

УДК 622.4:519.67

Численное моделирование загрязнения атмосферы в подходах случайного выбора дискретных участков пыления и поинтервального распределения размера пыли

П. В. Амосов*, А. А. Бакланов, Д. В. Макаров, В. А. Маслобоев

*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
30.01.2022;

получена
после доработки
18.02.2022

Ключевые слова:

хвостохранилище,
скорость ветра,
площадь пыления,
дискретность,
случайный выбор,
поинтервальность,
загрязнение атмосферы,
CFD-моделирование

Анализ загрязнения атмосферы при пылении хвостохранилища АНОФ-2 (Мурманская область, г. Апатиты) проведен с привлечением CFD-моделирования, выполненного с помощью программы Comsol. Для вычисления аэродинамических характеристик применялось приближение несжимаемой жидкости с привлечением стандартной ($k-\epsilon$)-модели турбулентности. Процесс распространения мелкодисперсной пыли промоделирован посредством численного решения конвективно-диффузионного уравнения переноса примеси с учетом скорости оседания. Численные эксперименты выполнены при вариации скорости ветрового потока 5–23 м/с и площади пыления от 2 до 10 га при случайном выборе из 20 дискретных участков. Получены распределения динамической скорости для конкретных участков пыления, поинтервальные и суммарные пространственные распределения пылевых загрязнений (частицы пыли диаметром 0–70 мкм с шагом 10 мкм). Отмечены особенности влияния на уровни загрязнения атмосферы конкретных районов г. Апатиты в зависимости от размещения пылящих участков по поверхности пляжа хвостохранилища. Проанализированы и обобщены до функциональных зависимостей расчетные уровни загрязнения атмосферы в центре г. Апатиты, осредненные по количеству сочетаний участков пыления. Обобщенная функциональная зависимость позволяет прогнозировать концентрацию пыли в г. Апатиты в зависимости от площади пыления случайным образом выбранных дискретных участков на поверхности хвостохранилища и скорости ветрового потока, а также определять критическую площадь пыления, при которой уровень загрязнения атмосферы достигает предельно допустимых концентраций в зависимости от скорости ветрового потока.

Для цитирования

Амосов П. В. и др. 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>.

Numerical modeling of atmospheric pollution in the approaches of random selection of discrete dusting sites and interval distribution of dust size

Pavel V. Amosov*, Alexander A. Baklanov, Dmitriy V. Makarov, Vladimir A. Masloboev

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

Article info

Received
30.01.2022;

received
in revised form
18.02.2022

Key words:

tailings dump,
wind velocity,
dusting area,
discreteness,
random selection,
interval, atmospheric
pollution,
CFD modeling

Abstract

The results of numerical simulation of atmospheric pollution in Apatity are presented with variations in the dusting area of discrete spatially spaced areas selected randomly and the wind flow velocity. CFD modeling in the volumetric formulation was performed using the COMSOL program. To calculate the aerodynamic characteristics, an incompressible fluid approximation was used using the standard ($k-\epsilon$) turbulence model. The process of fine dust propagation is modeled by numerical solution of the convective-diffusion impurity transfer equation taking into account the deposition rate. Numerical experiments (with a total number of more than 1,400) were carried out with a variation of the wind flow velocity from 5 to 23 m/s and a dusting area from 2 to 10 ha with a random selection of 20 discrete sites. Dynamic velocity distributions for specific areas of dusting, interval and total spatial distributions of dust pollution (dust particles with a diameter from 0 to 70 microns in increments of 10 microns) are obtained. The peculiarities of the influence on the levels of atmospheric pollution of specific areas of Apatity depending on the location of dusty areas on the surface of the beach of the tailings dump are noted. The calculated levels of atmospheric pollution in the center of Apatity averaged by the number of combinations of dusting sites are analyzed and generalized to functional dependencies. The calculated dependences of the dust concentration on the dusting area at a fixed wind speed are described by linear functions. The dependence of the dust concentration on the wind flow velocity at a fixed dusting area can be approximated by a power function. The generalized functional dependence makes it possible to predict the dust concentration in Apatity depending on the dusting area of randomly selected discrete areas on the surface of the tailings dump and the wind flow velocity. The obtained dependence permits to make a forecast of the critical dusting area at which the level of atmospheric pollution reaches the maximum permissible concentrations, depending on the speed of the wind flow.

For citation

Amosov, P. V. et al. 2022. Numerical modeling of atmospheric pollution in the approaches of random selection of discrete dusting sites and interval distribution of dust size. *Vestnik of MSTU*, 25(1), pp. 61–73. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73>.

Введение

Моделирование процессов пыления является относительно новым направлением научных исследований (Амосов и др., 2014; 2017; 2020; 2021; Amosov et al., 2020). Это направление в настоящее время весьма актуально, востребовано во многих регионах мира и в рамках программ ООН активно развивается для прогноза пыльных бурь (программа ВМО "Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System", SDS-WAS) (Sand and Dust..., 2015; Global Assessment..., 2016). В коллективной монографии 2020 г. "Training Materials and Best Practices for Chemical Weather/Air Quality Forecasting" вопросам пыльных бурь посвящена отдельная глава¹.

Анализ загрязнения атмосферы при пылении хвостохранилища АНОФ-2 (Мурманская область, г. Апатиты), в летнее время при сильном северо-западном ветре эпизодически доставляющего определенные неприятности жителям города, проводится с привлечением CFD-моделирования. По данным Мурманского УГМС, на стационарных постах контроля атмосферного воздуха в г. Апатиты за весенне-осенние периоды 2016–2018 гг. фиксировалось соответственно 14, 10 и 13 случаев загрязнения воздуха пылью выше уровня ПДК.

