

Научная статья
УДК 622.4+519.67
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.001

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ИНТЕНСИВНОСТИ ПЫЛЕНИЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЕННЫХ УЧАСТКАХ ХВОСТОХРАНИЛИЩА ПРИ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРА ФОНОВОЙ СТРАТИФИКАЦИИ И СКОРОСТИ ВЕТРА

Павел Васильевич Амосов

Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия
p.amosov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Аннотация

Представлены результаты анализа расчётных значений интенсивностей пыления для двух интервалов крупности 0–10 (I интервал) и 10–20 мкм (II интервал) на дискретных пространственно-разнесённых двадцати пылящих участках. Использована трёхмерная модель площадки «хвостохранилище АНОФ-2 — город Апатиты», разработанная на базе неспециализированного кода COMSOL и дополненная учётом механизмов плавучести и фоновой стратификации.

При выполнении численных экспериментов по отработанной методике использованы следующие значения варьируемых параметров модели: скорость ветра 5 и 11 м/с, параметр фоновой стратификации от –0,05 до +0,05 с шагом 0,01 °С/м.

Продemonстрировано, что лишь при скорости ветра 11 м/с пыль обоих интервалов крупности участвует в процессе загрязнения атмосферы, при скорости ветра 5 м/с подъём пыли I интервала не прогнозируется. Увеличение скорости ветра с 5 до 11 м/с снижает максимальный разброс в значениях интенсивности пыления при вариации фоновой стратификации с ~10 до ~2 %. Дальнейшее усиление ветра минимизирует эффект вариации параметра стратификации на интенсивность пыления практически до нуля.

Ключевые слова:

пространственно-разнесённые участки хвостохранилища, интенсивность пыления, фоновая стратификация, скорость ветра, численное моделирование

Благодарности:

работа выполнена в рамках темы НИР № гос. рег. 1021051803680-5 «Процессы трансформации природных и техногенных систем в условиях изменения климата в Арктической зоне Российской Федерации (на примере Мурманской области)».

Для цитирования:

Амосов П. В. Результаты анализа интенсивности пыления на пространственно-разнесённых участках хвостохранилища при вариации параметра фоновой стратификации и скорости ветра // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2025. Т. 4, № 3. С. 5–13. doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.001.

Original article

THE RESULTS OF THE ANALYSIS OF DUSTING INTENSITY IN SPATIALLY SPACED SITES OF THE TAILINGS DUMP WITH VARIATIONS IN THE PARAMETER OF BACKGROUND STRATIFICATION AND WIND VELOCITY

Pavel V. Amosov

Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Russia
p.amosov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Abstract

The results of the analysis of calculated values of dusting intensities for two size intervals 0–10 µm (I interval) and 10–20 µm (II interval) on discrete spatially spaced twenty dusty sites are presented. A three-dimensional model of the region the “ANOF-2 tailing dump — Apatity city” was used. This model was developed on the basis of a non-specialized COMSOL code and supplemented with consideration of buoyancy and background stratification mechanisms.

The following values of the variable parameters of the model were used when performing numerical experiments using a proven technique: wind velocity of 5 and 11 m/s, background stratification parameter from –0.05 to +0.05 in increments of 0.01 °C/m.

It has been demonstrated that only at a wind velocity of 11 m/s, dust of both size intervals participates in the process of atmospheric pollution, at a wind velocity of 5 m/s, dust rise of the I interval is not predicted.

An increase in wind velocity from 5 to 11 m/s reduces the maximum variation in dust intensity values with variations in background stratification from ~10 to ~2 %. Further strengthening of the wind minimizes the effect of variation of the stratification parameter on the dusting intensity to almost zero.

Keywords:

spatially separated areas of the tailings dump, dusting intensity, background stratification, wind velocity, numerical modeling

Acknowledgements:

The research was carried out within the framework of the research topic No. 1021051803680-5 "Processes of transformation of natural and man-made systems in the conditions of climate change in the Arctic zone of the Russian Federation (on the example of the Murmansk region)".

For citation:

Amosov P. V. The results of the analysis of dusting intensity in spatially spaced sites of the tailing dump with variations in the parameter of background stratification and wind velocity // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities. 2025. Vol. 4, no. 3. P. 5–13. doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.001.

