*подход DEAD* (через динамическую скорость  $u_*$  (формула (3.2.2.3)) на высоте пылящей поверхности в степени 3, принимая во внимание класс  $p$  крупности пыли и формулу (3.2.2.2));

*подход D. L. Westphal et al.* (через динамическую скорость  $u_*$  (формула (3.2.2.3)) на высоте пылящей поверхности, но в степени 4 и формулу (3.2.2.4));

*подход О. Е. Семенова* (через динамическую скорость «по Семенову О. Е.» (формула (3.2.2.6) на высоте пылящей поверхности в степени 6,5 и формулу (3.2.2.5)).

Следуя указанным публикациям и докладам, представляется возможным при рассмотрении турбулентного переноса пыли с хвостохранилища АНОФ-2 ограничиться частицами, размер которых не превышает 70 мкм.

Результаты исследований представлены в работе [183].

*Краткое описание используемого методического подхода и основных результатов.* Для практической реализации оценок использована следующая последовательность действий. На рис. 3.23 представлена схема модели, которая принимается для обоснования величины скорости, необходимой для последующей оценки ВПМ частиц (интенсивности пыления): 1) динамическая скорость на высоте пылящей поверхности; 2) горизонтальная компонента скорости ветра на высоте +10 и +9 м над пылящей поверхностью.

Таким образом, для определения интенсивности пыления используем зависимость типа  $F = f(u_*)$  или  $F = g(u_{10})$ . На входной границе модели имеем значение референтной скорости ветра  $u_{ref}$  на высоте 10 м над основанием модели (от 5 до 23 м/с, например, с шагом 3 м/с). Задавая логарифмический профиль скорости на входной границе (шероховатость принимается на уровне 0,05 м), выполняем расчет аэродинамики на базе стационарной стандартной

( $k-\varepsilon$ )-модели [148; 184–186]. Далее выполняем обработку расчетных аэродинамических параметров вдоль пунктирной линии (+9 или +10 м над поверхностью хвостов (см. рис. 3.23)): операцию осреднения горизонтальной компоненты скорости, т. е. получаем необходимые  $u_9$  или  $u_{10}$ .



**Рис. 3.23.** Схема модели под обоснование методики определения интенсивности пыления

Результаты обработки численных экспериментов для горизонтальной скорости на высоте +10 м над пылящей поверхностью, а также переход к динамической скорости обобщены в табл. 3.6. Заметим, что, поскольку осредненные значения горизонтальных скоростей на высотах +9 и +10 м над пылящей поверхностью близки, в табл. 3.6 приведены только значения скорости на высоте +10 м.

*Таблица 3.6*

Осредненные значения горизонтальной скорости на высоте +10 м, соответствующие им значения динамической скорости, м/с

Скорость ветра, м/с	$u_*$ (ud9)	$u_*$ (ud10)	$u_{10}$ (u10)
5	0,296	0,623	8,246
8	0,599	0,996	13,19
11	0,965	1,370	18,14
14	1,386	1,743	23,09
17	1,855	2,117	28,04
20	2,367	2,490	32,98
23	2,919	2,863	37,93

Обращают на себя внимание различия в значениях динамической скорости, рассчитанные по формулам (3.2.2.3) и (3.2.2.6), при скоростях ветра до 20 м/с. Кроме того, следует помнить, что выражение (3.2.2.5), как это видно из диапазона горизонтальной оси рис. 3.22, проверено О. Е. Семеновым [175] для значений динамической скорости менее 1 м/с.

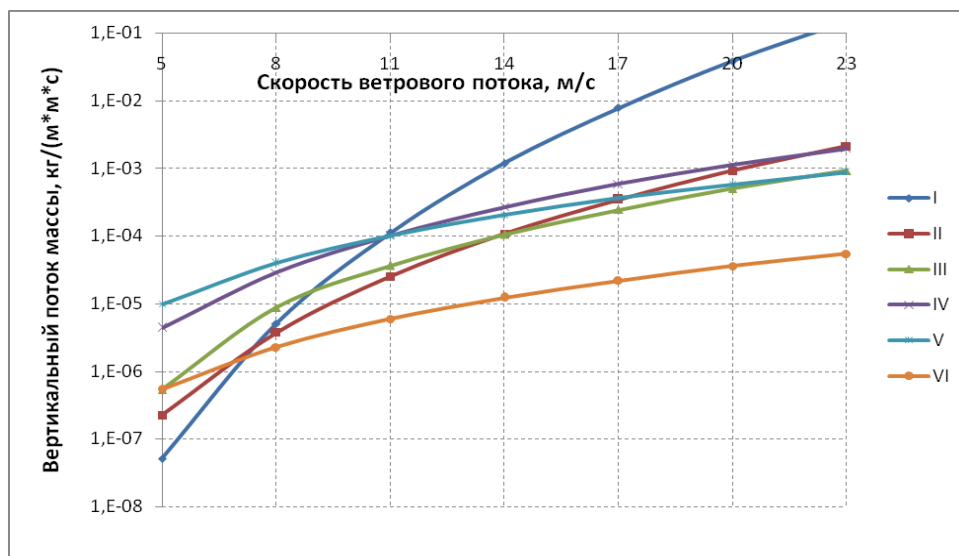
На рисунке 3.24 представлены основные графические результаты оценок ВПМ, выполненные по приведенным выше формулам (3.2.2.1) — (3.2.2.6) для частиц пыли диаметром 35 мкм: I — зависимость Семенова (ud9); II — зависимость Westphal D. L. et al. (ud9); III — схема DEAD (ud9); IV — зависимость Westphal D. L. et al. (ud10); V — схема DEAD (ud10); VI — схема GOCART (u10).

Зависимости I–III получены для динамической скорости с использованием выражения (3.2.2.6) (ud9), зависимости IV–V — через формулу (3.2.2.3) (ud10).

Анализ поведения кривых, представленных на рис. 3.24, свидетельствует, что особым образом ведут себя кривые I и VI:

первая (подход О. Е. Семенова) имеет самый большой интервал изменения — от  $10^{-7}$  до  $10^{-1}$   $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , что объясняется высоким значением показателя степени скорости;

вторая (подход GOCART) располагается примерно на декаду ниже, чем остальные 4 графика, что, в принципе, может быть исправлено корректирующим (но обоснованным!) коэффициентом.



**Рис. 3.24.** Расчетные зависимости ВПМ от скорости ветрового потока:  
*I* — зависимость Семенова (ud9); *II* — зависимость Westphal D. L. et al. (ud9);  
*III* — схема DEAD (ud9); *IV* — зависимость Westphal D. L. et al. (ud10);  
*V* — схема DEAD (ud10); *VI* — схема GOCART (u10)

Попарно могут быть рассмотрены кривые II–III и IV–V соответственно. Указанные пары ведут себя похожим образом, что естественно, поскольку используются те же самые зависимости (Westphal D. L. et al. и DEAD) на базе динамической скорости, которые получены разными способами. Поскольку переход к динамической скорости для графиков IV и V выполнен по общепризнанной формуле (3.2.2.3), представляется, что более весомо в дальнейших исследованиях по переносу пыли в районе хвостохранилища АНОФ-2 использовать указанные графические зависимости (формулы (3.2.2.2), (3.2.2.3) и (3.2.2.4)). Именно эти зависимости дают минимальное расхождение результатов, что хорошо видно на рис. 3.24 на всем рассмотренном диапазоне скорости ветра (табл. 3.7). Естественно, авторы понимают, что для окончательного вывода о том, какой подход является наилучшим, требуется проведение трудоемких экспериментальных исследований на объекте пыления.

Таблица 3.7

Расчетные оценки ВПМ для зависимости Westphal D. L. et al. (ud10) IV  
и схемы DEAD (ud10) V, кг/(м<sup>2</sup>·с)

Скорость ветра, м/с	Зависимость IV	Зависимость V
5	$0,4356 \cdot 10^{-5}$	$0,9769 \cdot 10^{-5}$
8	$0,2855 \cdot 10^{-4}$	$0,3972 \cdot 10^{-4}$
11	$0,1021 \cdot 10^{-3}$	$0,1007 \cdot 10^{-3}$
14	$0,2677 \cdot 10^{-3}$	$0,2033 \cdot 10^{-3}$
17	$0,5820 \cdot 10^{-3}$	$0,3584 \cdot 10^{-3}$
20	$0,1115 \cdot 10^{-2}$	$0,5766 \cdot 10^{-3}$
23	$0,1950 \cdot 10^{-2}$	$0,8688 \cdot 10^{-3}$

Предпринята попытка проверить на объективность полученные значения интенсивности пыления. Для этого проанализированы данные отчета «Реконструкция хвостохранилища до отметки 200 м: проектная документация. Раздел 8 «Перечень мероприятий по охране окружающей среды», посвященного реконструкции хвостохранилища АНОФ-2 до высотной отметки 200 м [19]. Специалисты ЗАО «Механобр Инжиниринг» используют показатель «Максимальная удельная сдуваемость пыли». В своих оценках авторы указанного отчета используют значение  $5,29 \cdot 10^{-6}$  кг/(м<sup>2</sup>·с), что в представленных на рис. 3.24 графических зависимостях отвечает значению динамической скорости не выше 0,6 м/с. Представляется возможным сделать два вывода: 1) предлагаемый методический подход достаточно объективен и работоспособен; 2) при высоких скоростях ветрового потока прогнозируемые значения интенсивности пыления будут существенно выше тех величин, которые принимаются проектировщиками в оценках воздействия объектов пыления на окружающую среду.

Основной вывод: наиболее приемлемыми для исследований загрязнения приземного слоя атмосферы вниз по ветровому потоку могут быть названы зависимость Westphal D. L. et al. и схема DEAD. Оба подхода базируются на функциональной зависимости потока массы пыли от динамической скорости на высоте пыления в 4-й и 3-й степенях соответственно.

### 3.2.3. Результаты моделирования в подходе сплошности источника пыления

На описываемом этапе исследований авторы рассматривали исключительно подход сплошности источника пыления. Кроме того, с учетом более глубокого освоения программы COMSOL [136] появилось понимание в необходимости и возможности усовершенствования компьютерных 3D-моделей аэрогазодинамических процессов с учетом вариации скорости воздушного потока.

*Элементы усовершенствования численной модели аэродинамики.* Для численного моделирования процессов переноса пыли в трехмерной постановке необходимым шагом является подготовка компьютерных моделей, позволяющих выполнить расчет аэродинамических параметров



(поле скорости, коэффициенты турбулентной диффузии). За основу была взята трехмерная компьютерная модель площадки района «хвостохранилище АНОФ-2 — г. Апатиты» при максимальной проектной высоте пылящей поверхности (200 м), которая была создана и использована авторами в рамках предыдущих исследований [148].

На текущем шаге были выполнены модернизация и корректировка указанной аэродинамической модели с проверкой на тестовых расчетах. Модернизация модели обусловлена в первую очередь тем обстоятельством, что, в частности, научились задавать сложные граничные условия (например, в форме функций пространственных переменных) и анализировать расчетные данные посредством встроенных в COMSOL функций, не привлекая дополнительные программные продукты (GRAPHER, SURFER, EXCEL и др.), что существенно уменьшило время на обработку результатов численных экспериментов. Во-вторых, определенную корректировку аэродинамическая модель претерпела в части выбора демпфирующих параметров в схемах аппроксимации конвективных слагаемых, что обеспечило устойчивость расчетов в широком диапазоне скоростей, задаваемых на входной границе модели при более сложных граничных условиях.

Основными моментами модернизации и корректировки аэродинамической модели являются:

использование логарифмического профиля скорости на входной границе модели, учитывающего шероховатость подстилающей поверхности;

подбор решателя (PARDISO out of core) и демпфирующих коэффициентов с целью снижения искусственной вязкости (Crosswind diffusion (0,50–0,60) для уравнения сохранения импульса и Turbulence isotropic (0,99) для уравнений ( $k-\epsilon$ )-модели), обеспечивающих устойчивость счета на всем диапазоне скоростей ветрового потока на высоте +10 м  $U_{10}$  от основания модели (5–23 м/с).

На базе модернизированных моделей выполнены расчеты аэродинамических параметров модели в диапазоне скорости ветра  $U_{10}$  от 5 до 23 м/с. Как и на предыдущих этапах исследований, результаты численных экспериментов подверглись качественному и количественному анализу [148; 184; 186]. Следует отметить физичность результатов аэродинамических параметров по всей области моделирования.

*Обсуждение параметров моделирования.* В соответствии с ранее предложенным и апробированным (в двухмерной постановке) подходом [184; 186] выполнены: осреднение горизонтальной скорости (в центральном сечении модели) и переход к динамической скорости на высоте пыления, необходимой для оценки вертикального потока массы.

В качестве примера на рис. 3.25 представлены распределения горизонтальной скорости (рис. 3.25, *a*) и коэффициентов динамической турбулентной вязкости (рис. 3.25, *b*) на высоте +10 м над пылящей поверхностью (в центральном сечении модели).

Результаты осреднения горизонтальной скорости и перехода к динамической скорости приведены в табл. 3.8.

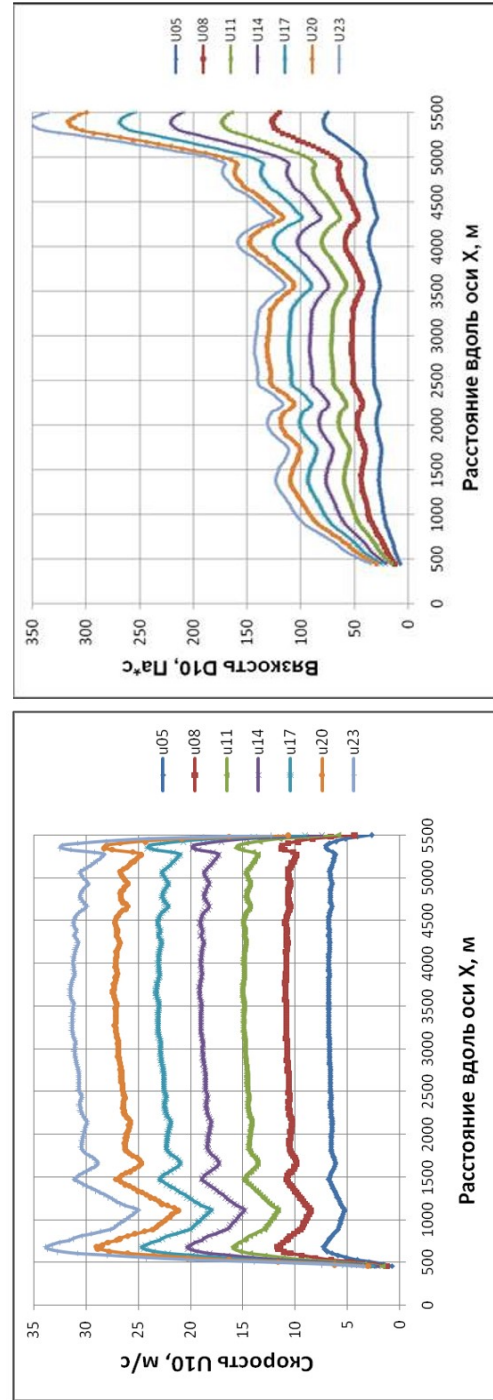


Рис. 3.25. Распределения горизонтальной скорости ( $u$ ) и коэффициентов динамической турбулентной вязкости ( $\sigma$ ) на высоте +10 м над пылящей поверхностью

Аналогичная процедура осреднения и переход (через число Прандтля — Шмидта и плотность воздуха) выполнены относительно коэффициентов динамической турбулентной вязкости на высоте +10 м над пылящей поверхностью (в центральном сечении модели) с целью оценки коэффициентов турбулентной диффузии.

Дополнительно, воспользовавшись встроенной опцией интегрирования по областям моделирования, пересчитаны осредненные по объему модели коэффициенты динамической турбулентной вязкости и коэффициенты турбулентной диффузии. Конечные результаты обоих переходов как на высоте +10 м над пылящей поверхностью, так и по объему моделирования также представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Результаты осреднения на высоте +10 м над поверхностью пыления и по объему модели аэродинамических параметров

Скорость ветра $U_{10}$ , м/с	Осредненная скорость $u_{10}$ , м/с	Динамическая скорость $u_*$ , м/с	Осредненные коэффициенты диффузии $\Gamma_t$ , м <sup>2</sup> /с	
			на высоте +10 м	по объему
5	6,439	0,4983	35,7	75,5
8	10,305	0,7974	57,1	121,5
11	14,172	1,0967	78,5	166,0
14	18,040	1,3960	99,9	211,6
17	21,908	1,6953	121,3	257,2
20	25,776	1,9946	142,8	302,7
23	29,791	2,3053	156,7	336,4

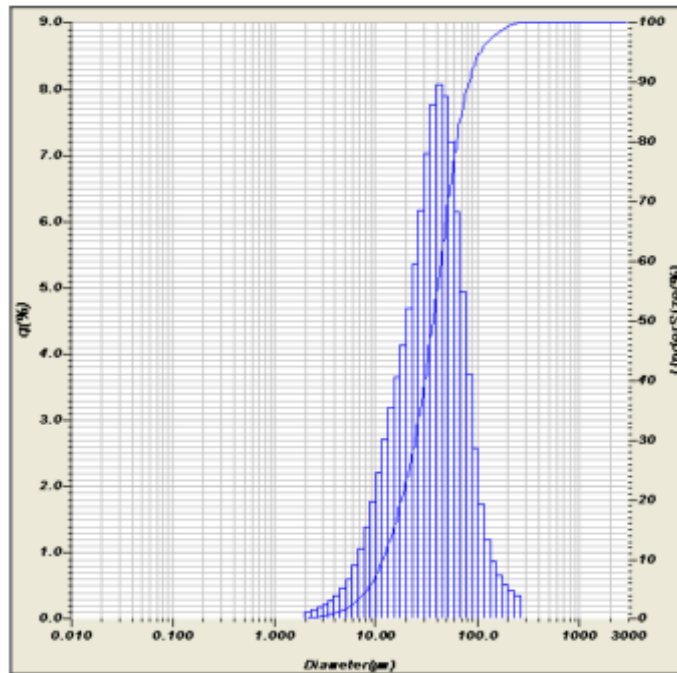
Выполнена обработка и анализ графической информации гранулометрического состава отвалных хвостов с поверхности устоявшегося пляжа хвостохранилища АНОФ-2, представленной в работе [17] (рис. 3.26). Получены количественные показатели по долям («вес» интервала) каждого моделируемого класса размера частиц пыли (табл. 3.9). Дополнительно в табл. 3.9 приведены значения пороговой скорости  $u_*^{lp}$  для пыли интервала крупности  $p$  до 70 мкм в диаметре с шагом 10 мкм по методике [156] и скорости оседания  $w_g$  разнокалиберной пыли [148], что также необходимо для выполнения численных экспериментов по турбулентному переносу мультидисперсной примеси.

Таким образом, подготовлена вся необходимая информация для выполнения исследований по влиянию скорости ветра на процессы турбулентного переноса мультидисперсной пыли и оценки уровня загрязнения атмосферы вниз по потоку. Данные табл. 3.9 будут неоднократно использовать далее.

Таблица 3.9

Значения «веса» интервала в интенсивности пыления, пороговой скорости и скорости оседания в зависимости от срединного диаметра частиц пыли

Срединный диаметр (диапазон интервала), мкм	5	15	25	35	45	55	65
«Вес» интервала	0,022	0,083	0,142	0,194	0,209	0,189	0,161
Пороговая скорость $u_*^{lp}$ , м/с	0,951	0,420	0,295	0,243	0,218	0,206	0,201
Скорость оседания $w_g$ , м/с	0,00195	0,0175	0,0487	0,0955	0,1580	0,2360	0,3290



**Рис. 3.26.** Гранулометрический состав отвалных хвостов с поверхности устоявшегося пляжа хвостохранилища АНОФ-2 [17]

*Результаты оценок загрязнения атмосферы.* По отработанному ранее алгоритму для каждого диапазона пыли были рассчитаны интенсивности пыления в соответствии с рассматриваемыми скоростями ветра для схемы DEAD [156] и зависимости Westphal D. L. et al. [177], а также их отношений. Расчетные интенсивности пыления, выполненные для схемы DEAD, при референтной скорости ветра 5 м/с для самой мелкой пыли (срединный диаметр 5 мкм) оказались нулевыми. Сей факт имеет очевидное объяснение, поскольку величина пороговой скорости для пыли такой крупности выше значения динамической скорости.

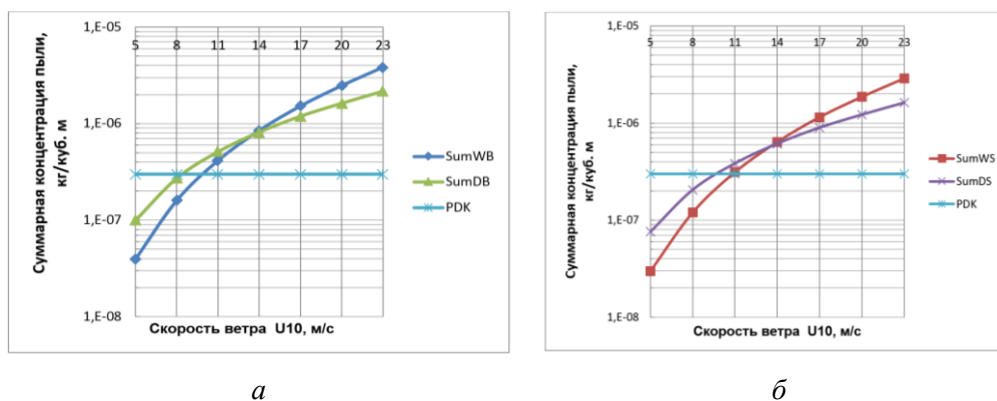
Далее, как и было предложено авторами ранее [186], только для значений интенсивности пыления Westphal D. L. et al. были выполнены численные эксперименты по турбулентному переносу мультимодальной пыли для семи значений референтной скорости ветра  $U_{10}$  и двух значений осредненных коэффициентов диффузии (см. табл. 3.8).

При этом в качестве источника пыления задавалась вся площадь пляжа хвостохранилища, но при анализе результатов расчетов (в терминах концентрации пыли) вводился корректирующий коэффициент, учитывающий только пылящую площадь. По данным специалистов компании ЗАО «Механобр Инжиниринг» [19], по результатам натурных наблюдений в 2006–2008 гг. площадь пыления составляла, по одним данным, 10,9 га [19, с. 30], по другим — 8,2 га [19, с. 33]. Указанные значения площади пыления и номера страниц соответствуют отчету, посвященному реконструкции хвостохранилища до предельной высотной отметки 200 м. В условиях, когда имеется большая неопределенность

в задании конкретных участков пыления на поверхности пляжа, такой подход через корректирующий коэффициент достаточно объективен: вполне логично задавать процент пылящей поверхности от всей площади пляжа хвостохранилища.

В первую очередь анализ результатов расчетов показывает весьма слабое влияние выбора значения коэффициента турбулентной диффузии на величину концентрации пыли. В нашем случае значения осредненных коэффициентов диффузии на высоте +10 м пылящей поверхности и по объему области моделирования отличаются более чем в два раза, а изменение уровня концентрации пыли составляет менее 1 %.

Во-вторых, проанализированы поинтервальные и суммарные значения концентрации пыли в точке модели, которая соответствует центру города Апатиты на высоте +2 м от поверхности. На этом же шаге с учетом известных значений отношений интенсивности пыления для схемы DEAD и зависимости Westphal D. L. et al. получены соответствующие значения концентрации пыли для схемы DEAD. На рис. 3.27 представлены графики суммарной концентрации пыли в обсуждаемой точке (+2 м центра города Апатиты) для указанных подходов описания процесса пыления в зависимости от референтной скорости ветра  $U_{10}$  на высоте +10 м от основания модели.