В исследованиях, выполненных сотрудниками ФИЦ КНЦ РАН на основе анализа опыта и подходов формализованного описания процессов пыления (Marticorena et al., 1995; Shao et al., 1993; Shannon, 2009; Ginoux et al., 2001; 2004; Westphal et al., 1988; Gillette et al., 1988; Zender et al., 2003; Семенов, 2011; Johnson, 2006), рассмотрены многие проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды при пылении хвостохранилища АНОФ-2, в частности:

1) показано влияние высоты пылящей поверхности хвостохранилища (подход сплошности площади пыления) на уровень загрязнения приземного слоя атмосферы пылью вниз по ветровому потоку при вариации скорости ветра (Амосов и др., 2014);

2) продемонстрирован эффект местоположения одинаковых по площади пылящих участков поверхности хвостохранилища (подход дискретности пылящих участков) при штормовом ветровом потоке на загрязнение атмосферы г. Апатиты (Амосов и др., 2017);

3) разработан и реализован методический подход к оценке уровня загрязнения атмосферы г. Апатиты при пылении хвостохранилища АНОФ-2 и планированию природоохранных мероприятий по закреплению хвостов и снижению пыления с учетом поинтервального подхода к размеру пыли при моделировании конвективно-диффузионного переноса загрязнений (Маслобоев и др., 2016; Амосов и др., 2018). При данном подходе учитывалось влияние двух определяющих уровень загрязнения атмосферы параметров: площади пыления и скорости ветра (Amosov et al., 2020).

Настоящее исследование, выполненное на базе метода численного моделирования, является завершением изысканий авторов по оценке загрязнения атмосферы с учетом дискретного расположения пылящих участков хвостохранилища АНОФ-2 (рис. 1); при этом приняты во внимание как вариация скорости ветрового потока, так и изменение площади пыления с учетом случайного выбора пылящих участков.

В отличие от работы (Амосов и др., 2021), в которой в указанных выше условиях изучался конвективно-диффузионный перенос пыли размером 35 мкм (подход срединного диаметра), в данном исследовании анализировалось загрязнение атмосферы при подходе поинтервального распределения пыли размером до 70 мкм с шагом 10 мкм (Amosov et al., 2020) и использовался тот же случайный выбор наборов пылящих участков по поверхности пляжа (Амосов и др., 2021).

Постановка задачи

Цель исследования – на примере хвостохранилища АНОФ-2 оценить уровни загрязнения атмосферы города в зависимости от скорости набегающего ветрового потока, площади пыления при случайном выборе наборов дискретно расположенных пылящих участков (рис. 1). Новым моментом по сравнению с предыдущими исследованиями является элемент случайности при выборе дискретных пылящих участков по поверхности пляжа в сочетании с подходом поинтервального распределения пыли по размеру.

В качестве базовой используется разработанная авторами компьютерная модель, представленная в работах (Амосов и др., 2014; 2017; 2020; 2021; Amosov et al., 2020; Маслобоев и др., 2014). Файл исходных данных, необходимых для создания геометрии моделируемой области в среде Comsol², подготовлен на базе карт Google Earth района "хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты" (15 000 × 7 000 м, шаг сетки 500–700 м). В качестве реперной высотной отметки принимается поверхность озера Имандра (126 м, основание модели). Помимо самого объекта пыления и г. Апатиты в модели учтены предгорья Хибин

¹ Training Materials and Best Practices for Chemical Weather/Air Quality Forecasting. ETR-26. 2020. 576 p.

² Интегрированная среда численного моделирования COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru/> (дата обращения 12.01.2014).

и некоторые возвышенности. Модель пылящей поверхности хвостохранилища представляет собой эллипс с вырезанным зеркалом водоема, который задан в форме прямоугольника. Границы г. Апатиты вдоль ветрового потока составляют 12 000–15 000 м, вдоль поперечного направления – 3 000–6 000 м. Геометрия модели соответствует максимальной проектной высоте хвостохранилища (200 м). Результаты анализа расчетных аэродинамических параметров модели и их объективности рассмотрены авторами в работах (Амосов и др., 2014; Маслобоев и др., 2014).

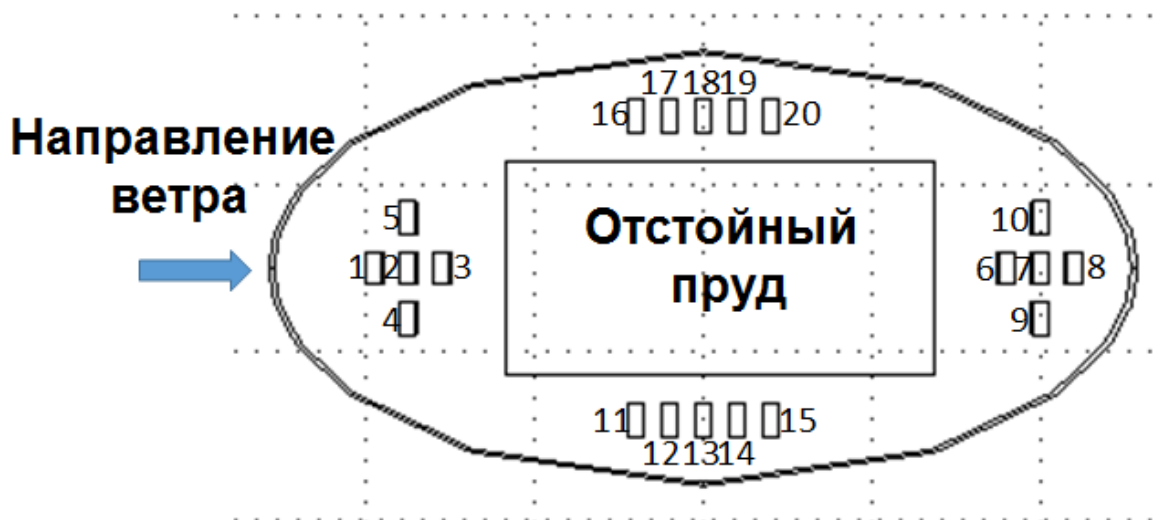


Рис. 1. Схематичное расположение на территории хвостохранилища дискретных участков пыления
 Fig. 1. Schematic arrangement of discrete dusting sites on the territory of the tailings dump

При численном моделировании приходится выбирать между желаемой точностью выполняемых расчетов и возможностями компьютерной техники. Следует отметить, что даже при использовании сетки крупнее, чем Normal, размер требуемой для выполнения расчетов оперативной памяти компьютера Asus K95VJ достигает почти 6 Гб. Дальнейшее увеличение разрешения модели приводит в процессе вычислений к операциям записи на диск и существенному увеличению времени счета, что с учетом неопределенностей по ряду параметров модели представляется нецелесообразным.

В ходе расчетов приняты следующие параметры варьирования: скорость ветрового потока – 5, 11, 17 и 23 м/с на высоте +10 м от основания модели; площади пыления – 2, 4, 6, 8 и 10 га.

Из 20 участков пыления (площадь каждого – 2 га) можно составить 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).