Введение

Хвостохранилище АНОФ-2 (г. Апатиты, Мурманская обл.) в весенне-осенний период при сильном северо-западном ветре эпизодически доставляет определённые негативные эмоции жителям города. По данным ФГБУ «Мурманское УГМС», на стационарных постах контроля атмосферного воздуха в г. Апатиты за весенне-осенний периоды 2016–2018 гг. фиксировалось 14, 10 и 13 соответственно случаев загрязнения воздуха (по пыли) выше уровня ПДК [1]. Проблема является актуальной для городского населения, что понимают представители власти города и руководства КФ АО «Апатит».

Именно для этого объекта пыления в настоящее время в ИППЭС КНЦ РАН модернизируются компьютерные модели, позволяющие выполнять исследования процессов переноса мультidisперсной пыли вниз по ветровому потоку с учётом механизмов плавучести и фоновой стратификации.

Заметим, что проблема обеспечения качества воздушной среды не ограничивается обозначенной локальной эпизодической ситуацией, а имеет глобальное мировое значение в оценке песчаных и пылевых бурь [2, 3], а также по прогнозу химической погоды и качества атмосферы с использованием методов численного моделирования [4].

В рамках данной публикации речь идёт об интенсивности пыления мелкой пыли, которая представляет наибольшую опасность вследствие проникновения в дыхательные пути и лёгкие человека, двух интервалов — 0–10 и 10–20 мкм.

Цель исследования — оценить влияние механизмов плавучести и фоновой стратификации на интенсивность пыления пространственно-разнесенных участков при разных значениях скорости ветрового потока.

Методика исследований

В качестве «инструмента» выполнения численных экспериментов применена программа COMSOL [5]. Расчёты выполнены на базе объёмной модели площадки «хвостохранилище АНОФ-2 — город Апатиты» [1, 6]. Компьютерная модель разработана на базе неспециализированного кода COMSOL и дополнена на текущем этапе исследований учётом механизмов плавучести и фоновой стратификации [7]. В указанной публикации приведено описание управляющих уравнений модели, начальные и граничные условия. В статье также представлены результаты анализа численного моделирования эффекта обозначенных выше физических механизмов в двухмерной постановке.

При выполнении расчётов используется следующий отработанный порядок шагов:

- на 1-м шаге получаем стационарное поле скорости и распределение коэффициентов турбулентной вязкости в приближении несжимаемой жидкости с использованием (k - ϵ)-модели турбулентности;
- на 2-м шаге решаем нестационарную задачу аэротермодинамики с учётом сложившегося к концу первого шага поля скорости и коэффициентов турбулентного переноса тепла с выходом практически на стационарный режим аэротермодинамических параметров (продолжительность расчёта 8 часов).

На каждом шаге используются необходимые для расчётов начальные и граничные условия, в том числе и установленные по умолчанию разработчиками программы COMSOL [5].

При выполнении численных экспериментов по указанной методике использованы следующие значения варьируемых параметров модели: скорость ветра 5 и 11 м/с, параметр фоновой стратификации от $-0,05$ до $+0,05$ с шагом $0,01$ °C/м.

Результаты численных экспериментов и их анализ

Для каждого участка пыления (рис. 1) выполнено осреднение горизонтальной компоненты скорости на высоте $+10$ м над высотой пыления. Далее рассчитаны значения динамической скорости и полного вертикального потока массы (ВПМ) с использованием зависимости Д. Л. Вестфала [Westphal] с соавторами [8] и схемы DEAD [9, 10] как функций 4-й и 3-й степени динамической скорости соответственно.

Расчёты полного ВПМ выполнены для пыли крупности 35 мкм. Возможность использования полного ВПМ для срединного диаметра пыли (35 мкм) обоснована ранее [11] на основе сравнения пространственных распределений загрязнений, вычисленных на базе поинтервального и срединного подходов. При таком подходе существенно сокращаются трудозатраты на выполнение численных экспериментов и обработку результатов расчётов практически без снижения точности вычислений (речь идёт о погрешности на уровне 1 %).