**Рис. 3.27.** Расчетные значения суммарной концентрации пыли в зависимости от скорости ветрового потока на референтной высоте для двух значений площади пылящей поверхности (га):  
*а* — 10,9; *б* — 8,2

Одновременно на каждом графике приведена линия, отвечающая значению ПДК по пыли в соответствии с гигиеническими нормативами ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест». В частности, для неорганической пыли, содержащей двуокись кремния в интервале 20–70 %, в качестве максимальной разовой концентрации установлена величина 0,3 мг/м<sup>3</sup>, или 3·10<sup>-7</sup> кг/м<sup>3</sup> [187]. Заметим, что и более новые нормативы «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений» содержат ту же самую предельную величину максимальной разовой концентрации [188].

Анализ представленных кривых свидетельствует о достаточной объективности прогнозных оценок. Очевидно, что увеличение площади пыления будет приводить к росту загрязнения атмосферы, что и наблюдается на графиках рис. 3.27. При скоростях ветра менее 8 м/с превышение порогового уровня загрязнения не прогнозируется. Однако дальнейший рост скорости ветра будет приводить к росту концентрации пыли и постепенному превышению значения ПДК, а при штормовых ветрах это превышение становится уже значительным.

Заметим, что согласно указанному выше отчету ЗАО «Механобр Инжиниринг» [19] значения скорости ветра выше 8 м/с хотя и редки (вероятность превышения менее 5 %), но возможны. Поэтому противопылевые мероприятия экологических служб КФ АО «Апатит» на хвостохранилище АНОФ-2 по снижению площади пыления, безусловно, необходимы и полезны. Согласно выполненным оценкам, можно прогнозировать, что даже при штормовом северо-западном ветре (20–23 м/с) снижение площади пыления на пляже хвостохранилища до 1 га должно обеспечить нормативную чистоту атмосферы города Апатиты.

Наконец, анализ пространственного распределения концентрации пыли в поперечном направлении к потоку воздуха свидетельствует, что наибольшие концентрации пыли прогнозируются для района Старые Апатиты. Говорить о конкретных цифрах в этом вопросе преждевременно, поскольку требуется использовать более точную модель рельефа местности. Однако даже достаточно грубая в этом плане используемая модель, учитывающая предгорья Хибин и наиболее крупные возвышенности (Щучья, Воробьиная), дает качественно верную картину распределения концентрации пыли: именно район Старые Апатиты подвергается максимальному загрязнению пылью при сильном северо-западном ветре, что неоднократно находило свое подтверждение санитарными службами Мурманской области.

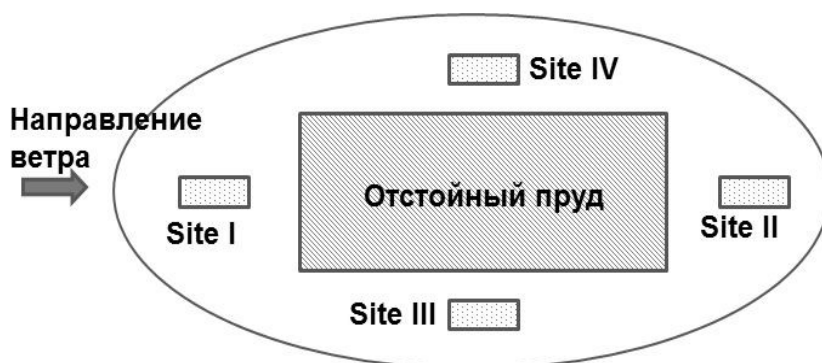
#### ***3.2.4. Результаты моделирования в подходе дискретности источника пыления***

Визуальные наблюдения за процессами пыления на хвостохранилище АНОФ-2 подсказали авторам, что более реалистичной является ситуация, когда процесс пыления с поверхности пляжа в разные годы и летние месяцы происходит с различных пространственно разнесенных участков пляжа, на которых при определенных метеорологических параметрах и технологических операциях «созревают» благоприятные для процесса пыления условия. Именно такие ситуации, с учетом вариации скорости ветрового потока, количества дискретных участков, выбираемых случайным образом, а значит, и площади пыления, рассмотрены авторами в представленном исследовании.

*Ситуация больших областей пыления.* Первоначально рассмотрены ситуации крупных областей пыления. Представлены результаты исследования уровня загрязнения атмосферы пылью с хвостохранилища АНОФ-2 в районе города Апатиты при максимальной проектной высоте пляжа хвостохранилища. Изыскание выполнялось на базе разработанной авторами трехмерной компьютерной модели района «хвостохранилище АНОФ-2 — г. Апатиты» [148]. При этом использовался предложенный методический подход по оценке

интенсивности пыления при вариации скорости набегающего ветрового потока и высоты пылящей поверхности [186]. Для расчета интенсивности пыления использована зависимость Westphal D. L. et al. [177]. В численных экспериментах по турбулентному переносу мультidisперсной пыли максимальный размер частиц ограничен 70 мкм.

Дискретный способ задания площади пыления апробирован для скорости ветра на высоте +10 м над основанием модели, равной 23 м/с, т. е. штормовой ветер, при котором прогнозируется максимальное загрязнение атмосферы. Из бесконечного количества возможных вариантов дискретного распределения источников пыления рассмотрено 4 варианта (рис. 3.28) расположения участков пыления прямоугольной формы размером  $500 \times 200$  м (т. е. те же 10 га): Site I, Site II (продольные), Site III и Site IV (боковые).



**Рис. 3.28.** Схематичное расположение на территории хвостохранилища участков пылящей поверхности при вариации их местоположения

Естественно, что в этой ситуации для каждого участка пыления выполнены оценки всех параметров, необходимых для расчета интенсивности пыления (осредненная горизонтальная компонента скорости ветра на высоте +10 м над участком пыления и динамическая скорость) [186].

Оказалось, что значения динамической скорости минимальны для продольных участков Site I и Site II (2,223 и 2,213 м/с соответственно) и максимальны для боковых участков Site III и Site IV (2,459 и 2,562 м/с соответственно). Оценки интенсивности пыления, рассчитанные для зависимости Westphal D. L. et al. [177], показали следующие результаты для участков Site I, Site II, Site III и Site IV:  $7,08 \cdot 10^{-4}$ ,  $6,96 \cdot 10^{-4}$ ,  $1,06 \cdot 10^{-3}$  и  $1,25 \cdot 10^{-3}$  кг/(м<sup>2</sup>·с) соответственно. Представляется, что возможными причинами в различиях значений указанных расчетных параметров для продольных (Site I и Site II) и боковых (Site III и Site IV) участков пыления могут быть следующие:

неоднородность поля скорости для продольных и боковых участков, связанная с принятой в модели формой хвостохранилища (верхняя половина усеченного эллипсоида при соотношении продольного и поперечного размеров 2 : 1);

наличие в модели вблизи участка Site IV возвышенности, которая является предгорьем Хибин.

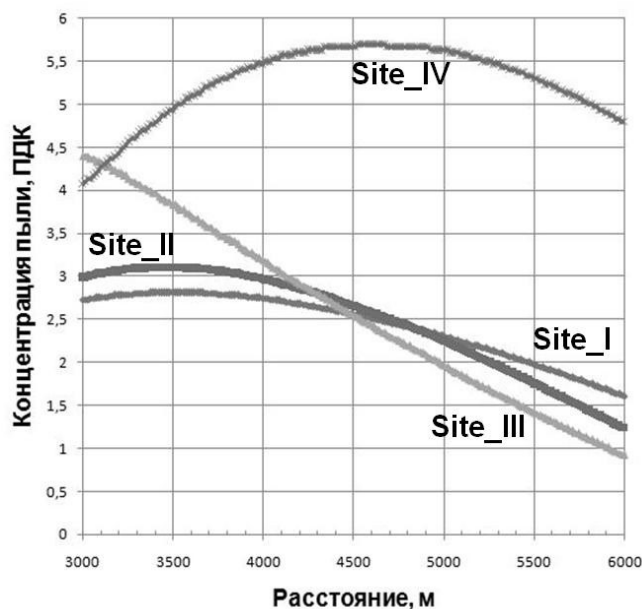
Результаты выполненных оценок загрязнения атмосферы для каждого указанного выше участка пыления представлены в форме пространственного распределения суммарной концентрации пыли в поперечном направлении к ветровому потоку (рис. 3.29). Рассматриваемое сечение проходит через центр модели города Апатиты на высоте +2 м от поверхности.

Анализ поведения представленных кривых позволяет обратить внимание на следующие моменты:

имеет место превышение уровня ПДК по пыли во всем рассматриваемом сечении для любого участка пыления;

для центральной части модели города Апатиты наиболее серьезное превышение уровня ПДК прогнозируется для участка пыления Site IV. В этом отношении остальные рассмотренные участки пыления равноценно менее опасны (практически вдвое);

оба продольных участка пыления Site I и Site II, а также боковой Site III оказывают максимально негативное воздействие на район Старые Апатиты, что объясняется влиянием предгорья Хибин на формирующуюся структуру поля скорости.



**Рис. 3.29.** Пространственное распределение суммарной концентрации пыли (в единицах ПДК) в поперечном направлении к ветровому потоку при вариации местоположения участков пылящей поверхности

Таким образом, представлены результаты задачи по исследованию загрязнения приземного слоя атмосферы при максимальной проектной высоте пляжа хвостохранилища АНОФ-2 для варианта больших дискретных участков пыления при штормовом ветре.

Учет потенциального дискретного расположения источников пыления при штормовой скорости ветра подтверждает прогноз превышения загрязнения уровня ПДК для г. Апатиты. При этом наиболее опасным в целом для города является боковое расположение участков пыления со стороны предгорья Хибин



(Site IV), что позволяет, в первую очередь, рекомендовать природоохранным подразделениям КФ АО «Апатит» обратить особое внимание на эту часть хвостохранилища. Для остальных потенциальных участков пыления в наиболее сложном положении по уровню загрязнения атмосферы оказывается район Старые Апатиты, что объясняется структурой поля скорости. Снижение площади пыления рассматриваемых участков от 3 до 6 раз позволит уменьшить содержание пыли в атмосфере г. Апатиты даже при штормовом ветре на уровне ПДК.

### **Ситуация мелких участков пыления**

*Обработка методики подготовки исходных данных и обработки результатов расчетов.* Дискретность мелких участков пыления первоначально рассмотрена на небольшом количестве пылящих площадей.

Цель исследования — на примере района хвостохранилища, ближайшего к городу Апатиты, оценить уровни загрязнения атмосферы города в зависимости от скорости набегающего ветрового потока и площади пыления при дискретном расположении пылящих участков (рис. 3.30). Кроме того, предстояло отработать методику подготовки исходных данных и обработки результатов моделирования для некоторого конечного, но большого числа участков пыления.



**Рис. 3.30.** Схематичное расположение на территории хвостохранилища участков (1–5) пылящей поверхности

В качестве базовой используется разработанная авторами компьютерная модель, представленная в подразделе 3.2.1 и более ранних публикациях [189; 190].

Принятые в расчетах параметры варьирования следующие:

скорость ветрового потока — 5, 11, 17 и 23 м/с на высоте +10 м от основания модели;

площадь пыления 2 га (участок 1), 4 га (участки 1, 2), 6 га (участки 1–3), 8 га (участки 1–4) и 10 га (участки 1–5) (рис. 3.31).

Методика проведения исследований с использованием программы COMSOL [136] является аналогичной ранее используемой [189; 190]:

для указанных значений скорости ветра рассчитываются стационарные аэродинамические параметры модели (скоростные поля, коэффициенты турбулентной вязкости). Для этого используется модель воздушной динамики

обтекания неоднородной поверхности в рамках приближения несжимаемой жидкости, дополненная стандартной ( $k-\epsilon$ )-моделью турбулентности. Расчет выполняется до выхода на стационарный режим;

через операцию осреднения определяются значения продольной составляющей скорости ветра на высоте +10 м  $U_{10}$  над каждым участком пыления и величина коэффициента турбулентной вязкости и турбулентной диффузии для области моделирования;

для каждого участка пыления пересчитываются значения динамической скорости  $U_*$  и, используя подход Westphal D. L. et al. [177], величины вертикального потока массы для каждого интервала (количеством 7 со своим «весом») размера пыли [17]. В качестве примера расчетных данных в табл. 3.10 для каждого участка пыления приведены прогнозные значения динамической скорости, поинтервальные и суммарные величины вертикального потока массы;

рассчитываются стационарные поинтервальные поля распределения пыли в области моделирования при указанных вариациях параметров модели. Для определения пространственного распределения загрязнения используется уравнение конвективно-диффузионного переноса.

Таблица 3.10

Расчетные значения динамической скорости для каждого участка пыления, поинтервальные и суммарные величины вертикального потока массы

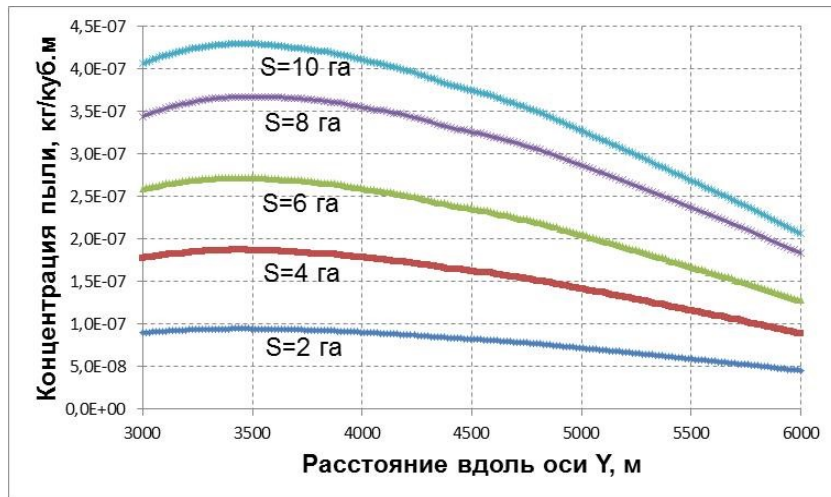
$U_{10}$ , м/с	$U_*$ , м/с	Вертикальный поток массы, кг/(м <sup>2</sup> ·с)							$\Sigma$
		I	II	III	IV	V	VI	VII	
Участок 1									
5,0	0,5148	4,480·10 <sup>-8</sup>	1,690·10 <sup>-7</sup>	2,892·10 <sup>-7</sup>	3,950·10 <sup>-7</sup>	4,256·10 <sup>-7</sup>	3,849·10 <sup>-7</sup>	3,278·10 <sup>-7</sup>	2,036·10 <sup>-6</sup>
11,0	1,1340	1,055·10 <sup>-6</sup>	3,979·10 <sup>-6</sup>	6,807·10 <sup>-6</sup>	9,300·10 <sup>-6</sup>	1,002·10 <sup>-5</sup>	9,061·10 <sup>-6</sup>	7,718·10 <sup>-6</sup>	4,794·10 <sup>-5</sup>
17,0	1,7510	5,995·10 <sup>-6</sup>	2,262·10 <sup>-5</sup>	3,870·10 <sup>-5</sup>	5,287·10 <sup>-5</sup>	5,696·10 <sup>-5</sup>	5,151·10 <sup>-5</sup>	4,388·10 <sup>-5</sup>	2,725·10 <sup>-4</sup>
23,0	2,3700	2,013·10 <sup>-5</sup>	7,593·10 <sup>-5</sup>	1,299·10 <sup>-4</sup>	1,775·10 <sup>-4</sup>	1,912·10 <sup>-4</sup>	1,729·10 <sup>-4</sup>	1,473·10 <sup>-4</sup>	9,148·10 <sup>-4</sup>
Участок 2									
5,0	0,5093	4,293·10 <sup>-8</sup>	1,620·10 <sup>-7</sup>	2,771·10 <sup>-7</sup>	3,786·10 <sup>-7</sup>	4,079·10 <sup>-7</sup>	3,688·10 <sup>-7</sup>	3,142·10 <sup>-7</sup>	1,952·10 <sup>-6</sup>
11,0	1,1220	1,011·10 <sup>-6</sup>	3,815·10 <sup>-6</sup>	6,526·10 <sup>-6</sup>	8,916·10 <sup>-6</sup>	9,606·10 <sup>-6</sup>	8,687·10 <sup>-6</sup>	7,400·10 <sup>-6</sup>	4,596·10 <sup>-5</sup>
17,0	1,7340	5,770·10 <sup>-6</sup>	2,177·10 <sup>-5</sup>	3,724·10 <sup>-5</sup>	5,088·10 <sup>-5</sup>	5,481·10 <sup>-5</sup>	4,957·10 <sup>-5</sup>	4,222·10 <sup>-5</sup>	2,623·10 <sup>-4</sup>
23,0	2,347	1,937·10 <sup>-5</sup>	7,308·10 <sup>-5</sup>	1,250·10 <sup>-4</sup>	1,708·10 <sup>-4</sup>	1,840·10 <sup>-4</sup>	1,664·10 <sup>-4</sup>	1,418·10 <sup>-4</sup>	8,805·10 <sup>-4</sup>
Участок 3									
5,0	0,4994	3,967·10 <sup>-8</sup>	1,497·10 <sup>-7</sup>	2,561·10 <sup>-7</sup>	3,498·10 <sup>-7</sup>	3,769·10 <sup>-7</sup>	3,408·10 <sup>-7</sup>	2,903·10 <sup>-7</sup>	1,803·10 <sup>-6</sup>
11,0	1,1000	9,344·10 <sup>-7</sup>	3,525·10 <sup>-6</sup>	6,031·10 <sup>-6</sup>	8,240·10 <sup>-6</sup>	8,877·10 <sup>-6</sup>	8,028·10 <sup>-6</sup>	6,838·10 <sup>-6</sup>	4,247·10 <sup>-5</sup>
17,0	1,7010	5,344·10 <sup>-6</sup>	2,016·10 <sup>-5</sup>	3,449·10 <sup>-5</sup>	4,712·10 <sup>-5</sup>	5,077·10 <sup>-5</sup>	4,591·10 <sup>-5</sup>	3,911·10 <sup>-5</sup>	2,429·10 <sup>-4</sup>
23,0	2,3030	1,794·10 <sup>-5</sup>	6,769·10 <sup>-5</sup>	1,158·10 <sup>-4</sup>	1,582·10 <sup>-4</sup>	1,705·10 <sup>-4</sup>	1,541·10 <sup>-4</sup>	1,313·10 <sup>-4</sup>	8,156·10 <sup>-4</sup>
Участок 4									
5,0	0,5157	4,514·10 <sup>-8</sup>	1,703·10 <sup>-7</sup>	2,914·10 <sup>-7</sup>	3,981·10 <sup>-7</sup>	4,288·10 <sup>-7</sup>	3,878·10 <sup>-7</sup>	3,304·10 <sup>-7</sup>	2,052·10 <sup>-6</sup>
11,0	1,1360	1,063·10 <sup>-6</sup>	4,009·10 <sup>-6</sup>	6,859·10 <sup>-6</sup>	9,370·10 <sup>-6</sup>	1,009·10 <sup>-5</sup>	9,129·10 <sup>-6</sup>	7,776·10 <sup>-6</sup>	4,830·10 <sup>-5</sup>
17,0	1,7530	6,020·10 <sup>-6</sup>	2,271·10 <sup>-5</sup>	3,886·10 <sup>-5</sup>	5,309·10 <sup>-5</sup>	5,719·10 <sup>-5</sup>	5,172·10 <sup>-5</sup>	4,406·10 <sup>-5</sup>	2,736·10 <sup>-4</sup>
23,0	2,3720	2,021·10 <sup>-5</sup>	7,624·10 <sup>-5</sup>	1,304·10 <sup>-4</sup>	1,782·10 <sup>-4</sup>	1,920·10 <sup>-4</sup>	1,736·10 <sup>-4</sup>	1,479·10 <sup>-4</sup>	9,186·10 <sup>-4</sup>
Участок 5									
5,0	0,4838	3,496·10 <sup>-8</sup>	1,319·10 <sup>-7</sup>	2,256·10 <sup>-7</sup>	3,083·10 <sup>-7</sup>	3,321·10 <sup>-7</sup>	3,003·10 <sup>-7</sup>	2,558·10 <sup>-7</sup>	1,589·10 <sup>-6</sup>
11,0	1,0660	8,236·10 <sup>-7</sup>	3,107·10 <sup>-6</sup>	5,316·10 <sup>-6</sup>	7,263·10 <sup>-6</sup>	7,825·10 <sup>-6</sup>	7,076·10 <sup>-6</sup>	6,028·10 <sup>-6</sup>	3,744·10 <sup>-5</sup>
17,0	1,6500	4,726·10 <sup>-6</sup>	1,783·10 <sup>-5</sup>	3,050·10 <sup>-5</sup>	4,168·10 <sup>-5</sup>	4,490·10 <sup>-5</sup>	4,060·10 <sup>-5</sup>	3,459·10 <sup>-5</sup>	2,148·10 <sup>-4</sup>
23,0	2,2330	1,587·10 <sup>-5</sup>	5,988·10 <sup>-5</sup>	1,024·10 <sup>-4</sup>	1,400·10 <sup>-4</sup>	1,508·10 <sup>-4</sup>	1,364·10 <sup>-4</sup>	1,162·10 <sup>-4</sup>	7,215·10 <sup>-4</sup>

Как и ранее, гранулометрический состав отвальных хвостов с поверхности устоявшегося пляжа хвостохранилища АНОФ-2 представлен в соответствии с данными из диссертационной работы А. В. Стриженока [17] (см. табл. 3.9).

В связи с изменениями расчетной сетки, обусловленными заданием дискретных участков пыления (см. рис. 3.30), выполнен выбор демпфирующих параметров в схемах аппроксимации конвективных слагаемых для обеспечения устойчивости расчетов в широком диапазоне скоростей, задаваемых на входной границе модели. В частности, устойчивость вычислений на всем диапазоне скоростей ветрового потока на высоте +10 м  $U_{10}$  от основания модели (5–23 м/с) обеспечили: решатель (Direct UMFPACK) и демпфирующие коэффициенты (Crosswind diffusion) для уравнения сохранения импульса и Turbulence isotropic для уравнений ( $k$ - $\epsilon$ )-модели на уровне 0,70.

Прежде чем анализировать пространственные распределения концентрации пыли, полезно сравнить значения динамической скорости по участкам пыления (см. табл. 3.10). Прекрасно видно, что динамическая скорость максимальна для участка 4, а минимальна для участка 5. В цепочке участков 1–2–3 величина динамической скорости постепенно уменьшается. В таком же соотношении находятся и значения вертикальных потоков массы. Представляется, что возможной причиной в различиях значений указанных расчетных параметров для пространственно разнесенных участков пыления может быть неоднородность поля скорости для этого района, связанная с наличием в модели севернее хвостохранилища возвышенности, которая является предгорьем Хибин.

Некоторые результаты численных экспериментов по прогнозу пространственного распределения концентрации пыли представлены на рис. 3.31–3.33.



