ГЕОЭКОЛОГИЯ, РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.4:519.67 DOI: 10.21440/0536-1028-2021-5-63-74

Прогноз загрязнения атмосферы при случайном выборе дискретных пылящих участков на базе численного моделирования

Амосов П. В.[1]*, Бакланов А. А.[2], Макаров Д. В.[1], Маслобоев В. А.[1]
[1] Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия
[2] Всемирная метеорологическая организация, г. Женева, Швейцария
e-mail: p.amosov@ksc.ru

Реферат

Цель работы. *Оценка методом численного моделирования уровней загрязнения атмосферы г. Апатиты в зависимости от дискретного расположения изменяющегося числа участков пыления, выбираемых случайным образом, и скорости ветрового потока.*

Методика. *Компьютерное моделирование аэродинамики и переноса пыли в трехмерной геометрии выполнено с помощью программы COMSOL. Для вычисления аэродинамических характеристик применялось приближение несжимаемой жидкости с привлечением стандартной (k–ε)-модели турбулентности. Интенсивность пыления задавалась как функция динамической скорости при сухом состоянии отвальных хвостов на поверхности пляжа. Процесс распространения пылевых загрязнений моделировался посредством численного решения конвективно-диффузионного уравнения переноса примеси с учетом скорости оседания. Численные эксперименты проводились при случайном выборе дискретных участков и вариации скорости ветра от 5 до 23 м/с и площади пыления от 2 до 10 га.*

Результаты и их анализ. *Получены пространственные распределения аэродинамических характеристик модели и распределения пылевых загрязнений (частицы пыли диаметром 35 мкм). Наибольшему загрязнению подвержена атмосфера района Старые Апатиты. Проанализированы и обобщены до функциональных зависимостей расчетные уровни загрязнения атмосферы в центре г. Апатиты. Приняты во внимание диапазоны значений варьируемых параметров модели с учетом осреднения по количеству испытаний для конкретной площади пыления. Расчетные зависимости концентрации пыли от площади пыления при фиксированной скорости ветра в центре г. Апатиты описываются линейными функциями. Зависимость концентрации пыли от скорости ветрового потока при фиксированной площади пыления может быть аппроксимирована степенной функцией.*

Выводы и область применения. *Обобщенная функциональная зависимость позволяет прогнозировать концентрацию пыли в г. Апатиты в зависимости от площади пыления случайным образом выбранных дискретных участков хвостохранилища и скорости ветрового потока. Полученная зависимость позволяет сделать прогноз критической площади пыления, при которой уровень загрязнения атмосферы достигает предельно допустимых концентраций.*

Ключевые слова: *хвостохранилище; скорость ветра; площадь пыления; дискретность; случайный выбор; загрязнение атмосферы; численное моделирование.*

Работа выполнена в рамках темы НИР № 0226-2019-0047 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».

Введение. Моделирование процессов пыления – актуальное направление научных исследований, востребованное во многих регионах мира. В частности, в настоящее время в рамках программы Всемирной метеорологической организа-

ции «Sand and dust storm warning advisory and assessment system» (SDS-WAS) указанное направление активно развивается для прогноза пыльных бурь [1, 2].

Объектом исследования является особый вид локальных бурь от техногенных источников на примере хвостохранилища АНОФ-2 (г. Апатиты, Мурманская обл.), которое в летнее время года при сильном северо-западном ветре существенно загрязняет атмосферу города. В ранее выполненных исследованиях, базирующихся на анализе опыта и применении подходов формализованного описания процессов пыления [3–12], сотрудниками Федерального исследовательского центра Кольского научного центра РАН (ФИЦ КНЦ РАН) показано влияние высоты пылящей поверхности хвостохранилища на уровень загрязнения приземного слоя атмосферы пылью вниз по ветровому потоку при вариации скорости ветра, а также продемонстрирован эффект местоположения одинаковых по площади пылящих участков поверхности хвостохранилища при штормовом ветровом потоке [13].

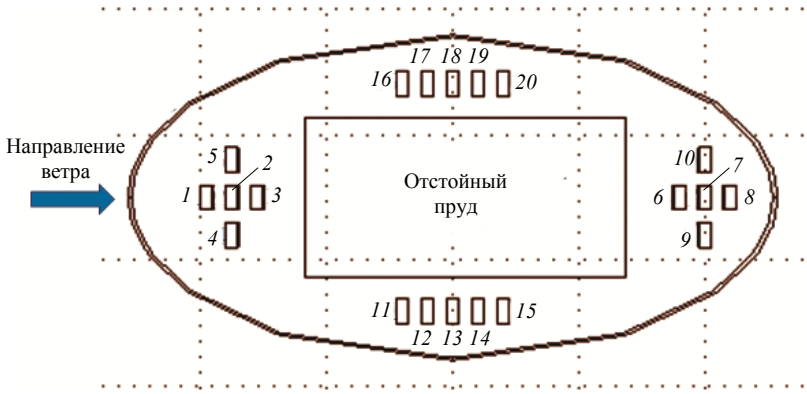

Рис. 1. Схематичное расположение на территории хвостохранилища участков *1–20* пылящей поверхности
Fig. 1. Location diagram of the dust sources areas *1–20* on the tailing storage