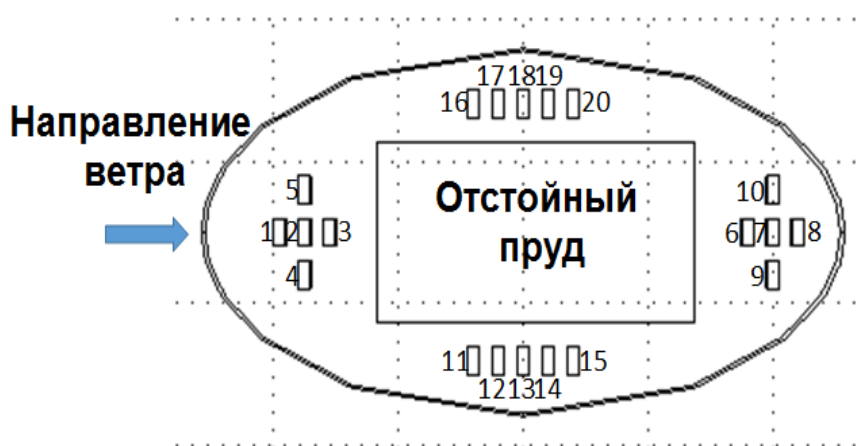


Рис. 1. Схематичное расположение на территории хвостохранилища участков (1–20) пылящей поверхности
Fig. 1. Schematic arrangement of sections (1–20) of the dusting surface on the territory of the tailing dump

В качестве примера выполненных расчётов в табл. 1 и 2 приведены значения динамической скорости (на высоте пыления участков 1–10), которые рассчитаны при вариации параметра фоновой стратификации S для значения скорости 5 м/с.

Эффект изменения значений динамической скорости для разных участков по завершению 1-го шага расчётов был известен и ранее (см. табл. 1 и 2 по строке $S = 0$, °C/м): объясняется как раз пространственным расположением участков и учётом (в определённой степени) используемой геометрии модели. А вот включение в модель новых физических механизмов обуславливает изменение значений динамической скорости для каждого участка в зависимости от значений параметра фоновой стратификации (см. табл. 1 и 2 по столбцам). Хорошо видно, что изменение в значениях динамической скорости для разных участков не является одинаковым. Для отдельных участков при вариации параметра стратификации от $-0,05$ до $+0,05$ °C/м имеем увеличение или уменьшение значений динамической скорости, а для некоторых поведение более сложное. Ниже будут приведены графические изображения ВПМ для I и II интервалов крупности пыли, где указанные особенности поведения значений динамической скорости визуализированы.

Таблица 1

Значения динамической скорости, рассчитанные при вариации параметра
фоновой стратификации S для значения скорости 5 м/с (участки 1–10), м/с
Dynamic velocity values calculated with variations in the background stratification parameter S
for a velocity value of 5 m/s (sections 1–10), m/s

S , °C/m	Site_01	Site_02	Site_03	Site_04	Site_05	Site_06	Site_07	Site_08	Site_09	Site_10
–0,05	0,4493	0,4623	0,4895	0,4472	0,4715	0,5027	0,5013	0,4871	0,4738	0,5446
–0,04	0,4504	0,4633	0,4902	0,4478	0,4718	0,5026	0,4989	0,4848	0,4712	0,5409
–0,03	0,4516	0,4645	0,4911	0,4484	0,4720	0,5047	0,4999	0,4861	0,4717	0,5384
–0,02	0,4529	0,4656	0,4922	0,4491	0,4723	0,5067	0,5013	0,4877	0,4724	0,5368
–0,01	0,4541	0,4668	0,4935	0,4499	0,4726	0,5080	0,5024	0,4886	0,4729	0,5357
0	0,4554	0,4681	0,4947	0,4508	0,4729	0,5088	0,5029	0,4891	0,4729	0,5349
0,01	0,4567	0,4693	0,4960	0,4517	0,4732	0,5092	0,5031	0,4891	0,4728	0,5343
0,02	0,4579	0,4704	0,4972	0,4525	0,4735	0,5092	0,5030	0,4887	0,4726	0,5337
0,03	0,4591	0,4716	0,4984	0,4534	0,4739	0,5091	0,5027	0,4882	0,4722	0,5332
0,04	0,4603	0,4726	0,4995	0,4542	0,4742	0,5089	0,5023	0,4874	0,4721	0,5328
0,05	0,4614	0,4737	0,5006	0,4550	0,4746	0,5084	0,5017	0,4868	0,4716	0,5324

Таблица 2

Значения динамической скорости, рассчитанные при вариации параметра
фоновой стратификации S для значения скорости 5 м/с (участки 11–20), м/с
Dynamic velocity values calculated with variation of the background stratification parameter S
for a velocity value of 5 m/s (sections 11–20), m/s