**Рис. 3.31.** Пространственное распределение суммарной концентрации пыли в поперечном к направлению ветрового потока измерении при вариации площади пылящей поверхности (скорость ветрового потока 17 м/с)

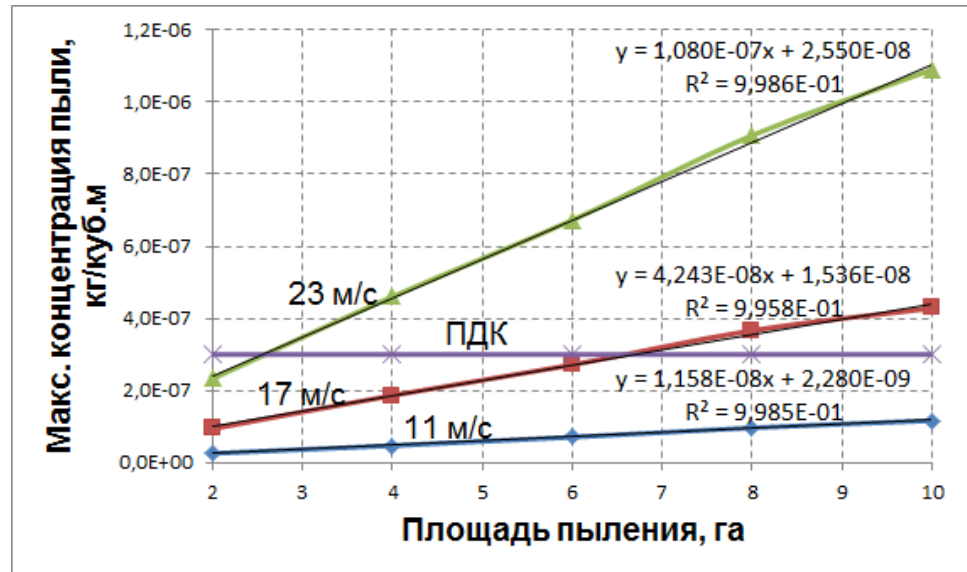


Рис. 3.32. Зависимость максимальной концентрации пыли от площади пыления при вариации скорости ветрового потока

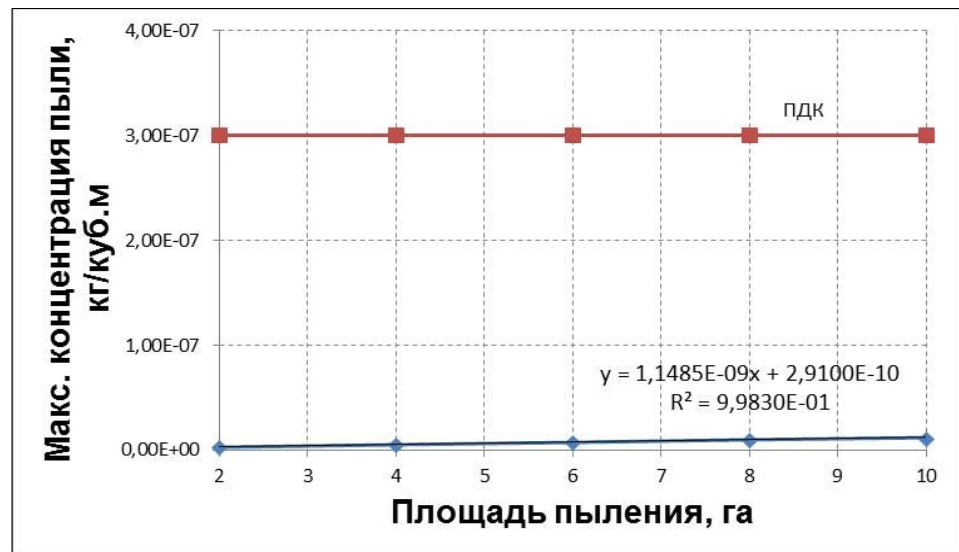


Рис. 3.33. Зависимость максимальной концентрации пыли от площади пыления при скорости ветрового потока 5 м/с

Например, на рис. 3.31. для скорости ветра 17 м/с приведены кривые пространственного распределения пыли в поперечном к направлению ветрового потока измерения. С учетом того, что для неорганической пыли, содержащей

двуокись кремния в интервале 20–70 %, в качестве максимальной разовой концентрации [187; 188] установлена величина 0,3 мг/м<sup>3</sup>, или 3·10<sup>-7</sup> кг/м<sup>3</sup>, можно сделать следующие выводы:

именно район Старых Апатитов подвержен наибольшему загрязнению;

при площади пыления более 6 га прогнозируются превышения ПДК.

Причем это превышение при площади пыления более 8 га «грозит» не только Старым Апатитам, но и южной половине города.

На рисунке 3.32 представлены зависимости максимальной концентрации пыли от площади пыления при вариации скорости ветрового потока от 11 до 23 м/с. Прекрасно видно, что расчетные зависимости с высоким коэффициентом достоверности описываются линейными функциями, что позволяет сделать прогноз критической площади пыления, при которой уровень загрязнения атмосферы достигает ПДК. В частности, при скорости ветрового потока 23 м/с необходимо уменьшить площадь пыления примерно до 2,5 га, при скорости 17 м/с — до 6,8 га, а при скорости 11 м/с можно «разрешить» иметь 25 га.

На рисунке 3.33 представлена зависимость максимальной концентрации пыли от площади пыления для скорости ветрового потока 5 м/с. Отдельное представление результатов для указанной скорости ветра связано исключительно с презентабельностью результатов в силу малых значений концентрации загрязнения. Как видно, в этом случае справедлива линейная зависимость, что позволяет легко выйти на критическую площадь пыления — около 260 га.

Анализ обобщенного изображения полученных прогнозных оценок в форме зависимости максимальной концентрации пыли при вариации обоих параметров моделирования (площади пыления и скорости ветрового потока) показал:

линейность искомой функции от площади пыления присутствует;

зависимость от скорости ветрового потока ближе к степенной функции.

Анализ зависимостей максимальной концентрации пыли от скорости ветрового потока при фиксированных значениях площади пыления свидетельствует, что с коэффициентом достоверности, близким к единице, обсуждаемая функция описывается степенной зависимостью  $C_m = A \cdot V^B$ , где  $V$  — скорость ветра, м/с. Значения коэффициентов  $A$  и  $B$  при разных значениях площади пыления приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Значения коэффициентов  $A$  и  $B$  в функциях аппроксимации максимальной концентрации пыли от скорости ветрового потока при фиксированной площади пыления

Площадь пыления, га	Коэффициент $A$	Коэффициент $B$
2	2,086·10 <sup>-11</sup>	2,973
4	3,985·10 <sup>-11</sup>	2,978
6	5,853·10 <sup>-11</sup>	2,978
8	7,967·10 <sup>-11</sup>	2,976
10	9,605·10 <sup>-11</sup>	2,971

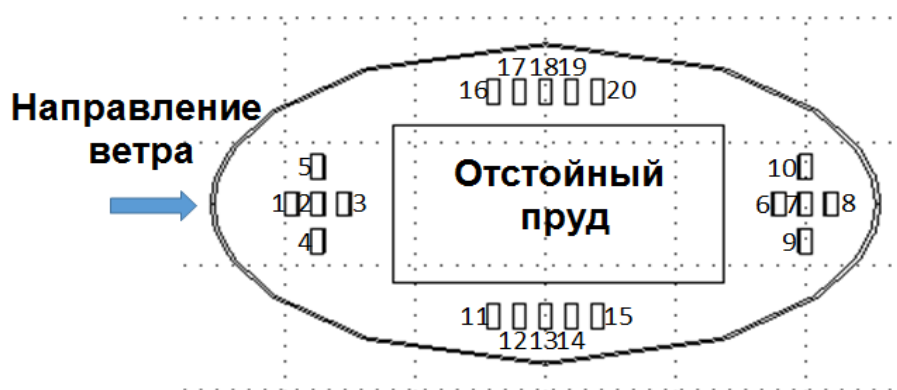
Последующий анализ коэффициентов  $A$  и  $B$  показал, что для первого коэффициента справедлива линейная зависимость  $A = 10^{-12} \cdot (9,510 \cdot S + 1,932)$ , где  $S$  — площадь пыления, га, а для второго можно использовать просто среднее  $B = 2,975$  (максимальное отклонение значений коэффициента  $B$  от его среднего значения не превышает 0,15 %). Вид обобщенной функции двух переменных, с помощью которой можно приблизительно прогнозировать уровень максимальной концентрации пыли в атмосфере, выглядит следующим образом  $C_m = 10^{-12} \cdot (9,510 \cdot S + 1,932) \cdot V^{2,975}$ . Справедливость данного выражения проверена в диапазоне значений, указанных выше. Вместе с тем, представляется, что его вполне можно экстраполировать и на большие площади пыления. Касательно скорости ветрового потока можно утверждать, что его диапазон вполне достаточен.

Таким образом, изложенный материал можно рассматривать как описание методического подхода по оценке уровня загрязнения атмосферы города Апатиты при пылении хвостохранилища АНОФ-2. В подходе учитывается роль двух параметров (площадь пыления и скорость ветра), которые оказывают основное влияние на уровень загрязнения атмосферы вниз по ветровому потоку.

*Случайный выбор участков пыления.* Исследование является продолжением изысканий по оценке загрязнения атмосферы с учетом дискретного расположения пылящих участков хвостохранилища. При этом приняты во внимание как вариация скорости ветрового потока, так и изменение площади пыления по всей поверхности пляжа хвостохранилища при случайном выборе пылящих участков. Ниже приведены результаты трех подходов к размеру пыли:

- 1 — срединный диаметр пыли;
- 2 — поинтервальный размер пыли;
- 3 — как частный случай предыдущего, только мелкая пыль 1-го и 2-го интервалов.

*Общая часть в постановке задачи.* Цель исследования — оценить уровни загрязнения атмосферы города Апатиты в зависимости от скорости набегающего ветрового потока и площади пыления при случайном выборе двадцати дискретно расположенных пылящих участков (рис. 3.34).



**Рис. 3.34.** Схематичное расположение на территории хвостохранилища участков (1–20) пылящей поверхности

Описание используемой авторской компьютерной модели представлено в работах [183; 189–192]. «Инструмент» исследования — программа COMSOL [136].

При численном моделировании приходится помнить о необходимости выбирать между желаемой точностью выполнений расчетов и возможностями компьютерной техники. Построение в компьютерной модели новых участков пыления приводит к новой геометрии в области хвостохранилища. Естественно, что для выполнения расчетов необходимо сгенерировать расчетную сетку, что, в свою очередь, определяет требуемый для выполнения расчетов объем оперативной памяти. Генерация сетки в режиме “Coarse” (число конечных элементов 29 367, число степеней свободы 157 981) привела к практически предельной величине объема оперативной памяти компьютера (около 6 Гб). Дальнейшее уменьшение размера сетки приводит к превышению возможностей вычислительной техники и с учетом неопределенностей по ряду параметров модели представляется нецелесообразным.

Принятые в расчетах параметры варьирования следующие:

скорость ветрового потока — 5, 11, 17 и 23 м/с на высоте +10 м от основания модели;

площадь пыления 2, 4, 6, 8 и 10 га.

Из построенных участков пыления (количеством 20), каждый площадью 2 га (см. рис. 3.34), можно построить большое число сочетаний участков, обеспечивающих общую площадь пыления 2 га (один участок), 4 га (два участка), 6 га (три участка), 8 га (четыре участка) и 10 га (пять участков) га. Уравнение числа сочетаний  $C_n^m$  из  $n$  (у нас 20) по  $m$ , которые отличаются только составом элементов, порядок их следования не важен, имеет вид [193; 194]:

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}.$$

Практическая реализация такого огромного числа сочетаний (например, для площадей пыления 2, 4, 6, 8 и 10 га имеем 20, 190, 1140, 4845 и 15504 вариантов соответственно) в рамках созданных моделей чрезвычайно трудозатратна.

Поэтому на данном этапе для дальнейших исследований выбран объективно реализуемый путь, содержащий 50 испытаний. Указанное количество испытаний построено с помощью разработанной программы. Задействовано несколько встроенных подпрограмм компилятора MS FORTRAN POWER STATION 4.0 (SYSTEM\_CLOCK(Count), RANDOM\_SEED(PUT=Seed), RANDOM\_NUMBER(R)) в предположении равномерного распределения случайных чисел как в диапазоне площади пыления (от 2 до 10 га), так и в нумерации участков пыления (от 1 до 20). В результате сформирована следующая информация по количеству и номеру участков пыления (табл. 3.12).

Как видно из данных табл. 3.12, наибольшее число испытаний предстоит выполнить для площади пыления 6 га. Далее по мере уменьшения числа испытаний цепочка выстраивается в таком порядке — 8, 4, 2 и 10 га.

Таблица 3.12

Площадь пыления, количество испытаний и номера участков пыления под соответствующую площадь

Площадь пыления, га / Количество испытаний				
2 / 9	4 / 10	6 / 12	8 / 11	10 / 8
Номер участка пыления				
9;	12 8;	8 2 16;	11 6 13 3;	14 10 9 13 3;
1;	17 14;	20 18 3;	3 12 18 8;	18 16 15 17 11;
7;	2 13;	4 3 8;	3 2 20 4;	4 3 5 10 20;
11;	14 9;	5 17 4;	1 11 18 20;	8 1 20 19 7;
16;	19 18;	10 3 9;	13 7 5 20;	20 17 7 14 9;
20;	4 14;	2 19 18;	17 13 10 5;	5 16 7 6 18;
13;	8 20;	19 8 14;	18 6 5 12;	10 2 12 11 6;
17;	20 19;	7 18 16;	2 12 11 17;	2 17 19 11 7
3	5 1;	11 3 1;	14 7 17 16;	
	6 14	16 9 6;	19 13 3 1;	
		3 19 8;	4 12 3 14	
		1 8 6		

В принятой компьютерной модели расчет конвективно-диффузионного переноса мелкодисперсной пыли выполняется для 7 интервалов крупности. Таким образом, для единственного значения скорости ветрового потока потребуется выполнить 350 вычислений. Первоначально осуществляется подготовка исходных данных, а по завершению — обработка результатов расчетов. Перед выполнением расчетов переноса пыли предстоит через ручную обработку и процедуру вычисления по авторским программам определить значения динамической скорости и вертикального потока массы для каждого участка пыления.

С учетом предшествующего опыта вычислений и обработки результатов [183; 189–192] представляется возможным ограничиться четырьмя значениями скорости ветра — 5, 11, 17 и 23 м/с, чтобы реализовать обозначенный объем вычислений и обработки результатов. При этом полное количество расчетов переноса пыли составит 1400.

Методика проведения исследований является аналогичной ранее используемой. В качестве инструмента исследования применены трехмерные CFD-модели [183; 189–192], разработанные в программном продукте COMSOL [136]. Дополнительно применялись вспомогательные авторские программы подготовки исходных данных и обработки результатов численных экспериментов. В целом соблюдается описанная выше последовательность исследований:

для указанных значений скорости ветра рассчитываются стационарные аэродинамические параметры модели (скоростные поля, коэффициенты турбулентной вязкости). Для этого используется модель воздушной динамики обтекания неоднородной поверхности в рамках приближения несжимаемой жидкости, дополненная стандартной ( $k$ - $\epsilon$ )-моделью турбулентности [195–198];

через операцию осреднения определяются значения продольной составляющей скорости ветра на высоте +10 м  $U_{10}$  над каждым участком пыления и величина коэффициента турбулентной вязкости и турбулентной диффузии для области моделирования;



для каждого участка пыления пересчитываются значения динамической скорости  $U_*$  (табл. 3.13) и, используя подход [177], величины вертикального потока массы либо для срединного диаметра, либо для каждого интервала (7 интервалов со своим «весом») размера пыли [64]. В качестве примера расчетных данных в табл. 3.14 приведены для каждого участка пыления прогнозные значения величины ВПМ при вариации скорости ветра;

рассчитываются стационарные поинтервальные поля распределения пыли в области моделирования при указанных вариациях параметров модели. Для определения пространственного распределения загрязнения решается уравнение конвективно-диффузионного переноса. В численных экспериментах используются значения коэффициентов турбулентной диффузии, которые получены операцией осреднения по объему моделируемой области коэффициента турбулентной вязкости с поправкой на плотность воздуха и число Прандтля — Шмидта [198]. Для скоростей ветра 5, 11, 17 и 23 м/с принятые в расчетах коэффициенты турбулентной диффузии имеют следующие значения: 49, 108, 170 и 230 м<sup>2</sup>/с соответственно.

В связи с изменениями расчетной сетки, обусловленными заданием дискретных участков пыления (см. рис. 3.34), выполнен выбор демпфирующих параметров в схемах аппроксимации конвективных слагаемых для обеспечения устойчивости расчетов в широком диапазоне скоростей, задаваемых на входной границе модели. В частности, устойчивость вычислений на всем диапазоне скоростей ветрового потока на высоте +10 м от основания модели (5–23 м/с) обеспечили: решатель (Direct UMFPACK) и демпфирующие коэффициенты (Crosswind diffusion) для уравнения сохранения импульса и Turbulence isotropic для уравнений ( $k$ - $\epsilon$ )-модели на уровне 0,7. Для достижения положительных значений концентрации пыли при решении конвективно-диффузионного уравнения использован тот же решатель (Direct UMFPACK) и демпфирующий коэффициент (Isotropic diffusion) на уровне 0,65.

*Срединный диаметр.* Чтобы сократить объем вычислений и процесс обработки результатов, предлагается воспользоваться опытом [192] и выполнить исследование для срединного диаметра частиц пыли. Это позволит сократить объем вычислений в 7 раз при незначительной потере точности расчетов. Единственный минус видится в том, что исчезает информация по загрязнению атмосферы мелкой пылью диаметром менее 10 мкм, что можно устранить, выполнив полный цикл исследований с интервальным распределением пыли по размерам.

Для пыли срединного диаметра (35 мкм) в приближении Стокса скорость оседания равна 0,0955 м/с.

Прежде чем анализировать пространственные распределения концентрации пыли, полезно сравнить значения ВПМ по участкам пыления (см. табл. 3.13). Видно, что ВПМ максимален для участков 16–20, а минимален для участков 1–5. В цепочке участков 1–2–3 величина ВПМ постепенно растет, а в цепочке 6–7–8 — уменьшается. Представляется, что причиной в различиях значений ВПМ для пространственно разнесенных участков пыления является неоднородность поля скорости для этого района, связанная с наличием в модели севернее хвостохранилища предгорий Хибин.

Некоторые результаты численных экспериментов по прогнозу пространственного распределения концентрации пыли представлены на рис. 3.35, 3.36.

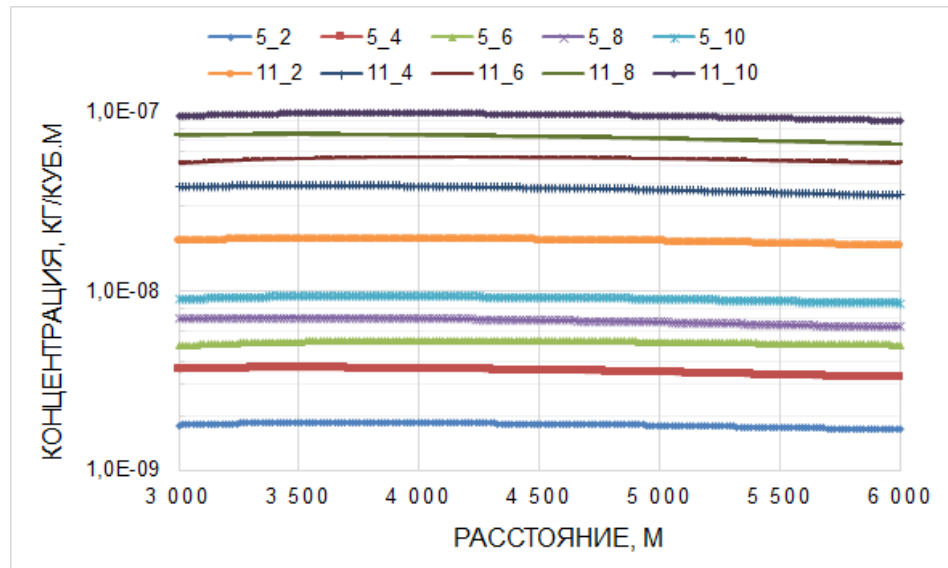
Таблица 3.13

Значения динамической скорости  $U_*$  для участков пыления при вариации скорости ветра, м/с

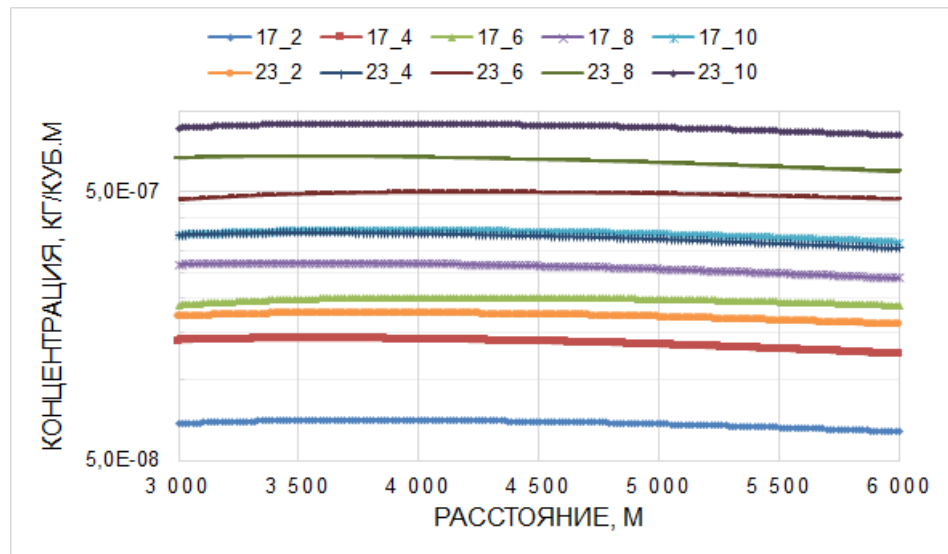
Номер участка пыления	Скорость ветра, м/с			Номер участка пыления	Скорость ветра, м/с				
	5	11	17		23	17	11	5	
1	0,4365	0,9606	1,4724	11	1,9923	1,7760	1,552	23	2,4031
2	0,4534	0,9979	1,5305	12	2,0711	1,7793	1,568	23	2,4078
3	0,4735	1,0422	1,6023	13	2,1681	1,7799	1,566	23	2,4087
4	0,4257	0,9367	1,4464	14	1,9570	1,7790	1,556	23	2,4076
5	0,4652	1,0237	1,5742	15	2,1300	1,7887	1,618	23	2,4207
6	0,5148	1,1339	1,7325	16	2,3721	1,8667	1,2120	23	2,5261
7	0,5093	1,1220	1,7349	17	2,3484	1,8726	1,2155	23	2,5342
8	0,4994	1,1001	1,7015	18	2,3032	1,8714	1,2141	23	2,5327
9	0,4838	1,0659	1,6492	19	2,2325	1,8726	1,2144	23	2,5343
10	0,5158	1,1360	1,7547	20	2,3751	1,8674	1,2106	23	2,5274

Таблица 3.14  
 Расчетные для каждого участка участка пыления значения полной величины вертикального потока массы при вариации скорости ветра, кг/(м<sup>2</sup>·с)