В 2020 г. в публикациях авторов изложен методический подход [14] к оценке уровней загрязнения атмосферы с учетом дискретного расположения пылящих участков хвостохранилища и вариации скорости ветрового потока и площади пыления. Продемонстрирован подход к оценке загрязнения атмосферы с использованием значений срединного диаметра частиц пыли, позволяющий существенно сократить трудозатраты на выполнение численных экспериментов практически без снижения точности вычислений [15].

Процесс пыления с поверхности пляжа в разные годы и разные месяцы происходит с разных пространственно разнесенных участков пляжа, на которых при определенных метеорологических параметрах и технологических операциях возникают 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.

Настоящее исследование, выполненное на базе численного моделирования, является продолжением изысканий авторов 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.

Постановка задачи. Цель исследования – на примере района хвостохранилища, ближайшего к г. Апатиты, оценить уровни загрязнения атмосферы города в зависимости от скорости набегающего ветрового потока и площади пыления при случайном выборе двадцати дискретно расположенных пылящих участков (рис. 1).

Описание используемой авторской компьютерной модели представлено в работах [13–15]. Инструмент исследования – программа COMSOL [16].

Таблица 1. Участки пыления, площадь пыления и количество испытаний
Table 1. Dusting areas, area of the dusting surface, and the number of tests

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

При численном моделировании приходится выбирать между желаемой точностью расчетов и возможностями компьютерной техники. Построение в компьютерной модели новых участков пыления приводит к новой геометрии в области хвостохранилища. Для выполнения расчетов необходимо сгенерировать расчетную сетку, что 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 неопределенности 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 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 $C_n^m = n!/[m!(n-m)!]$ [17, 18].

Практическая реализация такого огромного числа сочетаний (например, для площадей пыления 2, 4, 6, 8 и 10 га оно составит 20, 190, 1140, 4845 и 15 504 варианта соответственно) в рамках созданных моделей чрезвычайно трудозатратна.

Поэтому на данном этапе 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 (от 2 до 10 га), так и в нумерации участков пыления (от *1* до *20*). В результате сформирована информация по количеству и номерам участков пыления (табл. 1).

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

Таблица 2. Расчетные для каждого участка пыления значения полной величины ВПМ при вариации скорости ветра

Table 2. Calculated values of the total value of the vertical mass flux for each dusting area with a variation of wind velocity

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

В принятой компьютерной модели расчет конвективно-диффузионного переноса мелкодисперсной пыли выполняется для 7 интервалов крупности [13, 14]. Таким образом, для единственного значения скорости ветрового потока требуется выполнить 350 вычислений. Первоначально осуществляется подготовка исходных данных, а по завершению – обработка результатов расчетов. Перед выполнением расчетов переноса пыли через ручную обработку и процедуру вычисления по авторским программам определяются значения динамической скорости и вертикального потока массы для каждого участка пыления.

С учетом предшествующего опыта вычислений и обработки результатов [13, 14] представляется возможным ограничиться четырьмя значениями скорости ветра – 5, 11, 17 и 23 м/с, чтобы реализовать обозначенный объем вычислений и обработки результатов. При этом общее количество расчетов переноса пыли – 1400.

Чтобы сократить объем вычислений и процесс обработки результатов, предлагается воспользоваться опытом авторов [15] и выполнить исследование для срединного диаметра частиц пыли. Это позволит в 7 раз сократить объем вычис-

лений при незначительной потере точности расчетов. Единственный минус состоит в потере информации по загрязнению атмосферы мелкой пылью диаметром менее 10 мкм. Указанный недостаток предполагается устранить после завершения полного цикла исследований с интервальным распределением пыли по размерам.

Методика исследований. Методика проведения исследований является аналогичной использованной ранее [13–15]:

– 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–ε)-моделью турбулентности;

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

– для каждого участка пыления пересчитываются значения динамической скорости и величины вертикального потока массы (ВПМ) для срединного диаметра размера пыли [14] с использованием зависимости Westphal D. L. et al. [8]. В качестве примера расчетных данных в табл. 2 для каждого участка пыления приведены прогнозные значения величины ВПМ при вариации скорости ветра;

– рассчитываются стационарные поля распределения пыли в области моделирования при указанных вариациях параметров модели. Для определения пространственного распределения загрязнения используется уравнение конвективно-диффузионного переноса. В численных экспериментах применяются значения коэффициентов турбулентной диффузии, которые получены операцией осреднения по объему моделируемой области коэффициента турбулентной вязкости с поправкой на плотность воздуха и число Прандтля-Шмидта [13, 14]. Для скорости ветра 5, 11, 17 и 23 м/с принятые в расчетах коэффициенты турбулентной диффузии имеют значения 49, 108, 170 и 230 м^2/с соответственно.