S , °C/m	Site_11	Site_12	Site_13	Site_14	Site_15	Site_16	Site_17	Site_18	Site_19	Site_20
–0,05	0,5379	0,5329	0,5349	0,5275	0,5397	0,5669	0,5691	0,5684	0,5713	0,5642
–0,04	0,5368	0,5326	0,5332	0,5272	0,5387	0,5686	0,5700	0,5705	0,5736	0,5672
–0,03	0,5359	0,5322	0,5317	0,5268	0,5377	0,5699	0,5708	0,5721	0,5751	0,5695
–0,02	0,5352	0,5319	0,5304	0,5265	0,5367	0,5709	0,5716	0,5733	0,5762	0,5713
–0,01	0,5345	0,5315	0,5293	0,5262	0,5359	0,5718	0,5723	0,5744	0,5768	0,5725
0	0,5339	0,5313	0,5284	0,5260	0,5351	0,5727	0,5730	0,5752	0,5774	0,5735
0,01	0,5334	0,5310	0,5276	0,5257	0,5345	0,5734	0,5737	0,5760	0,5778	0,5743
0,02	0,5329	0,5308	0,5270	0,5255	0,5339	0,5741	0,5743	0,5766	0,5782	0,5750
0,03	0,5325	0,5307	0,5264	0,5252	0,5333	0,5747	0,5748	0,5772	0,5785	0,5755
0,04	0,5321	0,5305	0,5260	0,5250	0,5328	0,5753	0,5753	0,5777	0,5787	0,5759
0,05	0,5318	0,5304	0,5256	0,5249	0,5324	0,5757	0,5758	0,5781	0,5789	0,5762

Далее для каждого значения скорости ветра выполнено:

1) вычленение из полного ВПМ поинтервальных интенсивностей пыления для двух интервалов размера частиц пыли: I интервал 0–10 мкм («вес» 0,022) и II — 10–20 мкм («вес» 0,083). Значения «весов» интервалов получены в результате обработки экспериментальных данных гранулометрического состава отвальных хвостов с поверхности устоявшегося пляжа хвостохранилища АНОФ-2, приведённых в диссертационной работе А. В. Стриженова [12];

2) сравнение значений динамической скорости на каждом участке пыления с величиной пороговой скорости для I и II интервалов. Если интервальная пороговая скорость превышает динамическую, процесса пыления для данного интервала пыли не будет.

Для наших интервалов пыли в соответствии с методикой оценки пороговой скорости [9] имеем: для I интервала — 0,951 м/с и для II — 0,420 м/с.

Из данных табл. 1 и 2 следует, что при скорости ветра 5 м/с лишь пыль II интервала крупности будет участвовать в процессах загрязнения атмосферы. Аналогичный анализ значений динамических скоростей для скорости ветра 11 м/с показал, что минимальное значение динамической скорости (участок 4) равно 0,9898 м/с, т. е. при этом ветре пыль обоих интервалов крупности будет участвовать в загрязнении атмосферы.

С учётом «весовых» характеристик рассматриваемых интервалов крупности пыли определены поинтервальные интенсивности пыления. На рис. 2 представлены графические изображения функций ВПМ II интервала крупности для дискретных пространственно-разнесённых двадцати пылящих участков хвостохранилища АНОФ-2. В представленном случае значения ВПМ рассчитаны с использованием зависимости [8] при вариации параметра фоновой стратификации для двух значений скорости ветра 5 м/с (слева) и 11 м/с (справа).

Видно, что при скорости ветра 5 м/с однозначности в зависимости функций интенсивности пыления от параметра фоновой стратификации нет. Кроме того, функциональная зависимость определяется пространственным расположением потенциальных участков пыления и рельефом местности. Есть группы участков с положительной производной функций, но есть участки с отрицательной производной и с производной, близкой к нулю или знакопеременной.

Максимальный разброс в значениях интенсивности пыления при скорости ветра 5 м/с не превышает примерно 10 %. Таким образом, для принятых модельных условий эффект вариации параметра фоновой стратификации на величину поинтервальной интенсивности пыления, следовательно, и последующего уровня загрязнения атмосферы не превысит указанной величины.

На рис. 2 (справа) хорошо видно, что при усилении ветра до скорости 11 м/с, а значит, при практически полном подавлении термического фактора за счёт энергии ветрового потока, имеем выход на линейные зависимости интенсивности пыления от параметра фоновой стратификации. Как и в ситуации со скоростью ветра 5 м/с, в этом случае имеем группы участков функции с положительной производной, группы участков с отрицательной и близкой к нулю производной.

Максимальный разброс в значениях интенсивности пыления при скорости ветра 11 м/с укладывается примерно в 2 %, а значит, эффект вариации параметра фоновой стратификации на величину поинтервальной интенсивности пыления и, как следствие, последующего уровня загрязнения атмосферы будет ещё слабее — на уровне 2 %.