Скорость, м/с	№	ВПМ	№	ВПМ	№	ВПМ	№	ВПМ	№	ВПМ
5	1	1,0525·10 <sup>-06</sup>	6	2,0363·10 <sup>-06</sup>	11	2,2001·10 <sup>-06</sup>	16	2,6635·10 <sup>-06</sup>		
11		2,4688·10 <sup>-05</sup>		4,7940·10 <sup>-05</sup>		5,1649·10 <sup>-05</sup>		6,2570·10 <sup>-05</sup>		
17		1,3631·10 <sup>-04</sup>		2,7353·10 <sup>-04</sup>		2,8851·10 <sup>-04</sup>		3,5215·10 <sup>-04</sup>		
23		4,5693·10 <sup>-04</sup>		9,1815·10 <sup>-04</sup>		9,6720·10 <sup>-04</sup>		1,1809·10 <sup>-03</sup>		
5	2	1,2256·10 <sup>-06</sup>	7	1,9515·10 <sup>-06</sup>	12	2,2103·10 <sup>-06</sup>	17	2,6940·10 <sup>-06</sup>		
11		2,8760·10 <sup>-05</sup>		4,5961·10 <sup>-05</sup>		5,1933·10 <sup>-05</sup>		6,3310·10 <sup>-05</sup>		
17		1,5914·10 <sup>-04</sup>		2,6273·10 <sup>-04</sup>		2,9067·10 <sup>-04</sup>		3,5662·10 <sup>-04</sup>		
23		5,3355·10 <sup>-04</sup>		8,8202·10 <sup>-04</sup>		9,7478·10 <sup>-04</sup>		1,1960·10 <sup>-03</sup>		
5	3	1,4572·10 <sup>-06</sup>	8	1,8032·10 <sup>-06</sup>	13	2,2080·10 <sup>-06</sup>	18	2,6800·10 <sup>-06</sup>		
11		3,4210·10 <sup>-05</sup>		4,2474·10 <sup>-05</sup>		5,1901·10 <sup>-05</sup>		6,3017·10 <sup>-05</sup>		
17		1,9113·10 <sup>-04</sup>		2,4305·10 <sup>-04</sup>		2,9105·10 <sup>-04</sup>		3,5570·10 <sup>-04</sup>		
23		6,4080·10 <sup>-04</sup>		8,1599·10 <sup>-04</sup>		9,7621·10 <sup>-04</sup>		1,1932·10 <sup>-03</sup>		
5	4	9,5203·10 <sup>-07</sup>	9	1,5890·10 <sup>-06</sup>	14	2,1994·10 <sup>-06</sup>	19	2,6813·10 <sup>-06</sup>		
11		2,2326·10 <sup>-05</sup>		3,7438·10 <sup>-05</sup>		5,1718·10 <sup>-05</sup>		6,3074·10 <sup>-05</sup>		
17		1,2692·10 <sup>-04</sup>		2,1452·10 <sup>-04</sup>		2,9045·10 <sup>-04</sup>		3,5656·10 <sup>-04</sup>		
23		4,2539·10 <sup>-04</sup>		7,2039·10 <sup>-04</sup>		9,7435·10 <sup>-04</sup>		1,1962·10 <sup>-03</sup>		
5	5	1,3577·10 <sup>-06</sup>	10	2,0519·10 <sup>-06</sup>	15	2,2469·10 <sup>-06</sup>	20	2,6467·10 <sup>-06</sup>		
11		3,1851·10 <sup>-05</sup>		4,8301·10 <sup>-05</sup>		5,2830·10 <sup>-05</sup>		6,2287·10 <sup>-05</sup>		
17		1,7808·10 <sup>-04</sup>		2,7492·10 <sup>-04</sup>		2,9685·10 <sup>-04</sup>		3,5263·10 <sup>-04</sup>		
23		5,9696·10 <sup>-04</sup>		9,2278·10 <sup>-04</sup>		9,9576·10 <sup>-04</sup>		1,1832·10 <sup>-03</sup>		

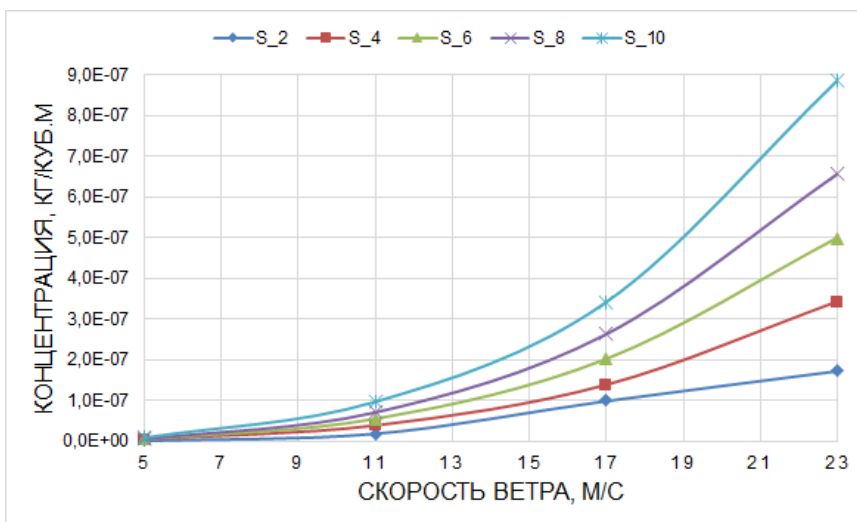


*a*



*b*

**Рис. 3.35.** Пространственное распределение осредненной по количеству испытаний концентрации пыли в поперечном к направлению ветрового потока измерении при вариации площади пылящей поверхности и скорости ветрового потока (м/с):  
*a* — 5 и 11; *b* — 17 и 23



**Рис. 3.36.** Зависимость осредненной по числу испытаний концентрации пыли в центре города Апатиты от скорости ветрового потока при фиксированной площади пыления

Например, на рис. 3.35. для скорости ветра в диапазоне от 5 до 23 м/с приведены кривые пространственного распределения пыли (осредненные по числу испытаний для анализируемых площадей пыления) в поперечном к направлению ветрового потока измерении. Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

именно район Старых Апатитов подвержен наибольшему загрязнению. При этом кривые загрязнения не имеют столь ярко выраженных максимумов для указанного района, как это прогнозировалось в работах [190; 191]. Причина сглаживания графиков — осреднение по числу испытаний;

для скорости ветра 5 и 11 м/с превышений уровня ПДК не прогнозируется (см. рис. 3.35, а);

для скорости ветра 17 м/с при площади пыления более 8 га прогнозируются превышения ПДК. Причем это превышение «грозит» не только Старым Апатитам, но и всему городу (см. рис. 3.35, б);

для скорости ветра 23 м/с лишь минимальная площадь пыления 2 га не вызывает «тревоги», но при больших площадях пыления для всего города прогноз негативный (см. рис. 3.35, в).

Анализ расчетных значений осредненной по числу испытаний концентрации пыли в центре города Апатиты при вариации обоих параметров моделирования (площади пыления и скорости ветрового потока) свидетельствует:

линейность искомой функции от площади пыления присутствует;

концентрация пыли от скорости ветра (см. рис. 3.36) ближе к степенной функции.

Анализ зависимостей осредненной по числу испытаний концентрации пыли в центре города Апатиты от скорости ветрового потока при фиксированных значениях площади пыления свидетельствует, что с коэффициентом достоверности, близким к единице, обсуждаемая функция описывается степенной зависимостью  $C_m = A \cdot V^B$ , где  $V$  — скорость ветра, м/с. Значения коэффициентов  $A$  и  $B$  при разных значениях площади пыления приведены в табл. 3.15.

Таблица 3.15

Значения коэффициентов  $A$  и  $B$  в функциях линейной аппроксимации осредненной по числу испытаний концентрации пыли в центре города Апатиты от скорости ветрового потока при фиксированной площади пыления

Площадь пыления, га	Коэффициент $A$	Коэффициент $B$
2	$1,2824 \cdot 10^{-11}$	2,9798
4	$2,9034 \cdot 10^{-11}$	2,9881
6	$4,3294 \cdot 10^{-11}$	2,9822
8	$5,6072 \cdot 10^{-11}$	2,9897
10	$7,6101 \cdot 10^{-11}$	3,0805

Последующий анализ коэффициентов  $A$  и  $B$  показал, что для первого коэффициента с достоверностью, близкой к единице, справедлива линейная зависимость:

$$A = 10^{-12} \cdot (7,6796 \cdot S - 2,6126),$$

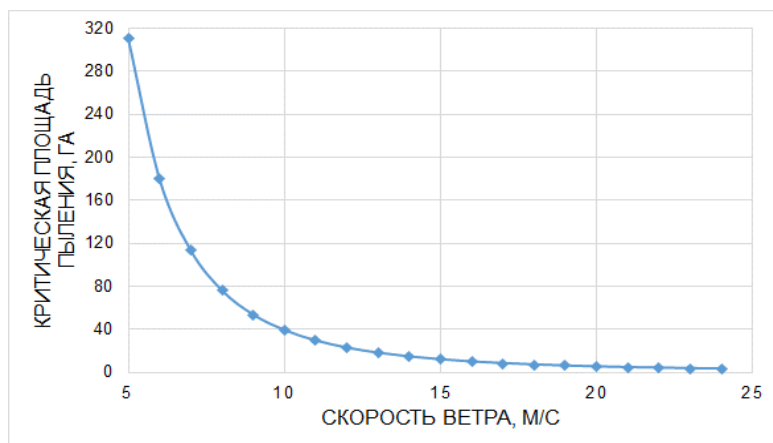
где  $S$  — площадь пыления, га, а для второго можно просто использовать среднее  $B = 3,0041$  (максимальное отклонение значений коэффициента  $B$  от его среднего значения достигает 2,54 %). Вид обобщенной функции двух переменных, с помощью которой можно ориентировочно прогнозировать уровень осредненной по числу испытаний концентрации пыли в центре города Апатиты в атмосфере, выглядит следующим образом:

$$C_m = 10^{-12} \cdot (7,6796 \cdot S - 2,6126) \cdot V^{3,0041}.$$

Справедливость данного выражения проверена в диапазоне значений, указанных выше. Вместе с тем, представляется, что его вполне можно экстраполировать и на бóльшие площади пыления. Касательно скорости ветрового потока можно утверждать, что его диапазон вполне достаточен.

Приведенная выше аналитическая зависимость осредненной по числу испытаний концентрации пыли в центре города Апатиты от скорости ветрового потока и площади пыления позволяет оценить критическую площадь, при которой в исследуемом диапазоне значений скорости ветра обеспечивается уровень ПДК. На рис. 3.37 приведен график площади пыления в зависимостях от скорости ветра, который прекрасно описывается степенной функцией вида  $S_{crit} = 34097 \cdot V^{-2,937}$ . Поведение графика физически верное: с увеличением скорости ветра необходимо сокращать площадь пылящей поверхности. Если при скорости ветра 10 м/с критическая площадь составляет почти 40 га, то при скорости 20 м/с — всего 5 га и т. д.

Представленный материал можно рассматривать как изложение усовершенствованного методического подхода по оценке уровня загрязнения атмосферы города Апатиты при пылении хвостохранилища АНОФ-2 и планирования природоохранных мероприятий по закреплению хвостов и снижению пыления. В усовершенствованном подходе учитывается влияние двух параметров (площадь пыления, которая обеспечивается случайным выбором пылящих участков по поверхности пляжа, и скорость ветра), которые оказывают определяющее воздействие на уровень загрязнения атмосферы вниз по ветровому потоку.



**Рис. 3.37.** Критические площади пыления в зависимости от скорости ветрового потока

*Поинтервальное распределение пыли.* Графически указанные выше особенности (при обсуждении табл. 3.14) объединения по группам касательно динамической скорости показаны на гистограмме (рис. 3.38), на которой представлены вертикальные потоки массы участков пыления при скорости ветрового потока 11 м/с.



**Рис. 3.38.** Вертикальный поток массы на участках пыления при скорости ветра 11 м/с, кг/(м<sup>2</sup>·с)

Отметим, что при рассмотренном диапазоне скорости ветрового потока (5–23 м/с с шагом 7 м/с) и 50 вариантах сочетаний участков пыления для семи интервалов распределения пыли выполнены и обработаны результаты 1400 расчетов.

Сопоставление значений пороговой скорости ветровой эрозии (см. табл. 3.9) и расчетной динамической скорости для участков пыления (см. табл. 3.13) свидетельствует о том, что:

при значениях скорости ветра 11, 17 и 23 м/с происходит переход всей пыли (из рассматриваемого диапазона крупности) во взвешенное состояние и ее дальнейший конвективно-диффузионный перенос;

при значении скорости ветра 5 м/с лишь мелкая пыль (1-й интервал) не переходит во взвешенное состояние (велики силы сцепления между мелкими частицами) [156] и не участвует в дальнейшем конвективно-диффузионном переносе. Отмеченный момент важен в ситуациях, когда в оценках вертикального потока массы применяются схемы DEAD [156; 172] или COGART [161; 162], в формализованном описании которых присутствует параметр пороговой скорости ветровой эрозии. При используемом авторами подходе [177] указанный параметр отсутствует, что позволяет утверждать, что в выполненных оценках для скорости ветрового потока 5 м/с имеет место переоценка уровня загрязнения воздуха примерно на 2 %.

Для лучшего понимания анализа результатов расчетов напомним принятую в компьютерной модели схему расположения участков пыления (см. рис. 3.28) [190], а также приведем расшифровку легенды рис. 3.39, *a–d* рассмотренных вариантов сочетаний участков пыления (табл. 3.16, столбец 1).

Кроме того, целесообразно укрупнить области пыления следующим образом [190]: участки 1–5 — I область (наиболее удаленная от города); участки 6–10 — II область (самая близкая к городу); участки 11–15 — III область; участки 16–20 — IV область (ближайшая к предгорьям Хибин).

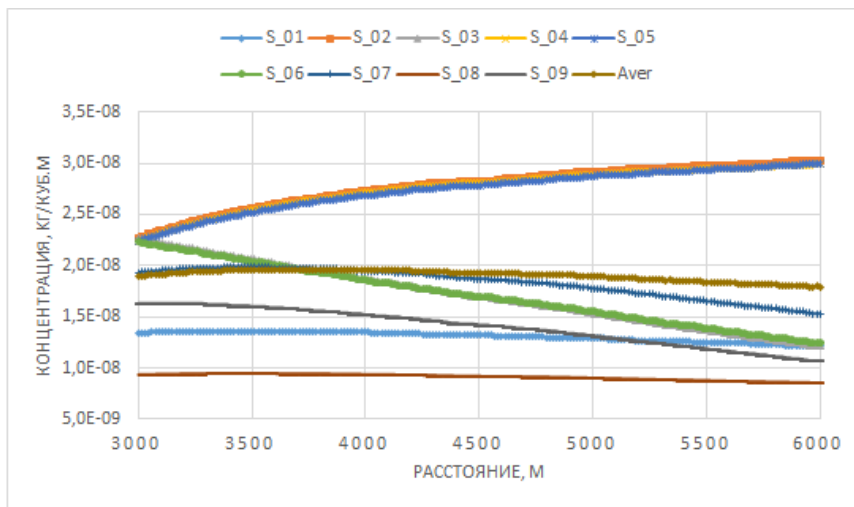
На рисунке 3.39, *a–d* представлены пространственные распределения суммарной, детальной и осредненной (по числу вариантов сочетаний) концентрации пыли на высоте +2 м от поверхности города Апатиты в поперечном к направлению ветрового потока измерении (значение продольной координаты равно 13 500 м) при скорости ветрового потока 11 м/с и вариации площади пыления.

Как видно из представленных графиков, поведение распределений весьма разнообразно. Это свидетельствует о том, что разные сочетания участков пыления будут приводить к различным загрязнениям атмосферы в конкретных районах города. Имеют место кривые как с положительной, так и с отрицательной производной по пространству: в первом случае максимальное загрязнение атмосферы прогнозируется в северной части города; во втором случае — в районе Старых Апатитов. Присутствуют кривые, где имеются максимумы концентрации пыли (например, максимальное загрязнение атмосферы в районе центра города), т. е. в определенной области пространства происходит смена знака производной графиков пространственного распределения.

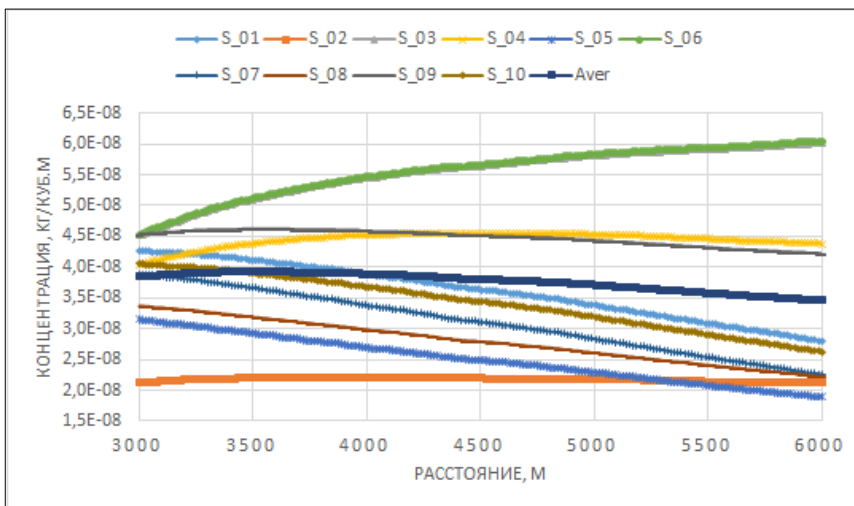
Данные распределения отражают элемент случайности в выборе участков пыления, что представляется более адекватным отображением реальных процессов пыления и последующего загрязнения атмосферы. Напомним, что в реальных условиях процесс пыления с поверхности пляжа в разные годы и летние месяцы происходит с различных разнесенных по пространству участков пляжа, на которых при определенных метеорологических параметрах и технологических операциях возникают благоприятные для процесса пыления условия.

Анализ графиков, аналогичных представленным на рис. 3.39, *a–d*, для всех значений скорости ветра (5, 11, 17 и 23 м/с) в терминах легенды (см. табл. 3.16, столбец 1) позволяет сгруппировать варианты сочетаний в определенную систему. В табл. 3.17 для каждой площади пыления сопоставлены варианты, обеспечивающие максимальное и минимальное загрязнения в целом для города, наиболее опасные для района Старые Апатиты, и вариант, который ближе всего к осредненному по числу вариантов испытаний.



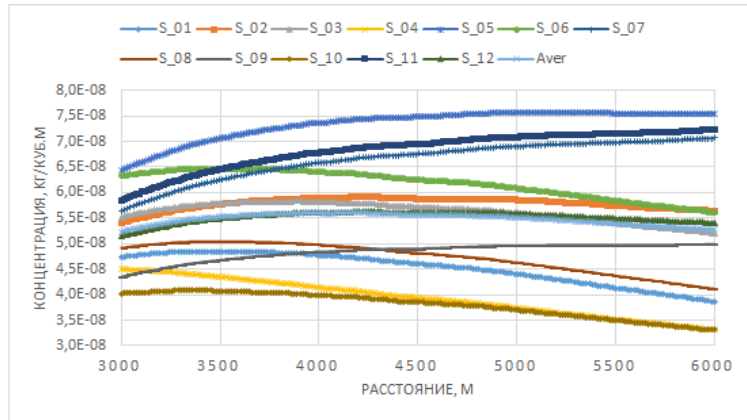


*a*

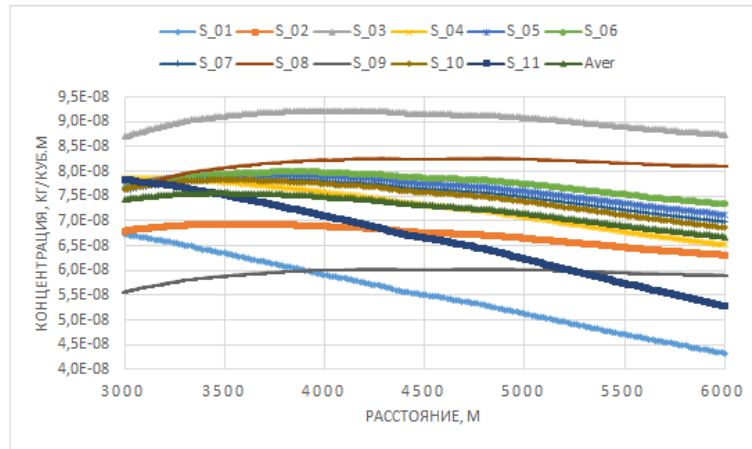


*b*

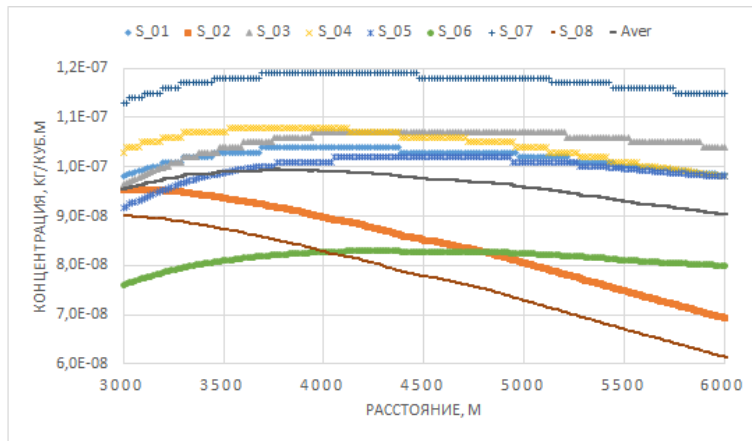
**Рис. 3.39.** Пространственное распределение суммарной детальной и осредненной (по числу вариантов сочетаний) концентрации пыли на высоте +2 м от поверхности города Апатиты в поперечном к направлению ветрового потока измерении при скорости ветра 11 м/с и вариации площади пыления (га):  
*a* – 2; *b* – 4 (начало)



в



г



д

**Рис. 3.39.** Пространственное распределение суммарной детальной и осредненной (по числу вариантов сочетаний) концентрации пыли на высоте +2 м от поверхности города Апатиты в поперечном к направлению ветрового потока измерении при скорости ветра 11 м/с и вариации площади пыления (га):  
в — 6; г — 8; д — 10 (окончание)

Таблица 3.16

Расшифровка легенды рис. 3.39, а–д рассмотренных вариантов сочетаний участков пыления, номера участков пыления

Легенда	Площадь пыления, га				
	2	4	6	8	10
S_01	3	6, 14	1, 8, 6	4, 12, 3, 14	2, 17, 19, 11, 7
S_02	17	5, 1	3, 19, 8	19, 13, 3, 1	10, 2, 12, 11, 6
S_03	13	20, 19	16, 9, 6	14, 7, 17, 16	5, 16, 7, 6, 18
S_04	20	8, 20	11, 3, 1	2, 12, 11, 17	20, 17, 7, 14, 9
S_05	16	4, 14	7, 18, 16	18, 6, 5, 12	8, 1, 20, 19, 7
S_06	11	19, 18	19 8 14	17, 13, 10, 5	4, 3, 5, 10, 20
S_07	7	14, 9	2, 19, 18	13, 7, 5, 20	18, 16, 15, 17, 11
S_08	1	2, 13	10, 3, 9	1, 11, 18, 20	14, 10, 9, 13, 3
S_09	9	17, 14	5, 17, 4	3, 2, 20, 4	–
S_10	–	12, 8	4, 3, 8	3, 12, 18, 8	–
S_11	–	–	20, 18, 3	11, 6, 13, 3	–
S_12	–	–	8, 2, 16	–	–
Aver	Осредненное по числу вариантов сочетаний участков пыления				

Таблица 3.17

Варианты сочетаний максимального и минимального загрязнения в целом для города, наиболее опасные для района Старые Апатиты и вариант, близкий к осредненному по числу испытаний

Площадь пыления, га	Максимальное загрязнение	Минимальное загрязнение	Для района Старые Апатиты	Близкий к осредненному
2	S_02, S_04, S_05	S_01, S_08	S_03, S_06, S_02, S_04, S_05	S_09
4	S_03, S_06	S_02, S_05, S_08	S_01, S_09, S_03, S_06	S_01
6	S_05, S_07, S_11	S_04, S_10	S_05, S_06	S_12
8	S_03, S_08	S_01, S_09	S_04, S_05, S_06, S_07	S_04
10	S_07	S_06, S_08	S_04, S_07	S_05

Максимальное загрязнение прогнозируется, если в варианте доминирующими являются участки из области IV. Минимальное загрязнение прогнозируется, если в варианте присутствуют и доминируют участки из области I. Наиболее опасными для района Старые Апатиты являются ситуации, когда в варианте преобладают участки из области III. Таким образом, если нет доминирующего преобладания какой-либо области, то прогнозируется нечто среднее без явных экстремумов. В целом полученные результаты подтверждают основные выводы работы [190] касательно укрупненных областей.