Уравнение числа сочетаний C_n^m из n (у нас 20) по m , которые отличаются только составом элементов, а порядок их следования не важен, имеет вид (Гмурман, 2003; Михайлов и др., 2013)

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

Практическая реализация такого огромного числа сочетаний (например, для площадей пыления 2, 4, 6, 8 и 10 га оно составит 20, 190, 1 140, 4 845 и 15 504 вариантов соответственно) в рамках созданных моделей чрезвычайно трудозатратна.

Поэтому для дальнейших исследований выбран объективно реализуемый путь, предполагающий 50 испытаний. Указанное количество испытаний построено с помощью разработанной авторской программы; задействовано несколько встроенных подпрограмм компилятора MS Fortran Power Station 4.0 [System_Clock(Count), Random_Seed(PUT = Seed), Random_Number(R)]; предполагается равномерное распределение случайных чисел как в диапазоне площади пыления (2–10 га), так и в нумерации участков пыления (1–20). В результате сформирована информация по количеству и номерам участков пыления (табл. 1, столбцы 2–6).

Как видно из данных табл. 1, наибольшее количество испытаний соответствует площади пыления 6 га; площади пыления по порядку уменьшения количества испытаний – 8, 4, 2 и 10 га.

Таблица 1. Расшифровка легенды рис. 3, *a–d* рассмотренных вариантов сочетаний участков пыления, номера участков пыления
 Table 1. Interpretation of the legend of Fig. 3, *a–d* of the considered combinations of dusting sites, numbers of dusting sites

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			

Методика исследований

Методика проведения исследований является аналогичной ранее используемой (Амосов и др., 2014; 2017; 2018; 2020; 2021; Amosov et al., 2020; Маслобоев и др., 2016). В качестве инструмента исследования применены трехмерные CFD-модели, разработанные в программном продукте Comsol. Дополнительно применялись вспомогательные авторские программы подготовки исходных данных и обработки результатов численных экспериментов (Амосов и др., 2021). В целом соблюдается такая 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 (Белов и др., 2001; Снегирев, 2009; Гарбарук и др., 2012);

– 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. 2) и, используя подход (Westphal et al., 1988), – величины вертикального потока массы для каждого интервала (7 интервалов со своим "весом") размера пыли (Стриженок, 2015). В качестве примера на рис. 2 представлены расчетные полные величины вертикального потока массы при скорости ветра 11 м/с для каждого участка пыления;

– 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 2. Значения динамической скорости U_* для участков пыления при вариации скорости ветра, м/с
 Table 2. Values of dynamic velocity U_* for dusting areas with wind velocity variation, m/s

Номер участка пыления	Скорость ветра, м/с				Номер участка пыления	Скорость ветра, м/с			
	5	11	17	23		5	11	17	23
1	0,4365	0,9606	1,4724	1,9923	11	0,5248	1,1552	1,7760	2,4031
2	0,4534	0,9979	1,5305	2,0711	12	0,5254	1,1568	1,7793	2,4078
3	0,4735	1,0422	1,6023	2,1681	13	0,5253	1,1566	1,7799	2,4087
4	0,4257	0,9367	1,4464	1,9570	14	0,5248	1,1556	1,7790	2,4076
5	0,4652	1,0237	1,5742	2,1300	15	0,5276	1,1618	1,7887	2,4207
6	0,5148	1,1339	1,7525	2,3721	16	0,5505	1,2120	1,8667	2,5261
7	0,5093	1,1220	1,7349	2,3484	17	0,5521	1,2155	1,8726	2,5342
8	0,4994	1,1001	1,7015	2,3032	18	0,5514	1,2141	1,8714	2,5327
9	0,4838	1,0659	1,6492	2,2325	19	0,5514	1,2144	1,8726	2,5343
10	0,5158	1,1360	1,7547	2,3751	20	0,5496	1,2106	1,8674	2,5274

Анализ данных табл. 2 свидетельствует о том, что с ростом скорости ветра значение динамической скорости также растет: максимальные значения динамической скорости – у группы участков с номерами 16–20; далее следует группа участков 11–15, потом 6–10 и замыкает порядок 1–5. Обусловлено такое расположение исключительно сложившейся аэродинамикой. Возможной причиной в различиях значений динамической скорости для пространственно разнесенных участков пыления является неоднородность поля скорости для этого района, связанная с наличием в модели севернее хвостохранилища возвышенности, которая является предгорьем Хибин. Графическим отражением указанных особенностей объединения по группам касательно динамической скорости служит гистограмма (рис. 2), на которой представлены вертикальные потоки массы участков пыления при скорости ветрового потока 11 м/с.

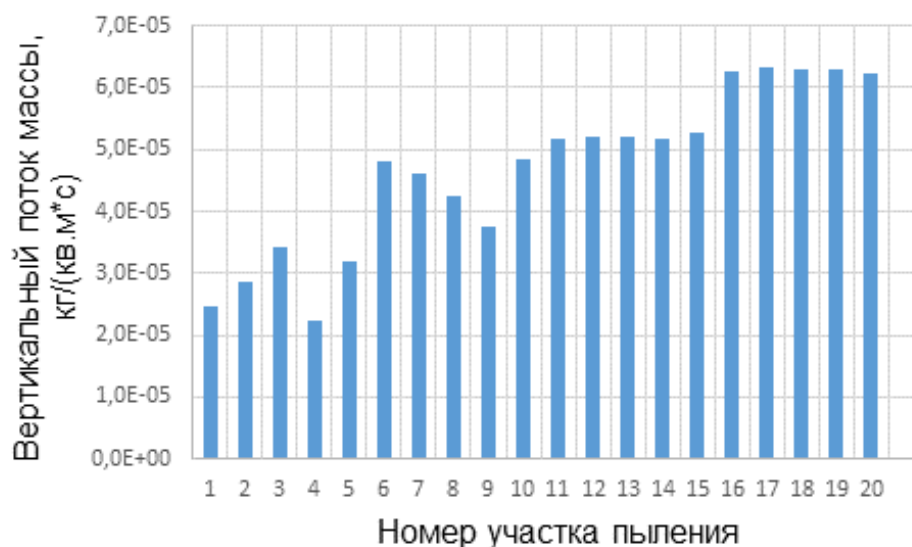


Рис. 2. Вертикальный поток массы на участках пыления при скорости ветра 11 м/с, кг/(м²·с)
 Fig. 2. Vertical mass flow in the dusting areas at a wind velocity of 11 m/s, kg/(m²·s)

В численных экспериментах при решении конвективно-диффузионного уравнения переноса примеси применяются значения коэффициентов турбулентной диффузии, которые получены посредством операции осреднения по объему моделируемой области коэффициента турбулентной вязкости с поправкой на плотность воздуха и число Прандтля – Шмидта (*Методы расчета ...*, 1984; *Бакланов*, 1988). Для скорости ветра 5, 11, 17 и 23 м/с принятые в расчетах коэффициенты турбулентной диффузии имеют значения 49, 108, 170 и 230 м²/с соответственно.