Представляется, что уменьшение величины максимального разброса в интенсивности пыления с усилением скорости ветра обусловлено тем обстоятельством, что эффект термического фактора становится очень малым и энергия ветрового потока доминирует над тепловым фактором.

Для сравнения интенсивностей пыления I и II интервалов крупности в табл. 3 соответственно приведены значения ВПМ обоих интервалов крупности, рассчитанные при вариации параметра фоновой стратификации с использованием схемы DEAD для участков 16–20 при скорости ветра 11 м/с.

Из данных табл. 3 видно, что для одних и тех же участков пыления отношение ВПМ II и I интервалов крупности следует за отношением «весовых» значений интервалов, т. е. примерно 3,77. Также хорошо видно, что максимальный разброс в значениях интенсивности пыления для обозначенных участков при скорости ветра 11 м/с не превышает 1 %. Заметим, что участки 16–20 характеризуются максимальными значениями интенсивности пыления, что обусловлено складывающейся аэродинамикой в силу принятой орографии (наличие предгорий Хибин).

Из сравнения цифровых данных табл. 3 (II интервал) и рис. 2 (нижняя часть справа) можно увидеть, что зависимость Вестфала [8] и схема DEAD [9, 10] дают достаточно близкие значения интенсивности пыления. В качестве примера в табл. 4 приведены минимальные и максимальные значения ВПМ, рассчитанные по [8–10], при вариации параметра фоновой стратификации для участков 16–20. Отмеченный момент подтверждает рекомендацию авторов монографии [1] по использованию зависимости Вестфала и схемы DEAD в оценках интенсивностей пыления.