Минимальные и максимальные значения суммарной детальной концентрации пыли на высоте +2 м от поверхности города Апатиты в поперечном к направлению ветрового потока измерении (значение продольной координаты 13 500 м) при вариации площади пыления и скорости ветра приведены в табл. 3.18. Для представленных значений концентрации отсутствует линейная

зависимость загрязнения от площади пыления, что с высокой достоверностью прослеживается для осредненных по числу вариантов сочетаний значений концентрации в центре модели города Апатиты. При этом степенная зависимость концентрации от скорости ветра сохраняется (со своими коэффициентами).

Таблица 3.18

Интервалы суммарной детальной концентрации пыли на высоте +2 м от поверхности города Апатиты в поперечном к направлению ветрового потока измерении при вариации площади пыления и скорости ветра, кг/м<sup>3</sup>

Скорость ветра, м/с	Площадь пыления, га				
	2	4	6	8	10
5	1,17·10 <sup>-9</sup> ÷ 2,92·10 <sup>-9</sup>	1,81·10 <sup>-9</sup> ÷ 5,82·10 <sup>-9</sup>	3,18·10 <sup>-9</sup> ÷ 7,26·10 <sup>-9</sup>	4,17·10 <sup>-9</sup> ÷ 8,77·10 <sup>-9</sup>	6,27·10 <sup>-9</sup> ÷ 11,30·10 <sup>-9</sup>
11	0,86·10 <sup>-8</sup> ÷ 3,03·10 <sup>-8</sup>	1,89·10 <sup>-8</sup> ÷ 6,05·10 <sup>-8</sup>	3,31·10 <sup>-8</sup> ÷ 7,57·10 <sup>-8</sup>	4,33·10 <sup>-8</sup> ÷ 9,23·10 <sup>-8</sup>	6,16·10 <sup>-8</sup> ÷ 10,80·10 <sup>-8</sup>
17	0,30·10 <sup>-7</sup> ÷ 1,11·10 <sup>-7</sup>	0,68·10 <sup>-7</sup> ÷ 2,19·10 <sup>-7</sup>	1,02·10 <sup>-7</sup> ÷ 2,76·10 <sup>-7</sup>	1,56·10 <sup>-7</sup> ÷ 3,36·10 <sup>-7</sup>	2,23·10 <sup>-7</sup> ÷ 4,32·10 <sup>-7</sup>
23	0,75·10 <sup>-7</sup> ÷ 2,71·10 <sup>-7</sup>	1,69·10 <sup>-7</sup> ÷ 5,42·10 <sup>-7</sup>	2,93·10 <sup>-7</sup> ÷ 6,82·10 <sup>-7</sup>	3,86·10 <sup>-7</sup> ÷ 8,31·10 <sup>-7</sup>	5,84·10 <sup>-7</sup> ÷ 10,70·10 <sup>-7</sup>

С учетом установленной документами [187; 188] величины максимальной разовой концентрации пыли 0,3 мг/м<sup>3</sup> (3·10<sup>-7</sup> кг/м<sup>3</sup>) можно сделать выводы о том, что при скорости ветра:

5 и 11 м/с — превышений уровня ПДК не прогнозируется;

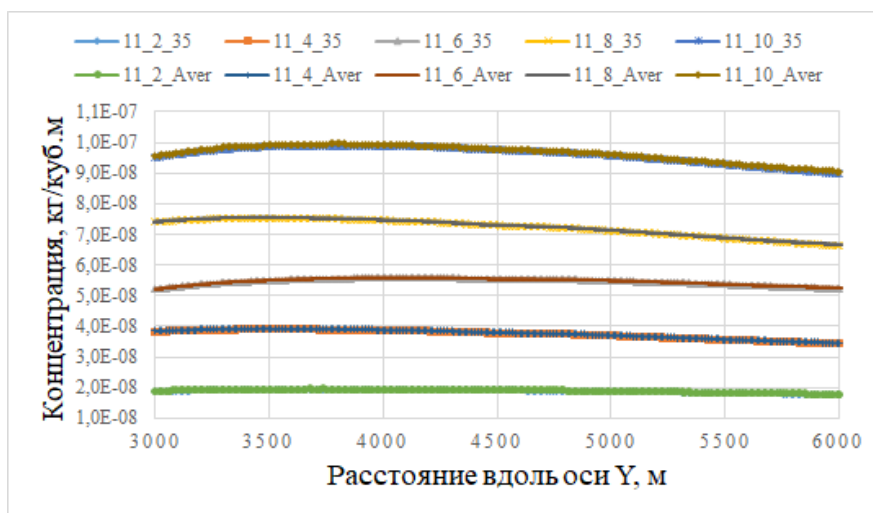
17 м/с — при площади пыления более 8 га прогнозируются превышения ПДК;

23 м/с — лишь минимальная площадь пыления 2 га не вызывает озабоченности, но при больших площадях пыления для всего города прогноз негативный;

неконтролируемое увеличение площади пыления даже при скорости ветра 5 и 11 м/с приведет к превышению ПДК загрязнения воздуха.

Интересно сравнить результаты численных экспериментов, выполненных в настоящем исследовании при поинтервальном подходе к размеру пыли и в ранее проведенном изыскании для срединного диаметра (35 мкм) [192]. В качестве примера на рис. 3.40 приведены графики пространственных распределений суммарной осредненной (по числу вариантов сочетаний) концентрации пыли на высоте +2 м от поверхности города Апатиты в поперечном к направлению ветрового потока измерении при скорости ветра 11 м/с и вариации площади пыления при двух подходах: срединного диаметра (обозначения вида 11\_2\_35 и т. д.) и поинтервального учета размера пыли (обозначения вида 11\_2\_Aver и т. д.). Графики, отвечающие конкретному значению площади пыления, практически сливаются. Сравнение числовых значений рассматриваемых пространственных распределений показало, что максимальное отклонение в значениях при этих двух подходах составляет ~ 1 %. Такой результат позволяет (см. работу [192]) подтвердить вывод о возможности использовать подход срединного диаметра

частиц пыли при оценке загрязнения атмосферы. С помощью данного подхода можно существенно сократить трудозатраты при выполнении численных экспериментов и обработке результатов практически без снижения точности вычислений. Однако при этом теряется важная информация по мелкой пыли.



**Рис. 3.40.** Пространственные распределения суммарной осредненной концентрации пыли на высоте +2 м от поверхности города Апатиты в поперечном к направлению ветрового потока измерении при скорости ветра 11 м/с и вариации площади пыления при подходах среднего диаметра пыли и поинтервального учета размера частиц

По аналогии с подходом в работах [192; 199] выполнен анализ зависимостей суммарной, осредненной по числу вариантов сочетаний концентрации пыли в центре модели города Апатиты от скорости ветрового потока при фиксированных значениях площади пыления. Анализ показал, что с коэффициентом достоверности, близким к единице, обсуждаемая функция описывается также степенной зависимостью. Вид же обобщенной функции двух переменных (скорости ветра  $V$  и площади пыления  $S$ ), с помощью которой можно ориентировочно прогнозировать уровень осредненной по числу вариантов сочетаний концентрации пыли в атмосфере в центре города Апатиты, выглядит следующим образом:

$$C_m = 10^{-12} \cdot (7,3973 \cdot S - 0,5245) \cdot V^{2,9874}.$$

Приведенная аналитическая зависимость суммарной осредненной по числу вариантов сочетаний концентрации пыли в центре города Апатиты от скорости ветрового потока и площади пыления позволяет оценить критическую площадь, при которой в рассмотренном диапазоне значений скорости ветра достигается уровень ПДК, равной  $S_{crit} \sim 40555 \cdot V^{-2,9874}$ .

Таким образом, при скорости ветра 5 м/с критическая площадь  $S_{crit}$  составит 331 га, при 11 м/с — 31 га, 17 м/с — 8,6 га, 23 м/с — 2,9 га. Полученные значения подтверждают сделанные выше выводы.

Полученные результаты не противоречат результатам ранее выполненных исследований.

В процессе работы намечены пути совершенствования методического подхода по прогнозированию загрязнения атмосферы при эпизодических процессах пыления на техногенных объектах горнопромышленного комплекса.

В частности, предстоит выполнить серьезную модернизацию CFD-модели, учитывающую эффекты плавучести и фоновой стратификации [200; 201], что позволит исследовать процессы переноса пылевых загрязнений при различных состояниях (неустойчивых, нейтральных, инверсионных) приземного слоя атмосферы на базе неспециализированного программного продукта. Дополнительно авторами в рамках проекта “Enviro-PEEX(Plus) on ECMWF: Research and development for integrated meteorology — atmospheric composition multi-scales and — processes modelling for the Pan-Eurasian EXperiment (PEEX) domain for weather, air quality and climate applications” (2021–2023 гг., руководитель А. Г. Махура) предпринимаются попытки освоить современный подход к бесшовному моделированию окружающей среды с использованием ENVIRO-HIRLAM для экологических исследований [202; 203] в приложении к эпизодическим явлениям пыления на объектах горнодобывающей промышленности.

*Мелкая пыль 0–10 и 10–20 мкм.* Целью представляемого исследования является вычленение и анализ приведенных в работе [204] расчетных данных загрязнения атмосферы города Апатиты только мелкой пылью двух интервалов (0–10 и 10–20 мкм), которая представляет наибольшую опасность вследствие проникновения в дыхательные пути и легкие человека. Результаты могут быть использованы при планировании природоохранных мероприятий по закреплению хвостов и снижению пыления.

Обобщенные и более подробные результаты исследования загрязнения атмосферы пылью размером от 0 до 70 мкм представлены выше и в работе [204]. Для анализа расчетных значений концентрации пыли 2-го интервала можно использовать установленную величину ПДК [187; 188]. Для пыли 1-го интервала расчетные значения предлагается сравнивать с нормативами ВОЗ по  $PM_{10}$  (среднесуточное) —  $4,5 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>3</sup> [11].

На рисунке 3.41 представлены пространственные распределения (осредненной по числу вариантов сочетаний) концентрации пыли 1-го и 2-го интервалов в поперечном к направлению ветрового потока измерении при вариации площади пылящей поверхности и скорости ветрового потока на высоте +2 м от поверхности. Напомним, что при значении скорости ветра 5 м/с пыль 1-го интервала не переходит во взвешенное состояние (велики силы сцепления между мелкими частицами).

Хорошо видно, что для  $PM_{10}$  лишь при штормовых ветрах уровни загрязнения при площадях пыления выше 6 га выходят на значения порядка  $10^{-8}$  кг/м<sup>3</sup>, оставаясь при этом ниже уровня рекомендуемого ВОЗ. Для пыли 2-го интервала крупности расчетные значения существенно ниже ПДК. Вместе с тем, отметим, что неконтролируемое увеличение площади пыления потенциально может привести к превышению принятых в исследовании нормативов.

Выполнен анализ зависимостей осредненной (по числу вариантов сочетаний) максимальной концентрации пыли 1-го и 2-го интервалов в центре модели города Апатиты от скорости ветрового потока при фиксированных значениях площади пыления. Анализ показал, что с коэффициентом достоверности, близким к единице, обсуждаемая функция описывается степенной

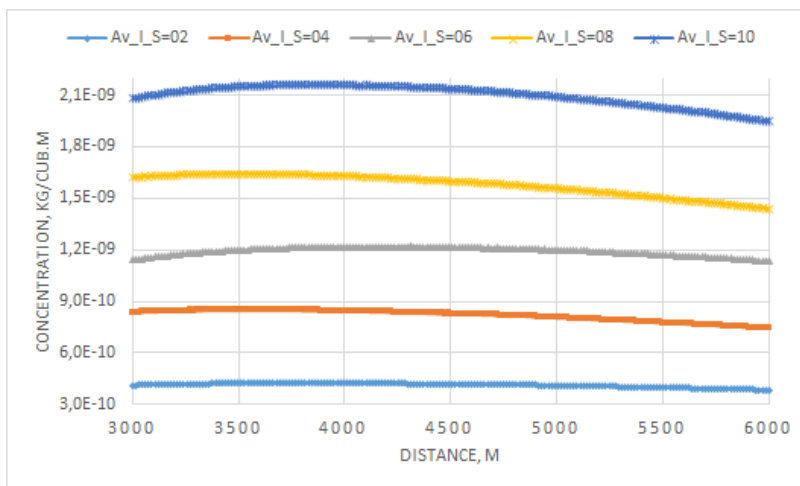
зависимостью. Вид же обобщенных функций двух переменных (скорость ветра  $V$  и площадь пыления  $S$ ), с помощью которой можно ориентировочно прогнозировать уровень осредненной по числу вариантов сочетаний концентрации пыли 1-го и 2-го интервалов в атмосфере в центре города Апатиты, выглядит следующим образом:

1-й интервал

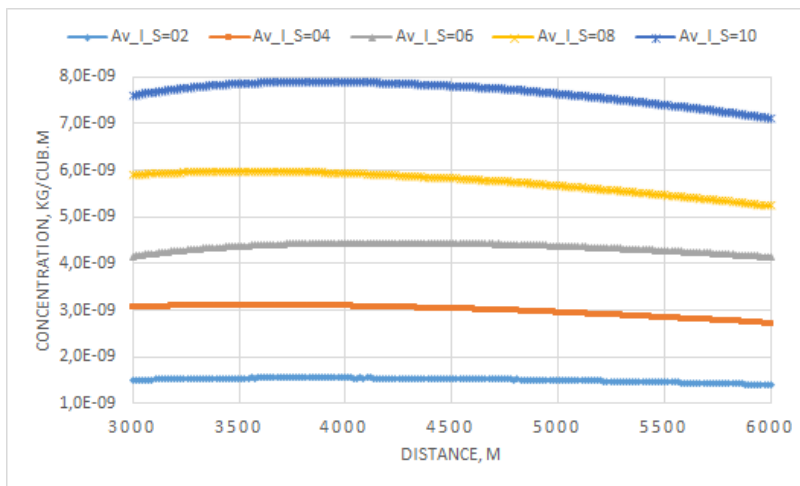
$$C_m = 10^{-13} \cdot (1,5966 \cdot S - 0,2088) \cdot V^{2,9966}$$

и 2-й интервал

$$C_m = 10^{-13} \cdot (5,9872 \cdot S - 0,4493) \cdot V^{2,9947}.$$

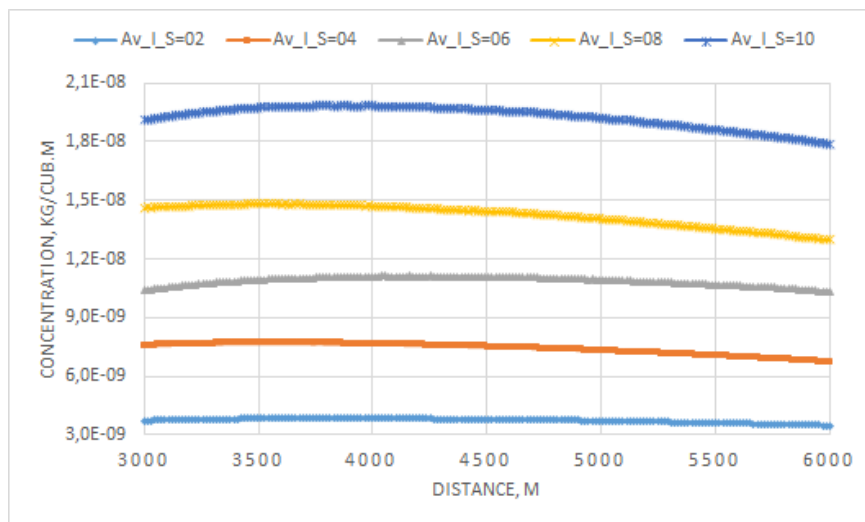


1-й интервал, скорость ветра 11 м/с

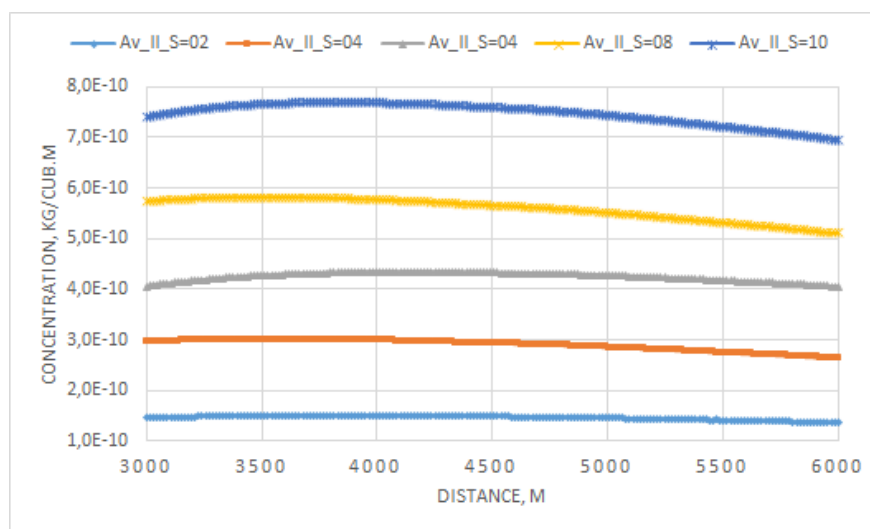


1-й интервал, скорость ветра 17 м/с

**Рис. 3.41.** Пространственное распределение осредненной по числу вариантов сочетаний концентрации пыли 1-го и 2-го интервалов в поперечном к направлению ветрового потока измерении при вариации площади пылящей поверхности и скорости ветрового потока (начало)



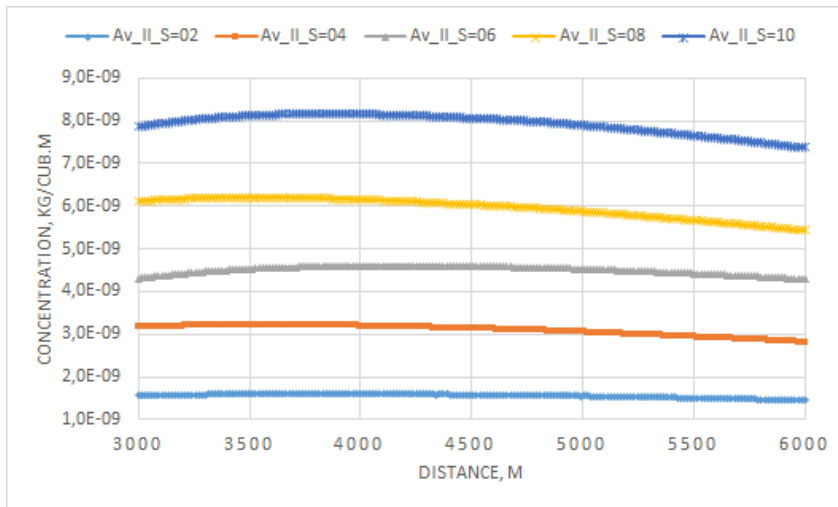
1-й интервал, скорость ветра 23 м/с



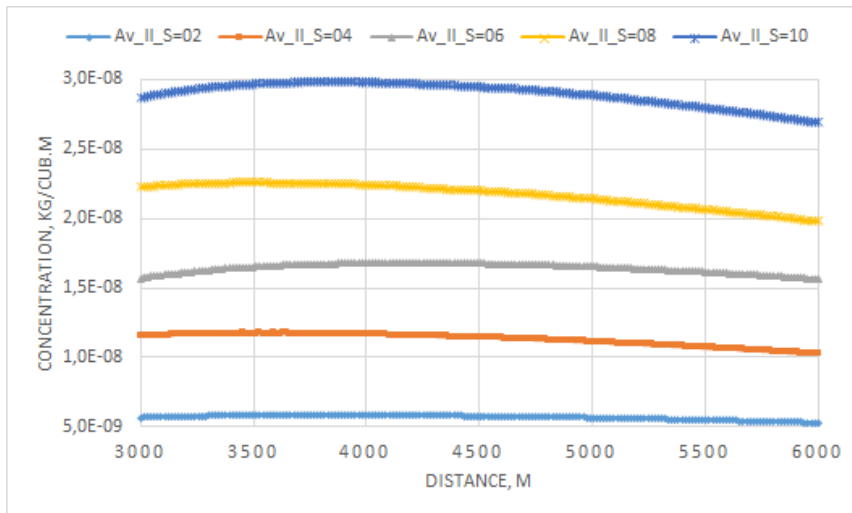
2-й интервал, скорость ветра 5 м/с

**Рис. 3.41.** Пространственное распределение осредненной по числу вариантов сочетаний концентрации пыли 1-го и 2-го интервалов в поперечном к направлению ветрового потока измерении при вариации площади пылящей поверхности и скорости ветрового потока (продолжение)



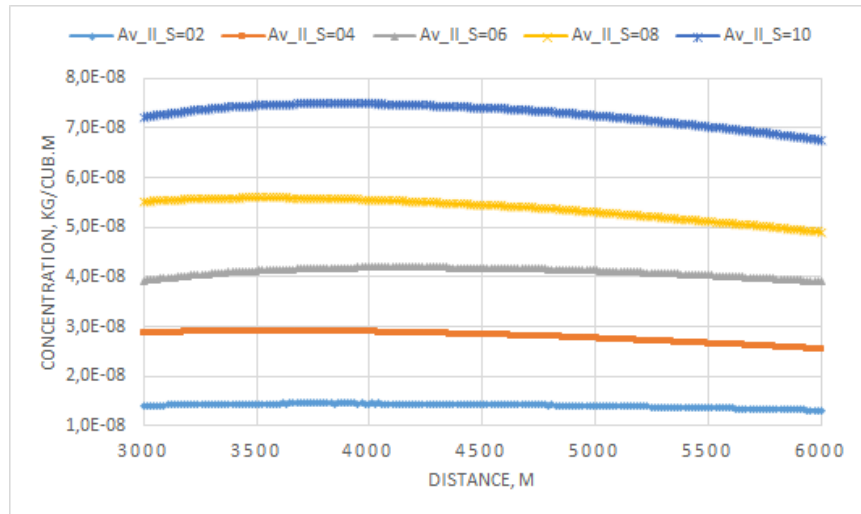


2-й интервал, скорость ветра 11 м/с



2-й интервал, скорость ветра 17 м/с

**Рис. 3.41.** Пространственное распределение осредненной по числу вариантов сочетаний концентрации пыли 1-го и 2-го интервалов в поперечном к направлению ветрового потока измерения при вариации площади пылящей поверхности и скорости ветрового потока (продолжение)



2-й интервал, скорость ветра 23 м/с

**Рис. 3.41.** Пространственное распределение осредненной по числу вариантов сочетаний концентрации пыли 1-го и 2-го интервалов в поперечном к направлению ветрового потока измерении при вариации площади пылящей поверхности и скорости ветрового потока (окончание)

Полученные аналитические зависимости поинтервальной (1-й и 2-й) осредненной по числу вариантов сочетаний концентрации пыли в центре города Апатиты от скорости ветрового потока и площади пыления позволяют оценить критическую площадь, при которой в рассмотренном диапазоне значений скорости ветра достигается уровень предельных нормативов. В частности, указанные выше оценочные выражения имеют следующий вид: для 1-го интервала ( $PM_{10}$ )  $S_{crit} \sim 313166 \cdot V^{-2,9966}$  и для 2-го интервала  $S_{crit} \sim 501069 \cdot V^{-2,9947}$ .

Легко проверить, что для скорости ветра 5 м/с получаются нереальные площади пыления. А вот для других значений скорости ветра критическая площадь  $S_{crit}$  составит следующие величины (га): 237 и 381 для 11 м/с; 64 и 103 для 17 м/с; 26 и 42 для 23 м/с соответственно.