Гранулометрический состав отвальных хвостов с поверхности устоявшегося пляжа хвостохранилища АНОФ-2 представлен в соответствии с данными, приведенными в диссертационной работе (*Стриженок*, 2015). Обработка информации позволила получить количественные показатели по "весу" каждого моделируемого интервала размера частиц пыли. В табл. 3 для пыли крупностью до 70 мкм в диаметре с шагом 10 мкм приведены значения "веса" интервала, пороговой скорости ветровой эрозии (*Shannon*, 2009; *Ginoux et al.*, 2004) и скорости оседания разнокалиберной пыли, вычисленные в приближении Стокса и применяемые в расчетах конвективно-диффузионного переноса. Значения пороговой скорости ветровой эрозии вычислены по методике, изложенной в многократно цитируемой публикации (*Marticorena et al.*, 1995).

Таблица 3. Значения "веса" интервала, пороговой скорости ветровой эрозии и скорости оседания в зависимости от срединного диаметра частиц пыли
 Table 3. Values of the "weight" of the interval, the threshold velocity of wind erosion and the deposition rate depending on the median diameter of dust particles

Срединный диаметр (диапазон интервала), мкм	"Вес" интервала	Пороговая скорость u_*^r , м/с	Скорость оседания w_g , м/с
5 (0–10)	0,022	0,951	0,00195
15 (10–20)	0,083	0,420	0,0175
25 (20–30)	0,142	0,295	0,0487
35 (30–40)	0,194	0,243	0,0955
45 (40–50)	0,209	0,218	0,1580
55 (50–60)	0,189	0,206	0,2360
65 (60–70)	0,161	0,201	0,3290

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 1 400 расчетов.

Сопоставление значений пороговой скорости ветровой эрозии (табл. 3, столбец 3) и расчетной динамической скорости для участков пыления (табл. 2) свидетельствует о том, что:

1) 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;

2) при значении скорости ветра 5 м/с лишь мелкая пыль (1-й интервал) не переходит во взвешенное состояние (велики силы сцепления между мелкими частицами) (Marticorena et al., 1995) и не участвует в дальнейшем конвективно-диффузионном переносе. Отмеченный момент важен в ситуациях, когда в оценках вертикального потока массы применяются схемы DEAD (Marticorena et al., 1995; Zender et al., 2003) или COGART (Ginoux et al., 2001; 2004), в формализованном описании которых присутствует параметр пороговой скорости ветровой эрозии. При используемом авторами подходе (Westphal et al., 1988) 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 % (табл. 3, столбец 2).

В связи с изменениями расчетной сетки, обусловленными заданием дискретных участков пыления, при выполнении аэродинамических расчетов осуществлен подбор демпфирующих параметров в схемах аппроксимации конвективных слагаемых для обеспечения устойчивости расчетов в выбранном диапазоне скоростей, задаваемых на входной границе модели. В частности, устойчивость вычислений во 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 diffusion (для уравнений (k - ϵ)-модели на уровне 0,65–0,70).

Как и на этапе аэродинамических расчетов, при численных экспериментах переноса пыли выполнен подбор демпфирующих коэффициентов. Для достижения положительных значений концентрации пыли при решении конвективно-диффузионного уравнения использован решатель Direct UMFPACK и демпфирующий коэффициент Isotropic diffusion на уровне 0,65.

Анализ результатов расчетов загрязнения атмосферы

Для лучшего понимания анализа результатов расчетов напомним принятую в компьютерной модели схему расположения участков пыления (рис. 1) (Амосов и др., 2017), а также приведем расшифровку легенды рис. 3, a – d рассмотренных вариантов сочетаний участков пыления (табл. 1, столбец 1).

Кроме того, целесообразно укрупнить области пыления следующим образом (Амосов и др., 2017): 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 рис. 3, a – d представлены пространственные распределения суммарной детальной и осредненной (по числу вариантов сочетаний) концентрации пыли на высоте +2 м от поверхности г. 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 отрицательной производной по пространству: в первом случае максимальное загрязнение атмосферы прогнозируется в районе ул. Северной; во втором случае – в районе Старые Апатиты³. 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. 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 "созревают" благоприятные для процесса пыления условия.

Анализ графиков, аналогичных представленным на рис. 3, a – d , для всех значений скорости ветра (5, 11, 17 и 23 м/с) в терминах легенды (табл. 1, столбец 1) позволяет сгруппировать варианты сочетаний в определенную систему. В табл. 4 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.

³Яндекс-карта г. Апатиты. URL: https://yandex.ru/maps/10894/apatity/?ll=33.396236%2C67.562114&utm_source=main_stripe_big&z=13.5 (дата обращения 16.02.2022).