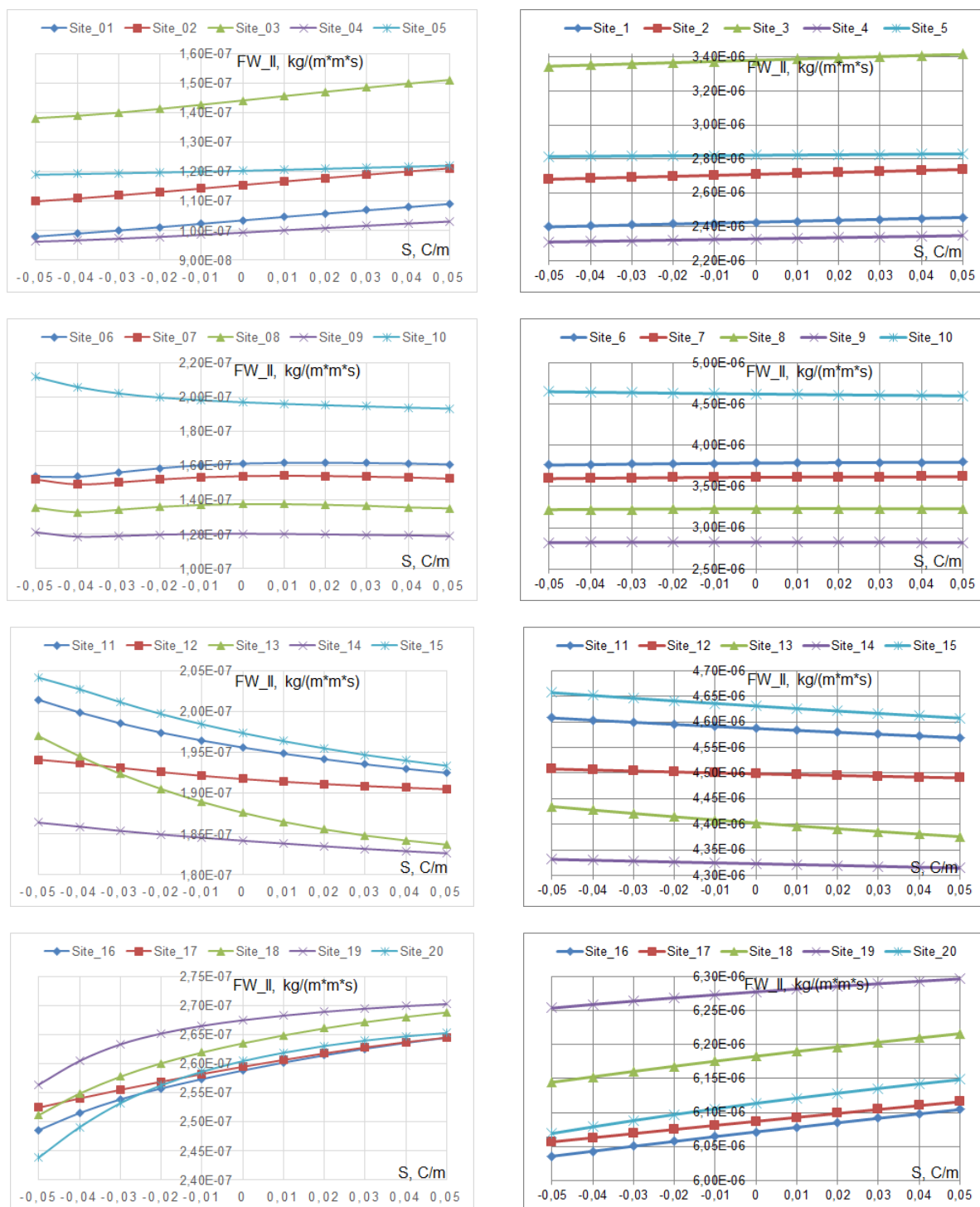


Рис. 2. Графические изображения функций ВПМ II интервала крупности для каждого участка, рассчитанные при вариации параметра фоновой стратификации с использованием зависимости [8] для двух значений скорости ветра 5 (слева) и 11 м/с (справа)

Fig. 2. Graphical representations of the VPM functions of the II size range for each site, calculated with variations in the background stratification parameter using the dependence [8] for two values of wind speed of 5 m/s (left) and 11 m/s (right)

Таблица 3

Значения ВПМ I и II интервалов крупности, рассчитанные с использованием схемы DEAD для участков 16–20 при скорости ветра 11 м/с и вариации параметра фоновой стратификации
VPM values of the I and II size intervals calculated using the DEAD scheme for sections 16–20 at a wind speed of 11 m/s and variations in the background stratification parameter

S, C/m	I интервал					II интервал				
	Site_16	Site_17	Site_18	Site_19	Site_20	Site_16	Site_17	Site_18	Site_19	Site_20
–0,05	1,63E-06	1,64E-06	1,66E-06	1,68E-06	1,64E-06	6,17E-06	6,18E-06	6,25E-06	6,33E-06	6,19E-06
–0,04	1,64E-06	1,64E-06	1,66E-06	1,68E-06	1,64E-06	6,17E-06	6,19E-06	6,25E-06	6,33E-06	6,20E-06
–0,03	1,64E-06	1,64E-06	1,66E-06	1,68E-06	1,64E-06	6,18E-06	6,19E-06	6,26E-06	6,34E-06	6,21E-06
–0,02	1,64E-06	1,64E-06	1,66E-06	1,68E-06	1,65E-06	6,18E-06	6,20E-06	6,26E-06	6,34E-06	6,21E-06
–0,01	1,64E-06	1,64E-06	1,66E-06	1,68E-06	1,65E-06	6,19E-06	6,20E-06	6,27E-06	6,34E-06	6,22E-06
0	1,64E-06	1,64E-06	1,66E-06	1,68E-06	1,65E-06	6,19E-06	6,20E-06	6,28E-06	6,35E-06	6,22E-06
0,01	1,64E-06	1,65E-06	1,66E-06	1,68E-06	1,65E-06	6,20E-06	6,21E-06	6,28E-06	6,35E-06	6,23E-06
0,02	1,64E-06	1,65E-06	1,67E-06	1,68E-06	1,65E-06	6,20E-06	6,21E-06	6,29E-06	6,35E-06	6,23E-06
0,03	1,65E-06	1,65E-06	1,67E-06	1,68E-06	1,65E-06	6,21E-06	6,22E-06	6,29E-06	6,35E-06	6,24E-06
0,04	1,65E-06	1,65E-06	1,67E-06	1,68E-06	1,66E-06	6,21E-06	6,22E-06	6,30E-06	6,36E-06	6,25E-06
0,05	1,65E-06	1,65E-06	1,67E-06	1,69E-06	1,66E-06	6,22E-06	6,23E-06	6,30E-06	6,36E-06	6,25E-06

Таблица 4

Минимальные и максимальные значения ВПМ II интервала крупности, рассчитанные с использованием зависимости Вестфала [8] и схемы DEAD [9, 10] для участков 16–20 при скорости ветра 11 м/с и вариации параметра фоновой стратификации
The minimum and maximum values of the VPM of the II size range, calculated using the dependence of Westphal [8] and DEAD [9, 10] schemes for sections 16–20 with a wind speed of 11 m/s and variations in the background stratification parameter