### 3.3. Оценка эффективности мероприятий по снижению интенсивности пыления на хвостохранилище

Подготовленные компьютерные модели (см. подраздел 3.2.1) позволяют сравнительно быстро оценить эффективность мероприятий, проводимых природоохранной службой КФ АО «Апатит» по снижению интенсивности пыления пляжей хвостохранилища. С этой целью для высоты пляжа хвостохранилища 180 м промоделировано 6 ситуаций, различающихся интенсивностью пыления:

1-я ситуация характеризуется максимальной интенсивностью пыления ( $80 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ), т. е. полным отсутствием каких-либо мероприятий (на рис. 3.42, *a-v* обозначена в легенде 0Pr). Для нее использованы результаты ранее выполненных численных экспериментов;

2-я ситуация характеризуется интенсивностью пыления 40 г/(м<sup>2</sup>·с), т. е. интенсивность пыления снижается за счет мероприятий на 50 % (на рис. 2.42, *a–в* обозначена в легенде 50Pr);

3-я ситуация характеризуется интенсивностью пыления 32 г/(м<sup>2</sup>·с), т. е. интенсивность пыления снижается за счет мероприятий на 60 % (на рис. 2.42, *a–в* обозначена в легенде 60Pr);

4-я ситуация характеризуется интенсивностью пыления 24 г/(м<sup>2</sup>·с), т. е. интенсивность пыления снижается за счет мероприятий на 70 % (на рис. 2.42, *a–в* обозначена в легенде 70Pr);

5-я ситуация характеризуется интенсивностью пыления 16 г/(м<sup>2</sup>·с), т. е. интенсивность пыления снижается за счет мероприятий на 80 % (на рис. 2.42, *a–в* обозначена в легенде 80Pr);

и, наконец, 6-я ситуация характеризуется интенсивностью пыления 8 г/(м<sup>2</sup>·с), т. е. интенсивность пыления снижается за счет мероприятий на 90 % (на рис. 2.42, *a–в* обозначена в легенде 90Pr).

Представленная на рис. 3.42, *a–в* графическая информация по распределению в продольном направлении поинтервальной (I, II и III, см. подраздел 3.2.1) концентрации пыли в районе города Апатиты убедительно свидетельствует, что «работает» простое линейное соотношение. Прогнозируется поэтапное пропорциональное снижение уровня поинтервальной концентрации пыли с увеличением эффективности защитных мероприятий.

В принципе, полученный результат качественно предсказуем в силу линейности модели конвективно-диффузионного переноса. Вместе с тем, представленная информация позволяет иметь количественные показатели загрязнения, а вкупе с ранее представленными расчетными данными для высоты пляжа хвостохранилища 200 м несложно (при необходимости) получить количественные показатели уровня загрязнения атмосферы для максимальной проектной высоты объекта в зависимости от эффективности защитных мероприятий.

Наиболее простой интерпретацией приведенных результатов является учет влажности материала поверхностного слоя хвостов обогащения, т. е. своевременная обработка поверхности пылящей поверхности. Как известно, в реальных условиях увлажненность материала приведет к снижению интенсивности пыления. Для оперативных оценок влияния влажности материала можно пойти по следующему пути.

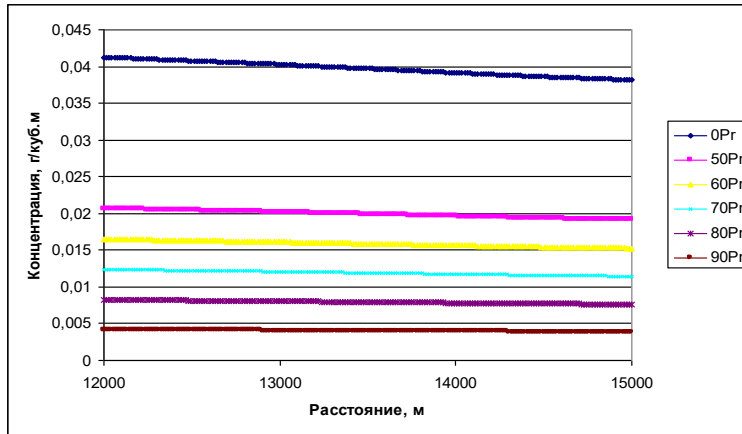
Авторы работы [34] со ссылкой на статью [205] при выполнении расчетов выпадения нефелиновой пыли на базе метода статистических испытаний (метод Монте-Карло) в качестве сомножителя, учитывающего влияние влажности, используют степенную функцию вида:

$$f(w) = w^a, \text{ где } w \text{ — влажность материала (\%), } a = -0,7267.$$

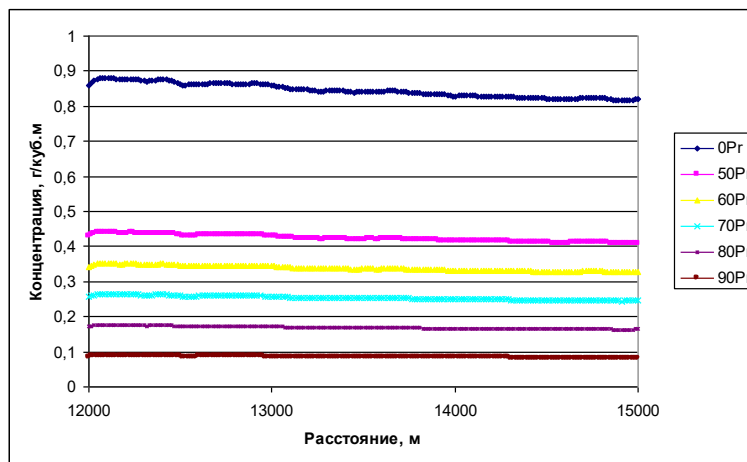
В диссертационной работе А. В. Иванова [4], посвященной вопросам снижения аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха от производственных объектов ОАО «Ковдорский ГОК», в качестве такого сомножителя приводится экспоненциальная функция вида:

$$f(w) = \exp(-0,2w).$$

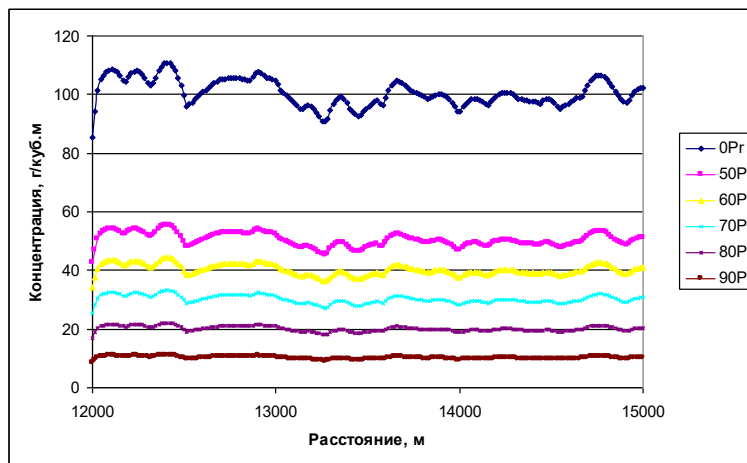
Воспользовавшись приведенной формулой, несложно количественно оценить степень влияния влажности материала (выражена в %) на интенсивность пыления (см. табл. 3.19).



*a*



*б*



*в*

**Рис. 3.42.** Пространственные уровни поинтервальной концентрации пыли в продольном сечении модели на высоте +2 м относительно поверхности города Апатиты: *a* — I интервал (5–10 мкм); *б* — III интервал (30–60 мкм); *в* — V интервал (100–200 мкм)

Таблица 3.19

Коэффициент снижения вертикального потока массы в зависимости от влажности материала с помощью соотношения работы [59]

Влажность материала, %	0	5	10	15	20
Коэффициент снижения ВПМ, -	1	3	8	20	60

Очевидно, что влажность материала является существенным фактором воздействия на уровень ВПМ: увеличение влажности материала с 0 до 5 % сокращает величину ВПМ в 3 раза, а с 5 до 20 % приводит к снижению интенсивности пыления в 20 раз. А это весьма эффективно!

Некоторые результаты исследований на базе созданных трехмерных CFD-моделей опубликованы в работах [148; 206; 207].

### Выводы по главе 3

Признавая проблему пыления на хвостохранилищах достаточно серьезной для горнопромышленных районов, авторы монографии выполнили цикл исследований, посвященных прогнозу рассеяния мультидисперсной пыли при вариации высоты пляжной зоны хвостохранилища АНОФ-2 для района города Апатиты.

Показано, что на основе интегрированных математических моделей динамики атмосферы и переноса мультидисперсной примеси можно исследовать вопросы влияния высоты и геометрической формы хвостохранилищ на изменение воздушных потоков над пылящими поверхностями и делать прогнозные оценки возможных концентраций пыли в воздушном бассейне района для неблагоприятных метеорологических условий при развитии хвостохранилищ.

Для этого, опираясь на собственный предшествующий опыт по данной проблеме и использование CFD программного комплекса COMSOL, были созданы математические модели интегрированной динамики пограничного слоя атмосферы и переноса мультидисперсной примеси от пылящих поверхностей различной геометрии в двух- и трехмерной постановках. Построенные модели позволили получить аэродинамические характеристики моделируемой области (поля скорости, пространственные распределения коэффициентов турбулентной вязкости) и осуществить расчеты адвективно-диффузионного переноса мультидисперсных загрязнений с учетом скорости оседания пыли по крупности.

Анализ результатов численных экспериментов позволил авторам сформулировать ряд выводов, на которые следует обратить внимание.

Выполнен детальный анализ экспериментальных данных, полученных на различных объектах пыления, что позволило графически и аналитически формализовать выбор чрезвычайно важной при моделировании функции интенсивности пыления, а также предложить процедуру ее описания в зависимости от высоты пылящей поверхности.

На основе анализа результатов численных экспериментов построены графики скорости ветра и коэффициента ветра на высоте пляжа хвостохранилища в зависимости от высоты пляжа и угла откоса. Показано, что в соответствии со степенным законом изменения интенсивности пыления от скорости при увеличении высоты пляжа пыления резко увеличивается срыв частиц с его поверхности.

Методом численного моделирования в двухмерной постановке исследовано влияние высоты пляжа хвостохранилища на уровень концентрации пыли по направлению ветрового потока. Рассмотрено два условия по интенсивности пыления: постоянное значение мощности источника и учет линейной зависимости мощности источника загрязнения от высоты и, соответственно, скорости ветра. Проанализированы пространственные распределения мелкодисперсной примеси при вариации высоты пляжа хвостохранилища от 20 до 40 м (с шагом 10 м).

Для условия линейной зависимости интенсивности пыления отмечено, что с ростом высоты пляжа хвостохранилища уровень концентрации загрязнения вниз по потоку (более 100 м от источника) на высоте человеческого роста возрастает. Причем этот рост на разных расстояниях неравномерен и в относительных единицах меняется от 50 до 150 % по отношению к «эталонному» загрязнению от хвостохранилища высотой 20 м.

В двухмерной постановке методом численного моделирования выполнено исследование влияния высоты ограждения, обустройстваемого с подветренной стороны пылящей поверхности, на уровень загрязнения атмосферы вниз по ветровому потоку мультidisперсной пыли. Отмечено существенное изменение структуры поля скорости вблизи ограждения, высота которого варьируется с шагом 0,5 м от 0 до 2 м. Особенно отчетливо указанный факт наблюдается по конфигурации линий тока в области непосредственно за ограждением.

Анализ распределения концентрации на высоте 2 м вниз по потоку свидетельствует, что предложение о создании ограждения справедливо и желаемый результат, а именно снижение уровня загрязнения, достигается. При этом наибольший эффект прогнозируется при высоте ограждения 1,5 м. Вместе с тем, если речь идет о предотвращении загрязнения атмосферы на расстояниях порядка 1000 м и более (наиболее реальная ситуация), то с учетом экономических соображений можно рекомендовать создание более дешевого ограждения высотой 0,5 м.

В объемной постановке методом численного моделирования доказано, что увеличение высоты пляжа хвостохранилища АНОФ-2 с 180 до 200 м приводит к следующим последствиям: 1) росту концентрации для пыли крупностью до 60 мкм на 10–15 %; 2) практически к тому же уровню концентрации пыли крупностью от 60 до 100 мкм; 3) снижению уровня концентрации пыли крупностью от 100 до 200 мкм более чем на 15 %.

Выполнен анализ существующих подходов по оценке горизонтального и вертикального потоков массы пыли с пылящих поверхностей (пустыни, хвостохранилища и др.), которые необходимы для прогнозирования загрязнения приземного слоя атмосферы на базе численного моделирования.

Определен круг подходов по оценке интенсивности пыления (зависимость Семенова О. Е., зависимости Westphal D. L. et al. и Kok et al., схемы DEAD и GOCART), наиболее приемлемых для решения практической задачи о влиянии скорости ветрового потока на загрязнение атмосферы для района города Апатиты от воздействия близлежащего хвостохранилища АНОФ-2.

Предложен переход к определению динамической скорости  $u_*$  и скорости на высоте +10 м над высотой пылящей поверхности  $u_{10}$ . Обе величины необходимы для выполнения прогнозных расчетов горизонтального и вертикального потоков массы.

Показано, что наиболее приемлемыми для исследований загрязнения приземного слоя атмосферы вниз по ветровому потоку при вариации его скорости в широком диапазоне могут быть названы зависимость Westphal D. L. et al. и схема DEAD. Оба подхода базируются на функциональной зависимости потока массы пыли от динамической скорости на высоте пыления в 4-й и 3-й степенях соответственно.

Обоснованы количественные показатели по долям («вес» интервала, скорость оседания) каждого моделируемого класса размера частиц пыли крупностью до 70 мкм.

В подходе сплошности источника пыления исследовано влияние скорости ветрового потока в интервале 5–23 м/с на загрязнение приземного слоя атмосферы при максимальной проектной высоте пляжа хвостохранилища АНОФ-2. Результаты анализа численных экспериментов по оценке загрязнения атмосферы города Апатиты с учетом реальной площади пыления (на уровне 10 га) свидетельствуют:

при скорости ветра до 8 м/с не прогнозируются ситуации превышения ПДК по пыли в городе Апатиты;

дальнейший рост скорости ветра при сохранении реальной площади пыления, безусловно, будет приводить к существенному превышению уровня ПДК;

соблюдение условия санитарно-гигиенических норм при штормовых ветрах (20–23 м/с) возможно обеспечить за счет сокращения текущей площади пыления по крайней мере на порядок.

В подходе дискретности источников пыления, что представляется более реалистичной ситуацией, рассмотрены несколько моделей. В первой ситуации области пыления задавались крупными площадями (10 га), а во второй принято во внимание изменение пространственно разнесенной площади пыления от 2 до 10 га. Рассмотрены ситуации детерминированного и случайного выбора участков пыления. В дополнение к поинтервальному анализу пыли с шагом 10 мкм рассмотрена ситуация срединного диаметра (35 мкм).

Для прогнозной оценки вертикального потока массы использована зависимость Westphal D. L. et al. Динамическая скорость вычисляется через осредненную скорость ветрового потока на высоте +10 м над конкретным участком пыления.

Анализ прогнозных значений уровней концентрации пыли в рассмотренном диапазоне параметров модели (скорости ветра и площади пыления) свидетельствует:

наибольшему загрязнению подвержена атмосфера района Старых Апатитов, что находит свое подтверждение по данным наблюдений;

расчетные зависимости концентрации пыли при фиксированной скорости ветра с высоким коэффициентом достоверности описываются линейными функциями;

зависимость концентрации пыли от скорости ветрового потока при фиксированных значениях площади пыления аппроксимируется степенной функцией;

неконтролируемое увеличение площади пыления при скорости ветра 5 и 11 м/с приведет к превышению ПДК загрязнения воздуха.

Получены обобщенные аналитические выражения, позволяющие прогнозировать концентрации пыли как функции двух параметров (площадь пыления и скорость ветра), которые в значительной степени определяют уровень пылевого загрязнения атмосферы. Выполнен прогноз критических площадей пыления, при которых уровень загрязнения атмосферы достигает ПДК при вариации скорости ветрового потока.

Вычленены результаты прогнозных оценок по уровням загрязнения атмосферы мелкой пылью (0–10 (PM<sub>10</sub>) и 10–20 мкм). Показано, что:

лишь при штормовых ветрах уровни загрязнения пылью PM<sub>10</sub> при площадях пыления выше 6 га выходят на значения порядка 10<sup>-8</sup> кг/м<sup>3</sup>, оставаясь при этом ниже уровня, рекомендуемого ВОЗ;

для пыли крупности 10–20 мкм расчетные значения существенно ниже ПДК; неконтролируемое увеличение площади пыления потенциально может привести к превышению принятых в исследовании нормативов.

В ходе исследования намечены пути совершенствования методического подхода по прогнозированию загрязнения атмосферы при эпизодических процессах пыления на техногенных объектах горнопромышленного комплекса.

Выполнена оценка эффективности мероприятий, проводимых природоохранной службой КФ АО «Апатит», по снижению интенсивности пыления пляжей хвостохранилища. Анализ результатов расчетов по распределению в продольном направлении поинтервальной концентрации пыли в районе города Апатиты подтверждает приемлемость линейного приближения, т. е. прогнозируется пропорциональное снижение уровня поинтервальной концентрации пыли с увеличением эффективности защитных мероприятий.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достаточно очевидно, что эффективное решение чрезвычайно актуальных проблем в сфере обеспечения здоровья населения территорий, на которых расположены объекты горно-обогатительного производства, в условиях АЗ РФ невозможно без серьезного повышения результативности научно-практических исследований источников пыления, потенциальных путей распространения микрочастиц, оценки их негативного воздействия как на человека, так и на экосистемы природной среды, а также без разработки мер по предотвращению процессов пыления.

В арктических широтах проблематика вредного воздействия загрязненного атмосферного воздуха на здоровье выступает значимым дополнительным усугубляющим фактором по отношению к «базовым» неблагоприятным природно-климатическим условиям, формирующим среду обитания человека. Предотвращение явлений экологического кризиса и экологического неблагополучия на некоторых территориях, отнесенных к АЗ РФ, где наблюдаются наиболее высокие показатели заболеваемости и преждевременной смертности населения, является актуальной научно-практической задачей. В рамках ее решения эколого-экономическая оценка ущерба, причиненного здоровью населения воздействием экологических факторов риска, обеспечивает возможность обоснованного выбора приоритетов в разработке и осуществлении государственной политики и корпоративных программ по снижению преждевременной смертности и сохранению здоровья населения, снижению выбросов опасных загрязняющих веществ, оказывающих наибольшее негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека.

Авторы полагают, что, несмотря на то что выполненные ими и представленные в монографии результаты не являются исчерпывающими и требуют дальнейшего осмысления, тем не менее есть основания полагать, что приведенная информация и знания составляют те «кирпичики» научного обоснования, которые станут основой решения проблемы пыления хвостов обогащения.

Экспериментальные исследования и определение физико-химических свойств хвостовых отложений проведены на хвостохранилище АНОФ-2 КФ АО «Апатит». Оно расположено в губе Белой озера Имандра на расстоянии 8,1 км от промплощадки обогатительной фабрики и в 9 км к северо-западу от города Апатиты. Территория хвостохранилища общей площадью 7,8 км<sup>2</sup> вытянута с юго-востока на северо-запад, ограничена с востока Хибинским горным массивом, а с запада — озером Имандра. Ежегодно с АНОФ-2 поступает более 6 млн м<sup>3</sup> хвостов обогащения.

Высыхание поверхности хвостохранилища в летний период обеспечивает быструю потерю влаги верхними слоями хвостов, и под воздействием ветровой эрозии возникает пыление. Это приводит к ухудшению санитарно-гигиенической обстановки в городе Апатиты. На сегодняшний день хвостохранилище АНОФ-2 является наиболее интенсивным источником пыли среди техногенных объектов предприятий Мурманской области. Следует также отметить, что вблизи хвостохранилища находится озеро Имандра — крупнейшее озеро региона.

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 сентябре, за исключением июня, зафиксировано незначительное повышение среднемесячной температуры. Средние скорости ветра и влажность за этот 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.

Представлен обзор имеющихся способов подавления эмиссии пылевых частиц при эксплуатации действующих и законсервированных хвостохранилищ. Способы подавления пыли поверхностного слоя хвостохранилищ разделяются на физико-химический, механический, биологический. Наиболее широко применяемым способом является физико-химический, который основан на формировании на пылящих поверхностях искусственных покрытий, стойких к ветровой эрозии, посредством обработки поверхностного слоя хвостовых отложений связующими реагентами. Выявлены требования к связующим реагентам — эффективность пылеподавления, долговечность, безопасность для окружающей среды. Установлено, что регулировать процесс пыления возможно с помощью природных климатических явлений, например путем контроля сезонных процессов промерзания-оттаивания поверхности хвостохранилища. Представлены технические решения, посвященные разработке способов и устройств для нанесения связующих реагентов с целью снижения пыления отвалов пород и хвостов обогащения горно-обогатительных предприятий.

Кировский филиал АО «Апатит» при участии сотрудников КНЦ РАН проводит поиск и испытание новых связующих реагентов. В рамках этих работ исследованы инженерно-геологические свойства хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд АНОФ-2 на участках нанесения связующих реагентов. Показано, что уже на стадии складирования отходов наблюдается дифференциация вещества по крупности, плотности, а следовательно, формируется неоднородность вещественного состава. По литологической классификации хвосты относятся к средне- и мелкозернистым пескам.

Выполнен мониторинг состояния закрепленной поверхности, образованной связующими реагентами Alcotac DS1, Dustbind и Floset S44, проведены лабораторные исследования физико-механических свойств и устойчивости по отношению

к агрессивным воздействиям, влияния поступления связующих реагентов в оборотную воду на технологические показатели флотации апатит-нефелиновой руды. Рекомендован оптимальный связующий реагент — Dustbind.

На базе минералогического анализа проб хвостов обогащения и пыли, отобранной в бесснежный период 2022 г. в городе Апатиты, подтвержден вклад хвостохранилищ апатит-нефелиновых обогатительных фабрик в загрязнение атмосферного воздуха. Вместе с тем, доказано наличием в пробах атмосферной пыли мелких частиц окисленного железа, пластика, стекла, металлической окалины, что помимо хвостохранилища значительную нагрузку на атмосферный воздух оказывают транспорт и другие промышленные предприятия. Экспериментально отмечена роль зеленых зон в пределах санитарно-защитных полос и в черте городской застройки.

Апробирован (в лабораторном масштабе) подход по анализу цифровых фотоснимков материалов хвостов обогащения с использованием RGB- и Lab-методик для определения количественной взаимосвязи температуры и влажности исследуемого материала. Показано, что индексы насыщения и покраснения в RGB-методике и черно-белые цвета эталонов в Lab-методике могут быть рекомендованы при обработке подобных лабораторных и натуральных экспериментов.

Представляется, что использование цифровых изображений поверхности пляжа хвостохранилищ с использованием БПЛА в перспективе может сделать процедуру принятия решений по нанесению реагентов более оперативной и эффективной.

Основными результатами работ, посвященных прогнозу рассеяния мультidisперсной пыли с поверхности пляжа хвостохранилища АНОФ-2 для района города Апатиты на базе двух- и трехмерного численного моделирования, стали выводы о возможности использования построенных компьютерных моделей с целью получения аэродинамических характеристик области моделирования (поля скорости, пространственные распределения коэффициентов турбулентной вязкости) и осуществления расчетов адвективно-диффузионного переноса мультidisперсных загрязнений с учетом скорости оседания пыли по крупности. Также доказано, что увеличение высоты пляжа хвостохранилища АНОФ-2 с 180 до 200 м приводит к росту концентрации пыли крупностью до 60 мкм на 10–15 %

Продемонстрирован положительный эффект создания ограждения, обустраиваемого с подветренной стороны пылящей поверхности, на снижение уровня загрязнения атмосферы вниз по ветровому потоку (максимальный эффект прогнозируется при высоте ограждения 1,5 м).