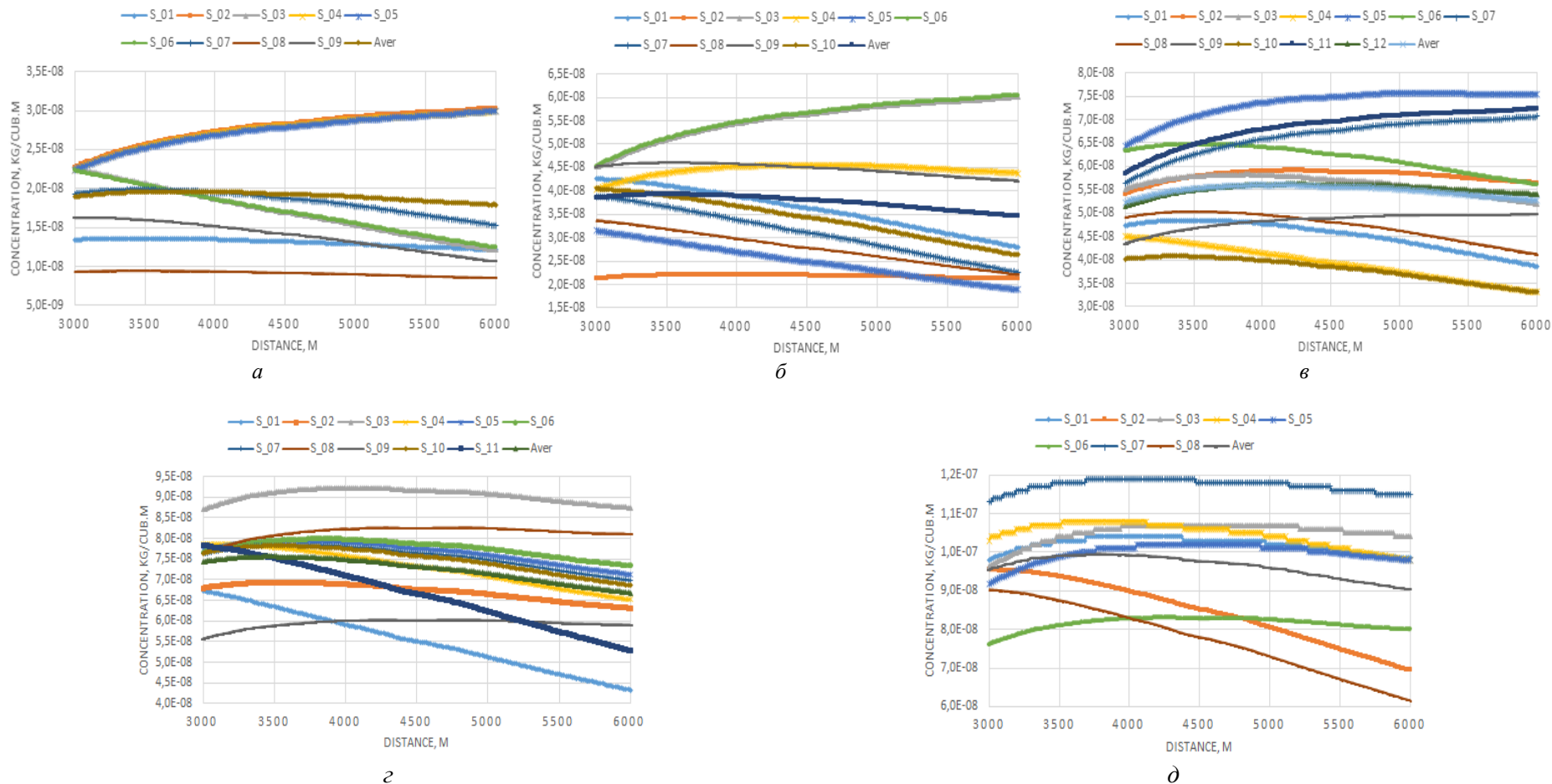


Рис. 3. Пространственное распределение суммарной детальной и осредненной концентрации пыли на высоте +2 м от поверхности г. Апатиты в поперечном к направлению ветрового потока измерения при скорости ветра 11 м/с и вариации площади пыления: *a* – 2 га; *б* – 4 га; *в* – 6 га; *г* – 8 га; *д* – 10 га
 Fig. 3. Spatial distribution of the total detailed and averaged (by the number of combinations) dust concentration at altitude +2 m from the surface of Apatity in a transverse measurement to the direction of the wind flow at a wind velocity of 11 m/s and variations in the dusting area: *a* – 2 ha; *б* – 4 ha; *в* – 6 ha; *г* – 8 ha; *д* – 10 ha

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 (Амосов и др., 2017) касательно укрупненных областей.

Таблица 4. Варианты сочетаний максимального и минимального загрязнения в целом для города, наиболее опасные для района Старые Апатиты и вариант, близкий к осредненному по числу испытаний
Table 4. Variants of combinations of maximum and minimum pollution in general for the city, the most dangerous for the area Starye Apatity and a variant close to the average number of tests

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

Минимальные и максимальные значения суммарной детальной концентрации пыли на высоте +2 м от поверхности г. Апатиты в поперечном к направлению ветрового потока измерения (значение продольной координаты 13 500 м) при вариации площади пыления и скорости ветра приведены в табл. 5. 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 г. Апатиты. При этом степенная зависимость концентрации от скорости ветра сохраняется (со своими коэффициентами).

Таблица 5. Интервалы суммарной детальной концентрации пыли на высоте +2 м от поверхности г. Апатиты в поперечном к направлению ветрового потока измерения при вариации площади пыления и скорости ветра, кг/м³
Table 5. Intervals of total detailed dust concentration at altitude +2 m from the surface of Apatity in transverse to the direction of the wind flow measurement with variations in dusting area and wind velocity, kg/m³

Скорость ветра, м/с	Площадь пыления, га				
	2	4	6	8	10
5	$1,17 \cdot 10^{-9} \div 2,92 \cdot 10^{-9}$	$1,81 \cdot 10^{-9} \div 5,82 \cdot 10^{-9}$	$3,18 \cdot 10^{-9} \div 7,26 \cdot 10^{-9}$	$4,17 \cdot 10^{-9} \div 8,77 \cdot 10^{-9}$	$6,27 \cdot 10^{-9} \div 11,30 \cdot 10^{-9}$
11	$0,86 \cdot 10^{-8} \div 3,03 \cdot 10^{-8}$	$1,89 \cdot 10^{-8} \div 6,05 \cdot 10^{-8}$	$3,31 \cdot 10^{-8} \div 7,57 \cdot 10^{-8}$	$4,33 \cdot 10^{-8} \div 9,23 \cdot 10^{-8}$	$6,16 \cdot 10^{-8} \div 10,80 \cdot 10^{-8}$
17	$0,30 \cdot 10^{-7} \div 1,11 \cdot 10^{-7}$	$0,68 \cdot 10^{-7} \div 2,19 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-7} \div 2,76 \cdot 10^{-7}$	$1,56 \cdot 10^{-7} \div 3,36 \cdot 10^{-7}$	$2,23 \cdot 10^{-7} \div 4,32 \cdot 10^{-7}$
23	$0,75 \cdot 10^{-7} \div 2,71 \cdot 10^{-7}$	$1,69 \cdot 10^{-7} \div 5,42 \cdot 10^{-7}$	$2,93 \cdot 10^{-7} \div 6,82 \cdot 10^{-7}$	$3,86 \cdot 10^{-7} \div 8,31 \cdot 10^{-7}$	$5,84 \cdot 10^{-7} \div 10,70 \cdot 10^{-7}$

С учетом того, что для неорганической пыли, содержащей двуокись кремния в интервале 20–70 %, в качестве максимальной разовой концентрации⁴ установлена величина 0,3 мг/м³ ($3 \cdot 10^{-7}$ кг/м³) (по максимальным значениям интервалов), 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 "тревоги", 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 ранее проведенном изыскании для срединного диаметра

⁴ 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.