Site_16	Site_17	Site_18	Site_19	Site_20
Зависимость Вестфала [8]				
6,03E-06÷6,11E-06	6,06E-06÷6,12E-06	6,14E-06÷6,22E-06	6,25E-06÷6,30E-06	6,07E-06÷6,15E-06
Схема DEAD [9, 10]				
6,17E-06÷6,22E-06	6,18E-06÷6,23E-06	6,25E-06÷6,30E-06	6,33E-06÷6,36E-06	6,19E-06÷6,25E-06

Представленные результаты позволяют сделать важный вывод: вычисления при скорости ветра 17 м/с и более можно не выполнять, поскольку усиление ветра минимизирует эффект вариации параметра стратификации практически до нуля, а значит, в последующих оценках загрязнения атмосферы можно будет воспользоваться результатами ранее выполненных исследований [1].

Заключение

На базе трёхмерной модели площадки «хвостохранилище АНОФ-2 — город Апатиты», разработанной на базе неспециализированного кода COMSOL и дополненной учётом механизмов плавучести и фоновой стратификации, выполнены численные эксперименты и представлены результаты анализа прогнозных значений интенсивностей пыления на дискретных пространственно-разнесённых двадцати пылящих участках. Исследования выполнены для пыли двух интервалов крупности: 0–10 мкм (I интервал) и 10–20 мкм (II интервал).

При выполнении численных экспериментов использованы следующие значения варьируемых параметров модели: скорость ветра — 5 и 11 м/с, параметр фоновой стратификации — от $-0,05$ до $+0,05$ с шагом $0,01$ °C/м.

Продemonстрировано, что лишь при скорости ветра 11 м/с пыль обоих интервалов крупности участвует в процессе загрязнения атмосферы, при скорости ветра 5 м/с подъём пыли I интервала не прогнозируется.

Оценки вертикального потока массы выполнены с использованием зависимости Вестфаля [8] и схемы DEAD [9, 10].

Увеличение скорости ветра с 5 до 11 м/с снижает максимальный разброс в значениях интенсивности пыления при вариации фоновой стратификации с ~ 10 до ~ 2 %. Сделан вывод, что дальнейшее усиление ветра минимизирует эффект вариации параметра стратификации на интенсивность пыления практически до нуля.

Список источников

1. Пыление хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд: экологическая проблема и пути её решения: монография / П. В. Амосов [и др.]. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 168 с. doi:10.37614/978.5.91137.505.8.
2. UNEP-WMO-UNCCD: Global assessment of sand and dust storms / G. Shepherd [et al.]. 2016. URL: http://uneplive.unep.org/media/docs/assessments/global_assessment_of_sand_and_dust_storms.pdf (дата обращения: 12.12.2016).
3. WMO Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System (SDS-WAS). Science and Implementation Plan 2015–2020 / S. E. Nickovic [et al.]; World Meteorological Organization, WMO WWRP 2015-5. Geneva, 2015. 37 p.
4. Training Materials and Best Practices for Chemical Weather/Air Quality Forecasting. ETR-26 / Y. Zhang [et al.]. 2020. 576 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/346505334_Training_Materials_and_Best_Practices_for_Chemical_WeatherAir_Quality_Forecasting (дата обращения 28.03.2022).
5. COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru/> (дата обращения: 12.05.2022).
6. Численное моделирование загрязнения атмосферы в подходах случайного выбора дискретных участков пыления и поинтервального распределения размера пыли / П. В. Амосов [и др.] // Вестник МГТУ. 2022. Т. 25, № 1. С. 61–73. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73>.
7. Амосов П. В., Бакланов А. А. Разработка модели аэротермодинамики атмосферы для исследования процессов пыления на хвостохранилищах с использованием программы COMSOL // Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 1. С. 25–44. doi:10.21443/1560-9278-2023-26-1-25-44.
8. Westphal D. L., Toon O. B., Carlson T. N. A Case-Study of Mobilization and Transport of Saharan Dust // J. Atmospheric Sciences. 1988. No. 45. P. 2145–2175.
9. Marticorena B., Bergametti G. Modeling the Atmospheric Dust Cycle. 1. Design of a Soil-Derived Dust Emission Scheme // J. Geophysical Research-Atmospheres. 1995. Vol. 100, no. D8. P. 16415–16430. <https://doi.org/10.1029/95JD00690>.
10. Zender C. S., Bian H. S., Newman D. Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology // J. Geophysical Research-Atmospheres. 2003. Vol. 108 (D14). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2002JD002775> (дата обращения: 23.01.2020).
11. 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.
12. Стриженов А. В. Управление экологической безопасностью намывных техногенных массивов ОАО «Апатит» в процессе их формирования: дис. ... канд. тех. наук. СПб., 2015. 184 с.