Определен круг формализованных подходов по оценке интенсивности пыления, наиболее приемлемых для решения практической задачи о влиянии скорости ветрового потока на загрязнение атмосферы для района города Апатиты от воздействия близлежащего хвостохранилища АНОФ-2 (зависимость Westphal D. L. et al. и схема DEAD).

Отработан методический подход по оценке уровней загрязнения атмосферы при пылении хвостохранилищ. В подходе сплошности источника пыления представлены результаты исследований влияния скорости ветрового потока

в интервале 5–23 м/с на загрязнение приземного слоя атмосферы при максимальной проектной высоте пляжа хвостохранилища АНОФ-2. Показано, что соблюдение условия санитарно-гигиенических норм при штормовых ветрах (20–23 м/с) возможно обеспечить за счет сокращения текущей площади пыления по крайней мере на порядок.

В подходе дискретности источников пыления проанализированы две ситуации. В первой области пыления задавались крупными площадями (10 га), а во второй принято во внимание изменение пространственно разнесенной площади пыления от 2 до 10 га. Рассмотрены ситуации детерминированного и случайного выбора участков пыления. В дополнение к поинтервальному анализу пыли с шагом 10 мкм рассмотрена ситуация срединного диаметра (35 мкм).

Получены обобщенные аналитические выражения, позволяющие прогнозировать концентрации пыли как функции двух параметров (площадь пыления и скорость ветра), которые в значительной степени определяют уровень пылевого загрязнения атмосферы. Выполнен прогноз критических площадей пыления, при которых уровень загрязнения атмосферы достигает ПДК при вариации скорости ветрового потока.

Отдельно проанализированы результаты прогнозных оценок по уровням загрязнения атмосферы мелкой пылью (0–10 (PM<sub>10</sub>) и 10–20 мкм).

Выполнена оценка эффективности мероприятий, проводимых природоохранной службой КФ АО «Апатит», по снижению интенсивности пыления пляжей хвостохранилища: прогнозируется пропорциональное снижение уровня концентрации пыли атмосферы вниз по ветровому потоку с увеличением эффективности защитных мероприятий.

В ходе исследования намечены пути совершенствования методического подхода по прогнозированию загрязнения атмосферы при эпизодических процессах пыления на техногенных объектах горнопромышленного комплекса. Предстоит выполнить серьезную модернизацию CFD-модели, учитывающую эффекты плавучести и фоновой стратификации, что позволит исследовать процессы переноса пылевых загрязнений при различных состояниях (неустойчивых, нейтральных, инверсионных) приземного слоя атмосферы на базе неспециализированного программного продукта.

Вместе с тем, основные результаты выполненных экспериментальных и теоретических исследований свидетельствуют о необходимости дальнейших работ, направленных на разработку и применение технологий и компьютерных моделей с целью снижения вертикального потока массы и сокращения потенциальных площадей пыления. Безусловно, необходимо признать обозначенную проблему мультидисциплинарной, требующей для ее разрешения привлечения широкого круга высококвалифицированных специалистов (технологов, химиков, физиков, IT-специалистов, метеорологов и др.).

Обобщение и критический анализ опубликованных в отечественной и зарубежной литературе научных работ, а также результатов исследований, выполненных авторами в рамках проекта РФФИ № 19-05-50065 «Микромир», позволили определить основные закономерности, методические подходы и критерии оценки социально-экономических последствий вредного действия

на организм человека приоритетных видов микрочастиц в составе атмосферных загрязнений в районах размещения крупных комплексов горно-химической и горно-металлургической промышленности в АЗ РФ.

Очевидно, что эффективное решение актуальных проблем в сфере сохранения здоровья населения Арктики невозможно без существенного повышения результативности научно-практических исследований источников, путей распространения, оценки вредных эффектов и разработки мер по предотвращению опасных последствий нарастающего воздействия на природную среду и здоровье населения загрязнений воздуха микрочастицами в индустриализованных районах АЗ РФ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lottermoser B. G. Mine Wastes. Characterization, Treatment and Environmental Impacts. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 400 p.
2. Комплексное устойчивое управление отходами. Горнодобывающая промышленность: учебное пособие / В. И. Петухов и др.; под ред. В. И. Петухова. М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2016. 638 с.
3. Янин Е. П. Промышленная пыль в городской среде (геохимические особенности и экологическая оценка). М.: ИМГРЭ, 2003. 82 с.
4. Иванов А. В. Снижение аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха от производственных объектов ОАО «Ковдорский ГОК»: дис. ... канд. тех. наук / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб., 2015. 206 с.
5. Маныкин А. Н., Булыга И. Ф. Прогрессивные методы орошения в сельском хозяйстве. М.: Россельхозиздат, 1985. 160 с.
6. Малышев Ю. Н., Айруни А. Т., Куликова Е. Ю. Физико-химические процессы при добыче полезных ископаемых и их влияние на состояние окружающей среды. М.: Академия горных наук, 2002. 270 с.
7. Пылев Л. Н., Стадникова Н. М., Клейменова Е. В. Интермиттирующее действие асбестовой пыли и плевральный канцерогенез у крыс // Медицина труда и промышленная экология. 1993. № 1. С. 15–17.
8. Твердые частицы в воздухе рабочей зоны [Электронный ресурс] <https://izmerenia.by/blog/tverdyye-chastitsy-v-vozdukhe/> (дата обращения: 23.08.2023).
9. Холодов А. С., Кириченко К. Ю., Задорнов К. С., Голохваст К. С. Влияние твердых взвешенных частиц атмосферного воздуха населенных пунктов на здоровье человека // Вестник КамчатГТУ. 2019. № 49. С. 81–88. DOI: 10.17217/2079-0333-2019-49-81-88.
10. Haidong K., London S. J., Chen G., Zhang Y., Song G., Zhao N., Jiang L., Chen B. Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China // Environment International. 2007. № 33. P. 376–384.
11. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization (WHO), 2021 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228> (дата обращения: 22.08.2023).
12. Измеров Н. Ф. Медицина труда в третьем тысячелетии // Медицина труда и промышленная экология. 1998. № 6. С. 4–9.
13. Генкин С. М. Клиника силикоза. М.: тип. [Высш. парт. школы при ЦК ВКП(б)], 1948. 100 с.
14. Движков П. П. Вопросы патогенеза силикоза. Сокращенный текст доклада на сессии, посвященной 30-летию Института гигиены труда и профессиональных заболеваний АМН СССР (23–28/XI 1953 г.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/voprosy-patogeneza-silikoza> (дата обращения: 04.06.2023).

15. Оценка влияния промышленного загрязнения атмосферного воздуха микрочастицами на здоровье населения Арктического региона (на примере Мурманской области) : монография / В. В. Дядик, Н. В. Дядик, Е. М. Ключникова, В. А. Маслобоев [и др.]. Апатиты : Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2022. 119 с.
16. Барабанов А. В., Калинина Т. А., Киселев А. А., Краснобаев А. И. Гигант в Хибинах. История открытого акционерного общества «Апатит». М.: Руда и металлы, 1999. 288 с.
17. Стриженок А. В. Управление экологической безопасностью намывных техногенных массивов ОАО «Апатит» в процессе их формирования: дис. ... канд. тех. наук / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб., 2015. 184 с.
18. Архипов А. В., Решетняк С. П. Техногенные месторождения. Разработка и формирование / под науч. ред. акад. Н. Н. Мельникова. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. 175 с.
19. Реконструкция хвостохранилища до отметки 200 м: проектная документация / ЗАО «Механобр инжиниринг»; рук. Смирнов Г. Н.; исполн.: Григорьева М. Б., Сидоренкова О. И., Яковлева Е. А. СПб., 2010. 279 с.
20. Брыляков Ю. Е., Гершенков А. Ш., Лыгач В. Н. Прошлое, настоящее и основные направления развития технологии обогащения апатит-нефелиновых руд Хибин // Горный журнал. 2014. № 9. С. 32–33.
21. Федеральная служба государственной статистики. Основные показатели охраны окружающей среды (статистический бюллетень). 2023 год. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13294> (дата обращения: 12.07.2023).
22. ГОСТ 17.2.3.02-78. Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями // Консорциум Кодекс. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200001355> (дата обращения: 12.07.2023).
23. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов // Журнал «Юрист компании» — первый практический журнал для юриста: сайт. URL: <https://www.law.ru/npd/doc/docid/902065388/modid/99> (дата обращения: 12.07.2023).
24. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. — ГГО им. А. И. Воейкова Госкомгидромета // Консорциум Кодекс. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000112> (дата обращения: 12.07.2023).
25. Рекомендации по разработке проектов санитарно-защитных зон промышленных предприятий, групп предприятий / Комитет по архитектуре и градостроительству города Москва; Научно-исследовательский и проектный институт генерального плана города Москва. М.: Издательство Российского экологического федерального информационного агентства, 1998.
26. ПБ-06-123-96. Правила безопасности при эксплуатации хвостовых, шламовых и гидроотвальных хозяйств. Белгород: ВИОГЕМ, 1997.

27. Звонарь А. Ю., Шалль Э. Э. Экологическая политика ОАО «Апатит» // Горный журнал. 2009. № 9. С. 95–99.
28. РД 52.04.306-92. Охрана природы. Атмосфера. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха // Консорциум Кодекс. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200041910> (дата обращения: 12.07.2023).
29. РД 52.04.52-85. Методические указания. Регулирование выбросов при неблагоприятных метеорологических условиях // Консорциум Кодекс. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200031405> (дата обращения: 12.07.2023).
30. Яковлев Б. А. Климат Мурманской области. Мурманск: Мурманское книжное издательство, 1961. 86 с.
31. Демин В. И. Основные климатические тенденции на Кольском полуострове за период инструментальных метеорологических измерений // Труды КНЦ РАН. Прикладная экология Севера. 2012 (9). Вып. 1. С. 97–108.
32. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: в 2 т. М.: Росгидромет, 2008. URL: <http://climate2008.igse.ru>.
33. Айриянц 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. № 3. С. 315–326.
34. 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.
35. Калугин А. И., Кониная О. Т., Гусарь И. В. Природоохранная деятельность АО «Апатит»: результаты и перспективы // Горный журнал. 2014. № 10. С. 88–92.
36. Макаров Д. В., Светлов А. В., Горячев А. А., Кониная О. Т., Маслобоев 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.
37. Михайлова Т. Л., Хохряков А. В. Рациональное землепользование в цветной металлургии // Известия ВУЗов. Горный журнал. 1993. № 6. С. 97–137.
38. Cecala A. B., O'Brien A. D., Schall J., Colinet J. F., Fox W. R., Franta R. J., Joy J., Reed W. R., Reeser P. W., Rounds J. R., Schultz M. J. Dust control handbook for industrial minerals mining and processing. Report of investigations 9689, National Institute for Occupational Safety and Health. 2012. 284 p.
39. Панов С. Н., Бутаков О. Н., Атавина Т. М. Хвостохранилища: биологическое закрепление и ускоренная рекультивация // Экология производства. 2014. № 11. С. 58–61.
40. Переверзев В. Н., Подлесная Н. И. Биологическая рекультивация промышленных отвалов на Крайнем Севере. Апатиты: КФ АН СССР, 1986. 104 с.
41. Месяц С. П., Волкова Е. Ю. Базовые положения стратегии возвращения нарушенных земель техногенных ландшафтов биосферному фонду // Экология ресурсопользования: Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельные статьи (специальный выпуск). 2014. № 12. С. 3–11.



42. Лычагин Е. В., Сеница И. В. Совершенствование методов закрепления пылящих поверхностей // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. 2007. № 8. С. 136–140.
43. Бруев В. П. Михайловский ГОК наращивает темпы производства // Горный журнал. 2004. № 1. С. 25–28.
44. Мелентьев В. А., Колпашников Н. П., Волнин Б. А. Намывные гидротехнические сооружения. М.: Энергия, 1973. 248 с.
45. Кретинин А. В., Борисов В. Г., Жушман В. Н. Способ борьбы с пылью на действующих хвостохранилищах // Цветная металлургия. 1988. № 3. С. 55–57.
46. Немировский А. В. Разработка метода формирования намывного хвостохранилища, устойчивого к ветровым потокам: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 2016. 19 с.
47. Пат. Рос. Федерация № 2029775. Обеспыливающий состав / В. Ф. Малярчук, Л. И. Тесленко, А. И. Веретенников, В. Г. Большунов, В. В. Бойко, Н. Н. Левчук. Оpubл. 27.02.1995.
48. Пат. Рос. Федерация № 2137923. Состав для закрепления пылящих поверхностей / Е. В. Кичигин, И. В. Тикунова, Л. А. Дейнека. Оpubл. 20.09.1999.
49. Пат. Рос. Федерация № 2148720. Состав для закрепления пылящих поверхностей / А. И. Перепелицын, В. И. Мочалов, В. И. Шмигирилов. Оpubл. 10.05.2000, Бюл. № 13.
50. Браунер Е. Н. Физико-химическое обоснование способов повышения эффективности закрепления пылящих поверхностей на объектах горнодобывающего комплекса Забайкалья: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Чита, 2000. 23 с.
51. Пат. Рос. Федерация № 2151301. Состав для закрепления пылящих поверхностей / В. В. Ушаков, Е. Н. Браунер. Оpubл. 20.06.2000, Бюл. № 17.
52. Patent WO2013108057 A1. Dust suppressant compositions, methods for making and methods for using / R. M. Devi, N. Madhavan, N. Adhavan, A. Bhattacharyya, N. Arumugam. Publication Date: 25.07.2013.
53. Пат. Республика Казахстан № 782. Способ предотвращения пыления промышленных гидроотвалов / Д. К. Кайпбаев, А. Г. Олейников, Б. И. Свирякин, А. Ж. Куштаев, Н. Д. Стороженко, М. А. Арустамян. Оpubл. 15.06.1994, Бюл. № 2.
54. Пат. Рос. Федерация № 2513786. Способ закрепления пылящих поверхностей / Ф. И. Лобанов, Е. М. Чукалина, Л. Н. Козлов, Е. Ю. Глоба, Ю. В. Каплунов, Ю. В. Каплунов. Оpubл. 20.04.2014, Бюл. № 11.
55. Пат. Рос. Федерация № 2303700. Способ закрепления пылящих поверхностей хранилищ отходов обогащения железных руд / С. В. Сергеев, И. В. Сеница, Е. В. Лычагин. Оpubл. 27.07.2007, Бюл. № 21.
56. Сеница И. В. Разработка и исследование параметров способа закрепления пылящих поверхностей хвостохранилищ: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Тула, 2008. 23 с.
57. Гурин А. А., Ляшенко В. И., Домничев Н. В. Снижение пыления действующих хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов // Известия ВУЗов. Горный журнал. 2012. № 5. С. 13–22.

58. Ляшенко В. И., Гурин А. А. Обоснование природоохранных технологий и средств для пылеподавления поверхностей хвостохранилищ гидрометаллургического производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 9. С. 58–72.
59. Пат. Рос. Федерация № 2407891. Способ закрепления пылящих поверхностей / Ю. В. Шувалов, М. А. Пашкевич, В. П. Ковшов, Ю. Д. Смирнов, С. В. Ковшов, М. М. Малышкин, А. С. Щербо. Оpubл. 27.12.2010, Бюл. № 36.
60. Ильченкова С. А. Снижение пылевой нагрузки на окружающую среду связыванием дисперсных материалов пылящих поверхностей на территории горных предприятий: автореф. дис. ... канд. тех. наук. СПб., 2005. 20 с.
61. Пат. Рос. Федерация № 2230997. Установка для связывания пыли / Ю. В. Шувалов, А. П. Бульбашев, С. А. Ильченкова, Н. А. Гаспарьян. Оpubл. 20.06.2004, Бюл. № 17.
62. Пат. Рос. Федерация № 2175065. Устройство для закрепления пылящих поверхностей хвостохранилищ и отвалов горных пород / В. П. Мязин, В. А. Бабелло, В. Ф. Офицеров, Д. В. Ходкевич. Оpubл. 20.10.2001, Бюл. № 29.
63. Пат. Рос. Федерация № 2272147. Способ пылеподавления на пляжах хвостохранилища и устройство для его осуществления / В. П. Бруев, В. И. Минеев, Ю. С. Спиридонов, Е. В. Кичигин, В. П. Петриченко. Оpubл. 20.03.2006, Бюл. № 8.
64. Комонов С. В. Технология пылеподавления на золоотвалах энергетических комплексов: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Красноярск, 2006. 19 с.
65. Макаров Д. В., Кони́на О. Т., Горячев А. А. Методы снижения пыления отвалов горнопромышленных отходов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. Т. 57, № 4. С. 160–170.
66. Маслoбоев В. А., Светлов А. В., Кони́на О. Т., Митрофанова Г. В., Турганов 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.
67. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. Л.: Недра, 1984. 511 с.
68. Загороднов С. Ю., Май И. В., Кокоулина А. А. Мелкодисперсные частицы (PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>) в атмосферном воздухе крупного промышленного региона: проблемы мониторинга и нормирования в составе производственных выбросов // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98, № 2. С. 142–147.
69. Кошкина В. С. Патологоанатомические и гистологические аспекты причин смерти лиц, проживающих в промышленном городе с развитой отраслью черной металлургии // Актуальные вопросы современной науки. 2009. № 9–1. С. 47–56.
70. Уланова Т. С., Гилёва О. В., Волкова М. В. Определение частиц микро- и нанодиапазона в воздухе рабочей зоны на предприятиях горнодобывающей промышленности // Анализ риска здоровью. 2015. № 4. С. 44–49.
71. Холодов А. С., Кириченко К. Ю., Задорнов К. С., Голохваст К. С. Влияние твердых взвешенных частиц атмосферного воздуха населенных пунктов на здоровье человека // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2019. № 49. С. 81–88.

72. Пыль в воздухе. Измерение запыленности. URL: <https://www.academlab.ru/services/air-analysis/pyil-v-vozduhe/> (дата обращения: 25.02.2023).
73. Мочалов В. И., Мосин С. В. Опыт работы ОАО «Михайловский ГОК» по борьбе с пылеобразованием на железорудном хвостохранилище // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2001. № 8. С. 12–15.
74. Немировский А. В. Проблемы осаждения пыли при функционировании хвостохранилища Стойленского ГОКа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 1. С. 397–401.
75. Чепелев О. А., Ломиворотова О. М. Изучение пыления хвостохранилищ и отвалов Лебединского горно-обогатительного комбината при помощи оптического анализатора аэрозолей // Проблемы региональной экологии. 2011. № 2. С. 45–48.
76. UNEP-WMO-UNCCD, 2016: Global assessment of sand and dust storms. Shepherd G., Terradellas E., Baklanov A., Kang U., Sprigg W. A., Nickovic S., Boloorani A. D., Al-Dousari A., Basart S., Benedetti A., Sealy A., Tong D., Zhang X., Shumake-Guillemot J., Kebin Z., Knippertz P., Mohammed A. A., Al-Dabbas M., Cheng L., Otani S., Wang F., Zhang C., Ryoo S. B., Cha J. Nairobi, UNEP, ISBN: 978-92-807-3551-2. URL: [http://uneplive.unep.org/media/docs/assessments/global\\_assessment\\_of\\_sand\\_and\\_dust\\_storms.pdf](http://uneplive.unep.org/media/docs/assessments/global_assessment_of_sand_and_dust_storms.pdf) (дата обращения: 12.12.2016).
77. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). 2022. Sand and Dust Storms Compendium: Information and Guidance on Assessing and Addressing the Risks. Bonn, Germany. 354 p. URL: [https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-05/1871\\_Book\\_SDS\\_%20Compendium\\_V1.pdf](https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-05/1871_Book_SDS_%20Compendium_V1.pdf) (дата обращения: 30.03.2023).
78. Мингалева Т. А., Горячев А. А., Мингалева Е. И. Выявление основных факторов влияния на развитие городских зеленых зон с применением ГИС-технологий // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2019. Т. 25, № 1. С. 197–205.
79. Исследование условий и разработка способов подавления пылеобразования на нефелиновых хвостохранилищах ПО «Апатит»: отчет о НИР «Изыскание методов техногенного и биологического закрепления нефелиновых хвостохранилищ» / Альтшулер В. М., Красносельский Э. Б., Талалаев С. М. и др.; Горный институт КФ АН СССР, 1982. Ч. 1. 80 с.
80. Ren H., Zhao Y., Xiao W. et al. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives // International Journal of Coal Science & Technology. 2019. Vol. 6. P. 320–333. URL: <https://doi.org/10.1007/s40789-019-00264-5> (дата обращения: 30.03.2023).
81. Меган Эдвардс. Беспилотные летательные аппараты в горнодобывающей промышленности / пер. с англ. С. С. Верхозин. URL: <https://zolotodb.ru/article/11132> (дата обращения: 30.03.2023).
82. Преимущества аэрофотосъемки с помощью БПЛА Геоскан. URL: <https://www.geoscan.aero/ru/application/mining> (дата обращения: 30.03.2023).
83. Как дроны меняют горнодобывающую промышленность. URL: <https://4vision.ru/articles/kak-drony-menyayut-gornodobyvayuschuyu-promyshlennost.html> (дата обращения: 30.03.2023).
84. Противоударный промышленный квадрокоптер Elios 2 создает трехмерные модели подземных горных выработок. URL: <https://www.pergam.ru/articles/mining-drone.htm> (дата обращения: 30.03.2023).

85. Крупин А. Дрон на производстве: как промышленность использует беспилотный транспорт. URL: <https://www.comnews.ru/digital-economy/content/204389/2020-02-03/2020-w06/dron-proizvodstve-kak-promyshlennost-ispolzuet-bespilotnyu-transport> (дата обращения: 30.03.2023).
86. Витковская С. Дроны в карьер. URL: <https://www.vedomosti.ru/partner/articles/2019/12/06/817974-droni-karerg> (дата обращения: 30.03.2023).
87. Асташина О. Горнодобывающая промышленность: преимущества применения дронов сегодня и перспективы на ближайшее время. URL: <https://dji-blog.ru/naznachenie/promyshlennye/gornodobyvajushhaja-promyshlennost-preimushhestva-primeneniya-dronov-segodnja-i-perspektivy-na-blizhajshee-vremja.html> (дата обращения: 30.03.2023).
88. Картирование месторождений с помощью БПЛА. URL: <https://dprom.online/unsolution/kartirovanie-mestorozhdenij-s-pomoshhyu-bpla/> (дата обращения: 30.03.2023).
89. Бойко А. Области применения беспилотников. URL: <http://robotrends.ru/gobopedia/oblasti-primeneniya-bespilotnikov> (дата обращения: 30.03.2023).
90. Получение данных для горнодобывающей отрасли от этапа добычи до этапа отгрузки потребителю: тенденции цифровизации в горнодобывающей отрасли. URL: <https://www.consultdss.ru/digitalization-in-mining/> (дата обращения: 23.10.2021).
91. Репина И. А., Варенцов М. И., Чечин Д. Г., Артамонов А. Ю., Бодунков Н. Е., Калягин М. Ю., Живоглотов Д. Н., Шевченко А. М., Варенцов А. И., Куксова Н. Е., Степаненко В. М., Шестакова А. А. Использование беспилотных летательных аппаратов для исследования атмосферного пограничного слоя // *Инноватика и экспертиза*. 2020. Вып. 2 (30). С. 20–39. DOI 10.35264/1996-2274-2020-2-20-39. URL: <https://www.inno-exp.ru/archive/30/20-39.pdf> (дата обращения: 30.03.2023).
92. Alvarado M., Gonzalez F., Erskine P., Cliff D., Heuff D. A Methodology to monitor airborne PM<sub>10</sub> dust particles using a small unmanned aerial vehicle // *Sensors*. 2017. V. 17 (2). 343. DOI: 10.3390/s17020343.
93. Madeira J., Bedidi A., Cervelle B., Pouget M., Flay N. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil // *International Journal of Remote Sensing*. 1997. V. 18. P. 2835–2852.
94. Mathieu R., Pouget M., Cervelle B., Escadafal R. Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil colour of an arid environment // *Remote Sensing of Environment*. 1998. V. 66. P. 17–28.
95. Levin N., Ben-Dor E., Singer A. A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments // *International Journal of Remote Sensing*. 2005. V. 26, No. 24. P. 5475–5492.
96. Валеева А. А., Александрова А. Б., Копосов Г. Ф. Цветовые характеристики лесных почв Волжско-Камской лесостепи // *Ученые записки Казанского университета. Естественные науки*. 2015. Т. 157, кн. 3. С. 58–66.
97. Кириллова Н. П., Силева Т. М. Анализ цвета почв с использованием цифровой камеры // *Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение*. 2017. № 1. С. 16–23.