(35 мкм) (Амосов и др., 2021). В качестве примера на рис. 4 приведены графики пространственных распределений суммарной осредненной (по числу вариантов сочетаний) концентрации пыли на высоте +2 м от поверхности г. 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 (Амосов и др., 2020)] подтвердить вывод о возможности при оценке загрязнения атмосферы использовать подход срединного диаметра частиц пыли. Такой подход позволяет существенно сократить трудозатраты при выполнении численных экспериментов и обработке результатов практически без снижения точности вычислений. Однако при этом теряется важная информация по мелкой пыли.

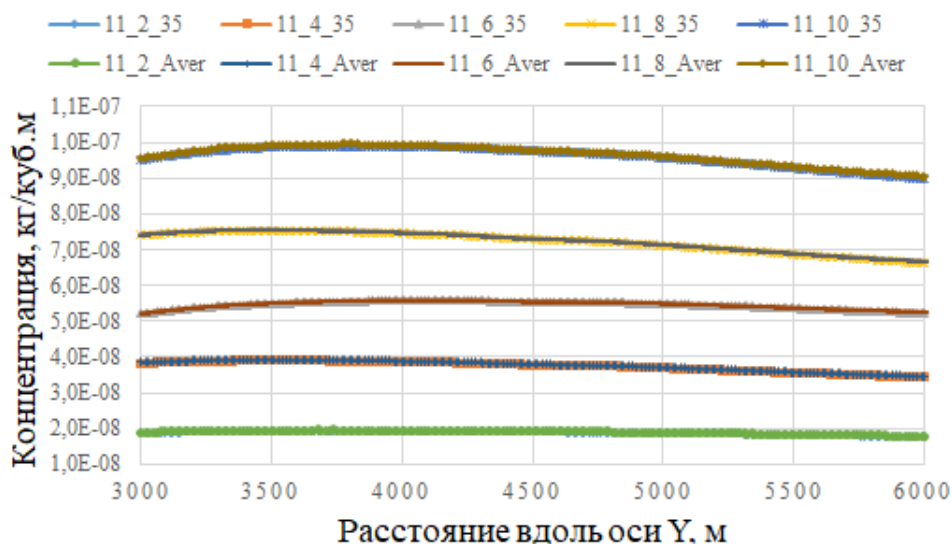


Рис. 4. Пространственные распределения суммарной осредненной концентрации пыли на высоте +2 м от поверхности г. Апатиты в поперечном к направлению ветрового потока измерении при скорости ветра 11 м/с и вариации площади пыления при подходах срединного диаметра пыли и поинтервального учета размера частиц
 Fig. 4. Spatial distributions of the total averaged (by the number of combinations) dust concentration at altitude +2 m from the surface of Apatity in the transverse to the direction of the wind flow measurement at a wind velocity of 11 m/s and variations in the dusting area in the approaches of the median diameter of the dust and the interval accounting of the particle size

По аналогии с подходом в работах (Amosov et al., 2020; Амосов и др., 2021) выполнен анализ зависимостей суммарной осредненной по числу вариантов сочетаний концентрации пыли в центре модели г. 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 г. 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 г. Апатиты от скорости ветрового потока и площади пыления позволяет оценить критическую площадь $S_{crit} \sim 40\,555 \cdot V^{-2,9874}$, при которой в рассмотренном диапазоне значений скорости ветра достигается уровень ПДК.

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.

Авторы рассматривают данную публикацию как завершающую в рамках разработанной компьютерной модели и применяемого на протяжении ряда лет методического подхода. В ближайшем будущем предстоит выполнить серьезную модернизацию CFD-модели, учитывающую эффекты плавучести и фоновой стратификации (Марчук, 1982; Пененко и др., 1985), 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 Махура А. Г.) предпринимаются попытки освоить современный подход к бесшовному моделированию окружающей среды с использованием Enviro-HIRLAM для экологических исследований (*Baklanov et al., 2017; Mahura et al., 2018*) в приложении к эпизодическим явлениям пыления на объектах горнодобывающей промышленности.

Заключение

На базе построенных компьютерных моделей (в трехмерной постановке) выполнено исследование процесса загрязнения атмосферы г. Апатиты при пылении хвостохранилища АНОФ-2 (максимальная проектная высота) при вариации следующих параметров: скорость ветрового потока – от 5 до 23 м/с (5, 11, 17 и 23 м/с); площади пыления – от 2 до 10 га (2, 4, 6, 8 и 10 га) по поверхности пляжа объекта.

При вариации площади пыления применен подход дискретного расположения пылящих участков и их случайного выбора (50 вариантов). Моделирование конвективно-диффузионного переноса загрязнений выполнено с учетом поинтервального (в диапазоне до 70 мкм с шагом 10 мкм) размера пыли.

Анализ прогнозных значений суммарных уровней концентрации пыли свидетельствует о том, что:

- наибольшее загрязнение атмосфера г. Апатиты в целом и его северная часть получает при пылении области хвостохранилища IV, ближайшей к предгорьям Хибин;
- для района Старые Апатиты опасность представляет и область хранилища III, противоположная ближайшей к предгорьям Хибин;
- низкие уровни загрязнения атмосферы в г. Апатиты прогнозируются при пылении наиболее удаленной от города области I;
- неконтролируемое увеличение площади пыления при скорости ветра 5 и 11 м/с приведет к превышению ПДК загрязнения воздуха.

Полученное обобщенное аналитическое выражение в форме произведения линейной и степенной зависимостей как функций двух параметров (площадь пыления – линейная зависимость и скорость ветра – степенная зависимость) позволяет прогнозировать суммарную концентрацию пыли в центре модели г. Апатиты; выполнен прогноз критической площади пыления, при которой уровень загрязнения атмосферы достигает ПДК при вариации скорости ветрового потока.

Полученные результаты не противоречат результатам ранее выполненных исследований.