References

1. Amosov P. V., Baklanov A. A., Goryachev A. A., Konina O. T., Krasavtseva E. A., Makarov D. V., Masloboev V. A., Rigina O. Yu., Svetlov A. V. *Pylenie khvostov obogashcheniya apatit-nefelinovykh rud: ekologicheskaya problema i puti ee resheniya* [Dusting of apatite-nepheline ores enrichment tailings: an environmental problem and pathways to solve it]. Apatity, Kola Science Centre, 2023, 168 p. doi:10.37614/978.5.91137.505.8.
2. Shepherd G., Terradellas E., Baklanov A., Kang U., Sprigg W. A., Nickovic S., Bloorani 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. Global assessment of sand and dust

- storms. 2016. Available at: http://uneplive.unep.org/media/docs/assessments/global_assessment_of_sand_and_dust_storms.pdf (accessed 12.12.2016).
3. Nickovic S., Cuevas E., Baldasano J., Terradellas E., Nakazawa T., Baklanov A. 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, 2015, 37 p.
 4. Zhang Y., Baklanov A., Appel K. W., Ching J., Dias Freitas E., Pérez García-Pando C., Henze D. K., [...] Training Materials and Best Practices for Chemical Weather/Air Quality Forecasting. ETR-26. 2020, 576 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/346505334_Training_Materials_and_Best_Practices_for_Chemical_WeatherAir_Quality_Forecasting (accessed 28.03.2022).
 5. COMSOL. Available at: <https://www.comsol.ru/> (accessed 12.03.2022).
 6. Amosov P. V., Baklanov A. A., Makarov D. V., Masloboev V. A. Chislennoe modelirovanie zagryazneniya atmosfery v podkhodakh sluchajного выбора дискретных участков пыления i pointinterval'nogo raspredeleniya razmera pyli [Numerical modeling of atmospheric pollution in the approaches of random selection of discrete dusting sites and interval distribution of dust size]. *Vestnik of MSTU* [Bulletin of the Murmansk State Technical University], 2022, no. 25 (1), pp. 61–73. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73> (In Russ.).
 7. Amosov P. V., Baklanov A. A. Razrabotka modeli aerothermodynamiki atmosfery dlya issledovaniya protsessov pyleniya na khvostokhranilishcha s ispol'zovaniem programmy COMSOL [Development of an atmospheric aerothermodynamics model for the study of dusting processes at tailings dumps using the COMSOL program]. *Vestnik of MSTU* [Bulletin of the Murmansk State Technical University], 2023, no. 26 (1), pp. 25–44. doi:10.21443/1560-9278-2023-26-1-25-44 (In Russ.).
 8. 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, pp. 2145–2175.
 9. 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, pp. 16415–16430. <https://doi.org/10.1029/95JD00690>.
 10. 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, no. D14. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2002JD002775> (accessed 23.01.2020).
 11. Amosov P. V., Baklanov A. A. Rezul'taty proverki idei po sokrashcheniyu trudozatrata na vypolnenie chilennykh eksperimentov protsessov pyleniya [The results of testing the idea of reducing labor costs for performing numerical experiments of dusting processes]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh — MMTT* [Mathematical methods in engineering and technology — MMTT], 2020, Vol. 3, pp. 111–113. (In Russ.).
 12. Strizhenok A. V. *Upravlenie ekologicheskoy besopasnost'yu namyvnykh tekhnogennykh massivov OAO "Apatit" v protsesse ikh formirovaniya. Diss. kand. tekhn. nauk.* [Management of environmental safety of alluvial man-made massifs of JSC Apatit in the process of their formation. PhD (Engineering) diss.]. Saint Petersburg, 2015, 184 p.

Информация об авторе

П. В. Амосов — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

Information about the author

P. V. Amosov — PhD (Engineering), Leading Researcher

Статья поступила в редакцию 17.09.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2025; принята к публикации 29.05.2025.
The article was submitted 17.09.2024; approved after reviewing 15.03.2025; accepted for publication 29.05.2025.