98. Dean C., Warner T. A., McGraw J. B. Suitability of the DCS460c colour digital camera for quantitative remote sensing analysis of vegetation // *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2000. V. 55. P. 105–118.
99. King D. J. Airborne multispectral digital camera and video sensors: a critical review of system designs and applications // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 1995. V. 21. P. 245–273.
100. Yam K. L., Papadakis S. E. A simple digital imaging method for measuring and analyzing colour of food samples // *Journal of Food Engineering*. 2004. V. 61. P. 137–142.
101. Sena D. G., Pinto F. A. C., Queiroz D. M., Viana P. A. Fall armyworm damaged maize plant identification using digital images // *Biosystems Engineering*. 2003. V. 85. P. 449–454.
102. Wang K., Kangas J. A. Character location in scene images from digital camera // *Pattern Recognition*. 2003. V. 36. P. 2287–2299.
103. Hinkler J., Pedersen S.B., Rasch M., Hansen B.U. Automatic snow cover monitoring at high temporal and spatial resolution, using images taken by a standard digital camera // *International Journal of Remote Sensing*. 2002. V. 23. P. 4669–4682.
104. Ачасов А. Б., Бидолах Д. И. Использование материалов космической и наземной цифровой фотосъемки для определения содержания гумуса в почвах // *Почвоведение*. 2008. № 3. С. 280–286.
105. Булыгин С. Ю., Бидолах Д. И., Лисецкий Ф. Н. Оценка гумусированности почв путем обработки их цифровых фотоизображений // *Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки*. 2011. Т. 16, № 15. С. 154–159.
106. Robertson E. A. G., Campbell D. J. Simple, low-cost image analysis of soil pore structure // *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1997. V. 68, No 4. P. 291–296.
107. Пузаченко Ю. Г., Пузаченко М. Ю., Козлов Д. Н., Алещенко Г. М. Анализ строения почвенного профиля на основе цифровой цветной фотографии // *Почвоведение*. 2004. № 2. С. 133–146.
108. Adderley W. P., Simpson I. A., Davidson D. A. Colour description and quantification in mosaic images of soils thin sections // *Geoderma*. 2002. V. 108, No 3–4. P. 181–195.
109. León K., Mery D., Pedreschi F., León J. Color measurement in L\*a\*b\* units from RGB digital images // *Food Research International*. 2006. V. 39, No 10. P. 1084–1091.
110. Melville M. D., Atchinson G. Soil colour: its measurement and its designation in models of uniform colour space // *Journal of Soil Science*. 1985. V. 36, No 4. P. 495–512.
111. Warner W. S. Mapping a three-dimensional soil surface with hand-held 35 mm photography // *Soil and Tillage Research*. 1995. V. 34, No 3. P. 187–197.
112. Цырятьева А. В., Тюкавкина В. В. Оценка фотокаталитической активности титаносиликатных порошков синтетического происхождения // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2021. Т. 12, № 2 (5). С. 273–278.
113. Tyukavkina V. V., Shchelokova E. A., Tsyryatyeva A. V., Kasikov A. G. TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> nanocomposites from technological wastes for self-cleaning cement composition // *Journal of Building Engineering*. 2021. V. 44. P. 102648.

114. Shchelokova E. A., Tyukavkina V. V., Tsyryatyeva A. V., Kasikov A. G. Synthesis and characterization of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> nanoparticles and their effect on the strength of self-cleaning cement composites // *Construction and Building Materials*. 2021. V. 283. P. 122769.
115. Webster M. A., Mollon J. D. Adaptation and the color statistics of natural images // *Vision Research*. 1997. V. 37, No 23. P. 3283–3298.
116. Viscarra Rossel R. A., Walter C. Towards a quantitative assessment of field soil organic carbon using proximally sensed digital imagery // In 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, 14–21 August 2002. No. 48. Paper no. 1523.
117. Viscarra Rossel R. A., Walter C., Fouad Y. Assessment of two reflectance techniques for the quantification of field soil organic carbon // *Precision Agriculture*. 2003. P. 697–703.
118. Селянкин В. В., Скороход С. В. Анализ и обработка изображений в задачах компьютерного зрения: учебное пособие. Таганрог: ЮФУ, 2015. 82 с.
119. Постнов К. В. Компьютерная графика. М.: НИУ МГСУ, 2012. 289 с.
120. RGB. URL: <https://media.contented.ru/glossary/rgb/> (дата обращения: 30.03.2023).
121. Различия цветовых моделей RGB, CMYK, HSB. URL: <https://accent.su/blog/razlichiya-tsvetovyh-modelej-rgb-cmyk-hsb/> (дата обращения: 30.03.2023).
122. Аппаратно-независимые цветовые модели. URL: [http://vtk34.narod.ru/putilina\\_rastrgraphic/lek/6/index.htm](http://vtk34.narod.ru/putilina_rastrgraphic/lek/6/index.htm) (дата обращения: 30.03.2023).
123. CIE 15: 2004. Technical report. Colorimetry. 3rd ed. Vienna: 2004. 72 p. DOI: <https://ia802802.us.archive.org/23/items/gov.law.cie.15.2004/cie.15.2004.pdf>.
124. Конвертер RGB в HEX. URL: <https://wizlogo.com/ru/rgb-to-hex> (дата обращения: 30.03.2023).
125. Колориметрическая система хуз. URL: <https://unick-soft.ru/article.php?id=32> (дата обращения: 30.03.2023).
126. О цветовых пространствах. URL: <https://habr.com/ru/articles/181580/> (дата обращения: 30.03.2023).
127. Сабянин Г. В. К вопросу о формировании пылевого экологического фактора в природно-технических системах подземного освоения сложноструктурных рудных месторождений // *Экологические системы и приборы*. 2013. № 4. С. 21–30.
128. Бакланов А. А. Численное моделирование в рудничной аэрологии. Апатиты: КФАН СССР, 1988. 200 с.
129. Baklanov A., Rigina O. Environmental modeling of dusting from the mining and concentration sites in the Kola Peninsula, Northwest Russia // *The XI World Clear Air and Environment Congress*, 14–18 September 1998, Durban, South Africa, IUAPPA-NACA. Durban, 1998. Vol. 1, 4F-3, pp. 1–18.
130. Rigina, O. Integration of Remote Sensing, mathematical atmospheric modeling and GIS for complex environmental impact assessment in the Kola Peninsula, Russian North. PhD thesis. University of Copenhagen, Denmark, IGUK press, 2001. ISSN 0908-6625, ISBN 87-87945-49-5.
131. Изыскания методов расчета в задачах охраны воздушной среды при разработке месторождений полезных ископаемых: отчет о НИР (в 2 ч.) / Горный институт и Отдел экологических проблем КНЦ АН СССР; рук. Калабин Г. В., Бакланов А. А.; исполн.: Талалаев С. М., Амосов П. В. и др. Апатиты, 1989. Ч. 1. 71 с.

132. Баренблат Г. И., Голицин Г. С. Локальная структура пыльных бурь: препринт. М.: МГУ, 1973. 44 с.
133. Бютнер Э. К. Динамика приповерхностного слоя воздуха. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 160 с.
134. Беляновский А. С. Требования к параметрам площадных источников пыления горно-обогатительных предприятий по критерию загрязнения атмосферы: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01 / Беляновский Александр Семенович. М.: 1992. 245 с.
135. Спасем город Апатиты от пыли хвостохранилища АНОФ-2. <http://www.hibiny.com/forum/viewtopic.php?p=258231> (дата обращения 12.07.2022).
136. COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru/> (дата обращения: 12.05.2022).
137. Амосов П. В., Бакланов А. А. Использование компьютерных моделей для исследования процессов пыления хвостохранилища // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения» (Апатиты, ИППЭС КНЦ РАН, 2–5 октября 2012 г.). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2012. Ч. 2. С. 7–11.
138. Amosov P. V., Baklanov A. A. Dust Storms: on importance of tailing dump height // Proceedings of the 3-th International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management — CRETE-2012, 12–14 September 2012, Chania, Crete, Greece [Электронный ресурс]. Chania: Technical University of Crete, 2012. CD:\Crete2012 e-Proceedings\data/pdf-files/S10.5.pdf, 8 p.
139. Amosov P. V., Baklanov A. A. Dust Storms: on importance of tailing dump height // Proceedings of the 3-th International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management — CRETE-2012, 12–14 September 2012, Chania, Crete, Greece. Executive Summaries. Chania: Technical University of Crete, 2012. P. 123–124.
140. Амосов П. В., Бакланов А. А. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилища // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-25: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т. 2. Секции 3, 4 / под общ. А. А. Большакова. Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2012; Харьков: Национ. техн. ун-т «ХПИ», 2012. С. 140–143.
141. Калабин Г. В., Бакланов А. А., Амосов П. В. Метод расчета аэрогазодинамики плоских камерообразных выработок на основе математического моделирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. № 1. С. 74–88.
142. Мельников Н. Н., Бакланов А. А., Амосов П. В. Влияние высоты ограждения пылящей поверхности хвостохранилища на загрязнение атмосферы // Горный журнал. 2013. № 3. С. 92–94.
143. Приймак Т. И., Зосин А. П., Маслобоев В. А. Экологические аспекты гипергенеза минерального сырья в условиях Субарктики. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2013. 108 с.
144. Изыскание методов техногенного и биологического закрепления нефелиновых хвостохранилищ: отчет о НИР (в 3 ч.) / Горный институт КФ АН СССР; рук. Мельников Н. Н.; исполн.: Альтшулер В. М., Красносельский Э. Б. и др. Апатиты, 1982. Ч. 1. 80 с.

145. Рекультивация хвостового хозяйства АНОФ-2 с учетом проекта реконструкции хвостохранилища до отметки 200 м: регламент / ООО «ПРИОРИТЕТ»; рук. Зосин А. П.; исполн.: Приймак Т. И. и др. Апатиты, 2011. 88 с.
146. Kalabin G. V., Krasnoselsky E. B., Talalaev S. M., Baklanov A. A., Mesyats S. P., Rigina O. Yu. Dust content of industrial region atmosphere at different methods of tailings dump surface consolidation // *Tailings and effluent management: proceedings of the International Symposium on Tailings and Effluent Management, Halifax, August 20–24, 1989*. New-York: Pergamon Press, 1989, pp. 247–256.
147. Бакланов А. А., Калабин Г. В. (Ред.) Математическое моделирование процессов загрязнения атмосферы на объектах горной промышленности. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1991. 132 с.
148. Амосов П., Бакланов А., Ригина О. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилищ // LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 109 с.
149. WMO SDS-WAS, 2015: Nickovic, S., E. Cuevas, J. Baldasano, E. Terradellas, T. Nakazawa, A. Baklanov. Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System (SDS-WAS): Science and Implementation Plan 2015–2020. World Meteorological Organization, WMO WWRP 2015-5, Geneva, Switzerland, 2015. 37 p.
150. WMO Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System (SDS-WAS) [Электронный ресурс]. URL: [http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/Sand\\_and\\_Dust\\_Storm.htm](http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/Sand_and_Dust_Storm.htm) (дата обращения: 21.04.2017).
151. Tegen I. Atmospheric Dust Sources. 2005 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.solas-int.org/summerschool/lectures/2005lectures/Tegen.pdf> (дата обращения: 22.02.2015).
152. Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposits. London: Academic Press Inc., 1987. 334 p.
153. Dust sources and atmospheric dust process. 2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/source.html> (дата обращения: 11.06.2016).
154. Kok J. F., Parteli E. J. R., Michaels T. I., Bou Karam D. The physics of wind-blown sand and dust // *Rep. Prog. Phys.* 2012. Vol. 75. P. 106901.
155. Basart S., Baldasano J.M., Terradellas E., Benincasa F., Jorba O. Dust modeling and forecasting in the BSC. 2012 [Электронный ресурс]. URL: [http://bobcat.aero.und.edu/jzhang/ICAP/AERP/MeetingPDFs/Overviews/Basart\\_ES-BSC\\_Dust\\_modelling.pdf](http://bobcat.aero.und.edu/jzhang/ICAP/AERP/MeetingPDFs/Overviews/Basart_ES-BSC_Dust_modelling.pdf) (дата обращения: 10.03.2015).
156. Marticorena B., Bergametti G. Modeling the Atmospheric Dust Cycle. 1. Design of a Soil-Derived Dust Emission Scheme // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 1995. Vol. 100, No. D8. P. 16415–16430. DOI: <https://doi.org/10.1029/95JD00690>.
157. Woodward S. Mineral Dust in HadGEM2. 2011 [Электронный ресурс]. URL: [www.metoffice.gov.uk/media/pdf/l/p/HCTN\\_87.pdf](http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/l/p/HCTN_87.pdf) (дата обращения: 08.02.2015).
158. Shao Y., Raupach M. R. Effect of Saltation Bombardment on the Entrainment of Dust by Wind // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 1993. Vol. 98, No. D7. P. 12719–12726.
159. Shannon S. R. Modelling the atmospheric mineral dust cycle using a dynamic global vegetation model. 2009 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.paleo.bristol.ac.uk/~ggsrs/website/thesis/thesis.pdf> (дата обращения: 24.03.2020).



160. Yoshioka M., Mahowold N., Dufresne J.-L., Luo C. Simulation of absorbing aerosol indices for African dust // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. doi:10.1029/2004JD005276.
161. Ginoux P., Chin M., Tegen I., Prospero J. M., Holben B., Dubovil O., Lin S. J. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model // *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 20. P. 20255–20273. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000JD000053>.
162. Ginoux P., Prospero J. M., Torres O., Chin M. Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: correlation with North Atlantic Oscillation // *Journal of Environmental Modelling & Software*. 2004. No. 19. P. 113–128. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00114-2](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00114-2).
163. Luo C., Mahowald N. M., Corral J. Sensitivity study of meteorological parameters on mineral aerosol mobilization, transport, and distribution // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 2003. Vol. 108, No. D15. doi:10.1029/2003JD003483.
164. Gillette D. A., Passi R. Modeling Dust Emission Caused by Wind Erosion // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 1988. Vol. 93, No. D11. P. 14233–14242.
165. Alizadeh Choobari O., Zawar-Reza P., Sturman A. Low level jet intensification by mineral dust aerosols // *Ann. Geophys.* 2013. No. 31. P. 625–632.
166. Supplemental Material. S1. Description of GOCART model and emissions used in the present study. URL: <https://www.atmos-chem-phys.net/14/3657/2014/acp-14-3657-2014-supplement.pdf> (дата обращения: 17.01.2020).
167. Iversen J. D., White B. R. Saltation threshold on Earth, Mars and Venus // *Sedimentology*. 1982. No. 29. P. 111–119.
168. Bagnold R. A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen, New York, 1954. 265 p.
169. Iversen J. D., Pollack J. B., Greeley R., White B. R. Saltation threshold on Mars: The effect on interparticle force, surface roughness, and low atmospheric density // *Icarus*. 1976. No. 29. P. 381–393.
170. Shannon S., Lunt D. J. A new dust cycle model with dynamic vegetation: LPJ-dust version 1.0 // *Geosci. Model Dev.* 2011. Vol. 4. P. 85–105. URL: [www.geosci-model-dev.net/4/85/2011/](http://www.geosci-model-dev.net/4/85/2011/) doi:10.5194/gmd-4-85-2011 (дата обращения: 18.03.2015).
171. Menut L., Schmechtig C., Marticorena B. Sensitivity of the Sandblasting Flux Calculations to the Soil Size Distribution Accuracy // *J. of Atmospheric and Ocean Technology*. 2005. Vol. 22. P. 1875–1884.
172. Zender C. S., Bian H. S., Newman D. Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology // *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 2003. Vol. 108 (D14). doi:10.1029/2002JD002775. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2002JD002775> (дата обращения: 23.01.2020).
173. White B. R. Soil transport by winds on Mars // *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84. P. 4643–4651.
174. Greeley R., Blumberg D. G., Williams S. H. Field measurements of the flux and speed of wind-blown sand // *Sedimentology*. 1996. Vol. 43, Issue 1. P. 41–52.
175. Семенов О. Е. Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы, 2011. 580 с.
176. Johnson K. C. A comparison of the NAVY Aerosol Analysis and Prediction System to in situ aerosol measurements in the continental U. S.: transport vs. Local production of soil dust aerosol. 2006 [Электронный ресурс]. URL: [http://chem.atmos.colostate.edu/Thesis/Johnson\\_thesis\\_final.pdf](http://chem.atmos.colostate.edu/Thesis/Johnson_thesis_final.pdf) (дата обращения: 26.01.2020).

177. Westphal D. L., Toon O. B., Carlson T. N. A Case-Study of Mobilization and Transport of Saharan Dust // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1988. No. 45. P. 2145–2175.
178. Шуляк Б. А. Физика волн на поверхности сыпучей среды и жидкости. М.: Наука, 1971. 400 с.
179. Barenblatt G. J., Golitsyn G. S. Local structure of mature dust storms // *J. Atmosphere Sci.* 1974. Vol. 31, No. 7. P. 1917–1933.
180. Сенкевич Б. Н. О генезисе основных форм эолового рельефа песчаных пустынь. Ашхабад: Изд-во «БЫЛЫМ», 1976. 183 с.
181. Kok J. F., Mahowald N. M., Fratini G., Gillies J. A., Ishizuka M., Leys J. F., Mikami M., Park M.-S., Park S.-U., Van Pelt R. S. and Zobeck T. M. An improved dust emission model — Part 1: Model description and comparison against measurements, *Atmos. Chem. Phys.* 14 (23), 13, 023–13, 041, 2014.
182. Klose M., Jorba O., Gonçalves Ageitos M., Escribano J., Dawson M. L., Obiso V., Di Tomaso E., Basart S., Montané Pinto G., Macchia F., Ginoux P., Guerschman J., Prigent C., Huang Y., Kok J. F., Miller R. L., and Pérez García-Pando C. Mineral dust cycle in the Multiscale Online Nonhydrostatic Atmosphere Chemistry model (MONARCH) Version 2.0 // *Geosci. Model Dev.* 2021. Vol. 14. P. 6403–6444. URL: <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6403-2021> (дата обращения: 18.09.2022).
183. 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. DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.1.5-14.
184. Амосов П. В., Бакланов А. А. К вопросу оценки интенсивности пыления хвостохранилищ // *Математические методы в технике и технологиях — ММТТ*. 2015. № 1 (71). С. 3–5.
185. Амосов П. В., Бакланов А. А. Оценка вертикального потока массы пыли на хвостохранилище на базе схемы “DEAD” // *Проблемы недропользования*. 2015. № 3 (6). С. 80–84.
186. Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Амосов П. В. Влияние скорости ветрового потока и высоты хвостохранилища на уровень загрязнения атмосферы // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2016. № 3. С. 67–73.
187. ГН 2.16.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. URL: [http://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/42/42030/](http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/42/42030/) (дата обращения: 12.11.2016).
188. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений: Гигиенические нормативы с изменениями: утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 31.05.2018 № 37. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2019. 55 с.
189. Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Амосов П. В. Результаты оценки интенсивности пыления хвостохранилищ // *Вестник МГТУ*. 2016. Т. 19, № 1/1. С. 13–19.
190. Амосов П. В., Бакланов А. А. Влияние геометрических параметров источника пыления на оценку загрязнения атмосферы // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № S23. С. 502–509. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-10-23-502-509.

191. Амосов П. В., Бакланов А. А., Макаров Д. В., Маслобоев В. А. Результаты оценки загрязнения атмосферы в зависимости от скорости ветрового потока и площади пыления методом численного моделирования // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 5. С. 80–89. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-80-89.
192. Амосов П. В., Бакланов А. А. Результаты проверки идеи по сокращению трудозатрат на выполнение численных экспериментов процессов пыления // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ. 2020. Т. 3. С. 111–113.
193. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для студ. вузов. 10-е изд., стереотип. М.: Высшая школа, 2004. 479 с.
194. Михайлов Е. В., Патронова Н. Н., Тепляков В. В. Теория вероятностей в примерах и задачах. Ч. 1. Комбинаторика. Случайные события и их вероятности / САФУ имени М. В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2013. 141 с.
195. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений: учебное пособие. СПб.: Изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 2001. 108 с.
196. Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.
197. Снегирев А. Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 143 с.
198. Методы расчета турбулентных течений / под ред. В. Колльмана. М.: Мир, 1984. 464 с.
199. Амосов П. В., Бакланов А. А., Макаров Д. В., Маслобоев В. А. Прогноз загрязнения атмосферы при случайном выборе дискретных пылящих участков на базе численного моделирования // Известия вузов. Горный журнал = News of the Higher Institutions. Mining Journal. 2021. № 5. С. 63–74. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-5-63-74.
200. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.
201. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1985. 256 с.
202. Baklanov A., Korsholm U. S., Nuterman R., Mahura A. [et al.]. Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v 7.2) // Geoscientific Model Development. 2017. Vol. 10, Iss. 8. P. 2971–2999. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2971-2017>.
203. Mahura A., Gonzalez-Aparicio I., Nuterman R., Baklanov A. Seasonal Impact Analysis on Population due to Continuous Sulphur Emissions from Severonikel Smelters of the Kola Peninsula // Geography, Environment, Sustainability. 2018. Vol. 11, Iss. 1. P. 130–144. DOI: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-130-144>.
204. Амосов П. В., Бакланов А. А., Макаров Д. В., Маслобоев В. А. Численное моделирование загрязнения атмосферы в подходах случайного выбора дискретных участков пыления и поинтервального распределения размера пыли // Вестник МГТУ. 2022. Т. 25, № 1. С. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73>.

205. Беляновский Е. С., Беляновский А. С., Бейлин В. Н. Моделирование загрязнения атмосферы продуктами пылевой эрозии техногенных источников в рамках нормативного подхода к размещению промышленных объектов // Математическое моделирование процессов загрязнения атмосферы на объектах горной промышленности. Апатиты: изд. КНЦ АН СССР, 1990. С. 30–38.
206. Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Мазухина С. И., Амосов П. В. Компьютерное моделирование процессов пыления хвостохранилища // Вестник КНЦ РАН. 2013. № 3. С. 44–50.
207. Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Мазухина С. И., Ригина О. Ю., Амосов П. В. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилища // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 376–384.



ISBN 978-5-91137-505-8



9 785911 375058

**П. В. Амосов — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ИППЭС КНЦ РАН**

**А. А. Бакланов — доктор физико-математических наук, профессор, научный сотрудник отдела науки и инноваций Всемирной метеорологической организации (ВМО) и главный научный сотрудник Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ)**

**А. А. Горячев — младший научный сотрудник ИППЭС КНЦ РАН**

**О. Т. Кони́на — начальник отдела охраны труда и промышленной безопасности ООО «КОУЛСТАР»**

**Е. А. Красавцева — кандидат технических наук, научный сотрудник ИППЭС КНЦ РАН**

**Д. В. Макаров — доктор технических наук, директор ИППЭС КНЦ РАН**

**В. А. Маслобоев — доктор технических наук, профессор, научный руководитель ИППЭС КНЦ РАН**

**О. Ю. Ригина — доктор философии, консультант, Всемирная организации здравоохранения (ВОЗ)**

**А. В. Светлов — кандидат технических наук, заместитель директора ИППЭС КНЦ РАН**