В ходе исследования намечены пути совершенствования методического подхода по прогнозированию загрязнения атмосферы при эпизодических процессах пыления на техногенных объектах горнопромышленного комплекса.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР № 0226-2019-0047 "Разработка стратегии минимизации техногенных воздействий на окружающую среду отходов горно-металлургического комплекса" и поддержана грантом РФФИ 19-05-50065 Микромир "Комплексная оценка воздействия микрочастиц в выбросах горных и металлургических предприятий Мурманской области на экосистемы и состояние здоровья населения Арктики".

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- 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: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-10-23-502-509>.
- Амосов П. В., Бакланов А. А. Результаты проверки идеи по сокращению трудозатрат на выполнение численных экспериментов процессов пыления¹¹ // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020. Т. 3. С. 111–113.
- Амосов П. В., Бакланов А. А., Маслобоев В. А. Обоснование методического подхода к оценке интенсивности пыления на хвостохранилище // Вестник Кольского научного центра. 2018. № 1(10). С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228-2018-10-1-5-14>.
- Амосов П., Бакланов А., Ригина О. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилищ / LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 116 с.
- 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. 2021. № 5. С. 63–74. DOI: [10.21440/0536-1028-2021-5-63-74](https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-5-63-74).
- Бакланов А. А. Численное моделирование в рудничной аэрологии. Апатиты : КФ АН СССР, 1988. 200 с.

- Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений. СПб. : БГТУ, 2001. 108 с.
- Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.
- Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Высшая школа, 2003. 479 с.
- Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М. : Наука, 1982. 320 с.
- Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Мазухина С. И., Ригина О. Ю. [и др.]. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилища АНОФ-2 // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 376–384.
- Маслобоев В. А., Бакланов А. А., Амосов П. В. Результаты оценки интенсивности пыления хвостохранилищ // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19, № 1/1. С. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-1/1-13-19>.
- Методы расчета турбулентных течений / Дж. Ламли, Ж. Матье, Д. Жандель и др. М. : Мир, 1984. 464 с.
- Михайлов Е. В., Патронова Н. Н., Тепляков В. В. Теория вероятностей в примерах и задачах. Ч. 1. Комбинаторика. Случайные события и их вероятности. Архангельск : САФУ, 2013. 141 с.
- Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск : Наука : Сиб. отд-ние, 1985. 256 с.
- Семенов О. Е. Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы, 2011. 580 с.
- Снегирев А. Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособ. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 143 с.
- Стриженок А. В. Управление экологической безопасностью намывных техногенных массивов ОАО "Апатит" в процессе их формирования : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 184 с.
- Amosov P. V., Baklanov A. A., Makarov D. V., Masloboev V. A. Estimating air pollution levels by numerical simulation depending on wind flow speed and dust source area // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 5. С. 80–89 (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-80-89>.
- 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>.
- Gillette D. A., Passi R. Modeling dust emission caused by wind erosion // Journal of Geophysical Research. Atmospheres. 1988. Vol. 93, Iss. D11. P. 14233–14242. DOI: <https://doi.org/10.1029/JD093iD11p14233>.
- Ginoux P., Chin M., Tegen I., Prospero J. M. [et al.]. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model // Journal of Geophysical Research. Atmospheres. 2001. Vol. 106, Iss. D 17. P. 20255–20273. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000JD000053>.
- Ginoux P., Prospero J., 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. Vol. 19, Iss. 2. P. 113–128. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00114-2](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00114-2).
- 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. Fort Collins (Colorado), 2006. 151 p. URL: http://chem.atmos.colostate.edu/Thesis/Johnson_thesis_final.pdf.
- 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>.
- Martcorena 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, Iss. D8. P. 16415–16430. DOI: <https://doi.org/10.1029/95JD00690>.
- Shannon S. R. Modelling the atmospheric mineral dust cycle using a dynamic global vegetation model. Ph.D. Thesis. 2009. URL: <https://www.paleo.bristol.ac.uk/~ggsrs/website/thesis/thesis.pdf>.
- Shao Y., Raupach M. R., Findlater P. A. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind // Journal of Geophysical Research. Atmospheres. 1993. Vol. 98, Iss. D7. P. 12719–12726. DOI: <https://doi.org/10.1029/93JD00396>.
- Global assessment of sand and dust storms : United Nations environment programme / G. Shepherd, E. Terradellas, A. Baklanov [et al.]; UNEP, WMO, UNCCD. Nairobi, 2016. 139 p. URL: https://wesr.unep.org/redesign/media/docs/assessments/global_assessment_of_sand_and_dust_storms.pdf.
- 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. Vol. 45, Iss. 15. P. 2145–2175. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045<2145:ACSOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<2145:ACSOMA>2.0.CO;2).
- Sand and dust storm warning advisory and assessment system (SDS-WAS). Science and Implementation Plan 2015-2020 / Nickovic S., Cuevas E., Baldasano J., Terradellas E. [et al.]. WMO SDS-WAS, Geneva, Switzerland, 2015. 37 p.
- Zender C. S., Bian H., Newman D. Mineral dust entrainment and deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology // Journal of Geophysical Research. Atmospheres. 2003. Vol. 108, Iss. D14. DOI: <https://doi.org/10.1029/2002JD002775>.

References

- Amosov, P. V., Baklanov, A. A. 2017. The influence of geometric parameters of the dusting source on the assessment of atmospheric pollution. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, S23, pp. 502–509. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-10-23-502-509>. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Baklanov, A. A. 2020. Results of testing the idea of reducing labor costs for performing numerical experiments of dusting processes¹¹. *Mathematical Methods in Technics and Technologies MMTT*, 3, pp. 111–113. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Baklanov, A. A., Masloboev, V. A. 2018. Justification of the methodical approach to estimation of dust intensity at tailing dump. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra*, 1(10), pp. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228-2018-10-1-5-14>. (In Russ.)
- Amosov, P., Baklanov, A., Rigina, O. 2014. Numerical modeling of tailings dusting processes. LAP LAMBERT Academic Publishing. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Baklanov, A. A., Makarov, D. V., Masloboev, V. A. 2021. Forecast of atmospheric pollution at random selection of discrete dusty areas based on numerical modeling. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 5, pp. 63–74. DOI: [10.21440/0536-1028-2021-5-63-74](https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-5-63-74). (In Russ.)
- Baklanov, A. A. Numerical modeling in mine aerology. 1988. Apatity. (In Russ.)
- Belov, I. A., Isaev, S. A. 2001. Modeling of turbulent flows: A textbook. St. Petersburg. (In Russ.)
- Garbaruk, A. V., Strelets, M. H., Shur, M. L. 2012. Turbulence modeling in calculations of complex flows: A textbook. St. Petersburg. (In Russ.)
- Gmurman, V. E. 2003. Probability theory and mathematical statistics. Moscow. (In Russ.)
- Marchuk, G. I. 1982. Mathematical modeling in the problem of the environment. Moscow. (In Russ.)
- Masloboev, V. A., Baklanov, A. A., Mazukhina, S. I., Rigina, O. Yu. et al. 2014. Numerical modeling of dusting processes in ANOF-2 tailings impoundment. *Vestnik of MSTU*, 17(2), pp. 376–384. (In Russ.)
- Masloboev, V. A., Baklanov, A. A., Amosov, P. V. 2016. Results of evaluation of tailing dumps dust intensity. *Vestnik of MSTU*, 19(1/1), pp. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-1/1-13-19>. (In Russ.)
- Methods for calculating turbulent flows. 1984. Eds. V. Kollman et al. Moscow. (In Russ.)
- Mikhailov, E. V., Patronova, N. N., Teplyakov, V. V. 2013. Probability theory in examples and problems: Part 1. Combinatorics. Random events and their probabilities. Arkhangelsk. (In Russ.)
- Penenko, V. V., Aloyan, A. E. 1985. Models and methods for environmental protection tasks. Novosibirsk. (In Russ.)
- Semenov, O. E. 2011. Introduction to experimental meteorology and climatology of sandstorms. Almaty. (In Russ.)
- Snegirev, A. Yu. 2009. High-performance computing in technical physics. Numerical modeling of turbulent flows: A textbook. St. Petersburg. (In Russ.)
- Strizhenok, A. V. 2015. Environmental safety management of alluvial technogenic massifs of JSC "Apatit" in the process of their formation. Ph.D. Thesis. St. Petersburg. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Baklanov, A. A., Makarov, D. V., Masloboev, V. A. 2020. Estimating air pollution levels by numerical simulation depending on wind flow speed and dust source area. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 5, pp. 80–89. DOI: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-80-89>.
- Baklanov, A., Korsholm, U. S., Nuterman, R., Mahura, A. et al. 2017. Enviro-HIRLAM online integrated meteorology – chemistry modelling system: Strategy, methodology, developments and applications (v 7.2). *Geoscientific Model Development*, 10(8), pp. 2971–2999. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2971-2017>.
- Gillette, D. A., Passi, R. 1988. Modeling dust emission caused by wind erosion. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 93(D11), pp. 14233–14242. DOI: <https://doi.org/10.1029/JD093iD11p14233>.
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J. M. et al. 2001. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 106(D17), pp. 20255–20273. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000JD000053>.
- Ginoux, P., Prospero, J., Torres, O., Chin, M. 2004. Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: Correlation with North Atlantic Oscillation. *Journal of Environmental Modelling & Software*, 19(2), pp. 113–128. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00114-2](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00114-2).
- Johnson, K. C. 2006. 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. Fort Collins (Colorado). URL: http://chem.atmos.colostate.edu/Thesis/Johnson_thesis_final.pdf.
- Mahura, A., Gonzalez-Aparicio, I., Nuterman, R., Baklanov, A. 2018. Seasonal impact analysis on population due to continuous sulphur emissions from Severonikel smelters of the Kola Peninsula. *Geography, Environment, Sustainability*, 11(1), pp. 130–144. DOI: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-130-144>.
- Martcorena, B., Bergametti, G. 1995. Modeling the atmospheric dust cycle. 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 100(D8), pp. 16415–16430. DOI: <https://doi.org/10.1029/95JD00690>.
- Shannon, S. R. 2009. Modelling the atmospheric mineral dust cycle using a dynamic global vegetation model. Ph.D. Thesis. URL: <https://www.paleo.bristol.ac.uk/~ggsrs/website/thesis/thesis.pdf>.

- Shao, Y., Raupach, M. R., Findlater, P. A. 1993. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 98(D7), pp. 12719–12726. DOI: <https://doi.org/10.1029/93JD00396>.
- Global assessment of sand and dust storms : United Nations environment programme. 2016. G. Shepherd, E. Terradellas, A. Baklanov et al. UNEP, WMO, UNCCD. Nairobi. URL: https://wesr.unep.org/redesign/media/docs/assessments/global_assessment_of_sand_and_dust_storms.pdf.
- Westphal, D. L., Toon, O. B., Carlson, T. N. 1988. A case study of mobilization and transport of Saharan dust. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45(15), pp. 2145–2175. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045<2145:ACSOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<2145:ACSOMA>2.0.CO;2).
- Sand and dust storm warning advisory and assessment system (SDS-WAS). 2015. Science and Implementation Plan 2015–2020. Nickovic, S., Cuevas, E., Baldasano, J., Terradellas, E. et al. WMO SDS-WAS, Geneva, Switzerland.
- Zender, C. S., Bian, H., Newman, D. 2003. Mineral dust entrainment and deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 108(D14). DOI: <https://doi.org/10.1029/2002JD002775>.

Сведения об авторах

Амосов Павел Васильевич – Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Pavel V. Amosov – 14a Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher; e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Бакланов Александр Анатольевич – 7 bis, Avenue de la Paix, BP2300, CH-1211 Geneva 2, Switzerland; Всемирная метеорологическая организация, д-р физ.-мат. наук, профессор, науч. сотрудник; e-mail: aabaklanov@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>

Alexander A. Baklanov – 7 bis, Avenue de la Paix, BP2300, CH-1211 Geneva 2, Switzerland; World Meteorological Organization, Dr Sci. (Phys.&Math.), Professor, Science Officer; e-mail: aabaklanov@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>

Макаров Дмитрий Викторович – Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, д-р техн. наук; e-mail: mdv_2008@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

Dmitriy V. Makarov – 14a Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC RAS, Dr Sci (Engineering); e-mail: mdv_2008@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

Маслобоев Владимир Алексеевич – Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, д-р техн. наук; e-mail: v.masloboev@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1536-921x>

Vladimir A. Masloboev – 14a Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC RAS, Dr Sci. (Engineering); e-mail: v.masloboev@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1536-921x>