Гранулометрический состав отвальных хвостов с поверхности устоявшегося пляжа хвостохранилища АНОФ-2 представлен в диссертационной работе Стриженка А. В. [19]. Для пыли срединного диаметра (35 мкм) в приближении Стокса скорость оседания равна 0,0955 м/с.

В связи с изменениями расчетной сетки, обусловленными заданием дискретных участков пыления (рис. 1), 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–ε)-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.

Анализ результатов численных экспериментов. Прежде чем анализировать пространственные распределения концентрации пыли полезно сравнить значения ВПМ по участкам пыления (табл. 2). 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 различий в значениях 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. 2, 3.

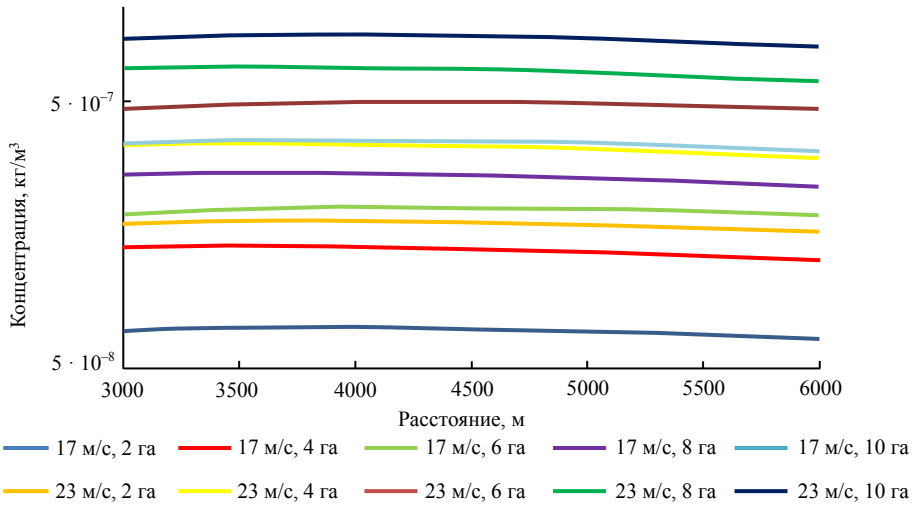

Рис. 2. Пространственное распределение осредненной по количеству испытаний концентрации пыли в поперечном к направлению ветрового потока измерении при вариации площади пылящей поверхности и скорости ветрового потока

Fig. 2. Spatial distribution of the dust concentration averaged by the number of tests in the measurement transverse to the direction of the wind flow with variations in the area of the dusting surface and the wind flow velocity

Например, на рис. 2 для скорости ветра 17 и 23 м/с приведены кривые пространственного распределения пыли (осредненные по числу испытаний для анализируемых площадей пыления) в поперечном к направлению ветрового потока измерении. С учетом того, что для неорганической пыли, содержащей двуокись кремния в интервале 20–70 %, в качестве максимальной разовой концентрации установлена величина 0,3 мг/м^3 или 3 · 10–7 кг/м^3 (*Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений: Гигиенические нормативы, с изменениями, утв. 31.05.2018 № 37. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2019. 55 с.*), можно сделать следующие выводы:

– район Старые Апатиты подвержен наибольшему загрязнению. При этом кривые загрязнения не имеют столь ярко выраженных максимумов для указанного района, как это прогнозировалось в работах [13, 14]. Причина сглаживания графиков – осреднение по числу испытаний;

– для скорости ветра 5 и 11 м/с превышений уровня ПДК не прогнозируется (по этой причине рисунок не приводится);

– для скорости ветра 17 м/с при площади пыления более 8 га прогнозируются превышения ПДК, что может негативно влиять не только на район Старые Апатиты, но и на весь город;

– для скорости ветра 23 м/с только минимальная площадь пыления 2 га не является потенциально опасной, при бóльших площадях пыления для всего города прогноз негативный.

Анализ расчетных значений осредненной по количеству испытаний концентрации пыли в центре г. Апатиты при вариации двух параметров моделирования (площади пыления и скорости ветрового потока) свидетельствует:

– присутствует линейная зависимость искомой функции от площади пыления;

– концентрация пыли от скорости ветра ближе к степенной функции (рис. 3).

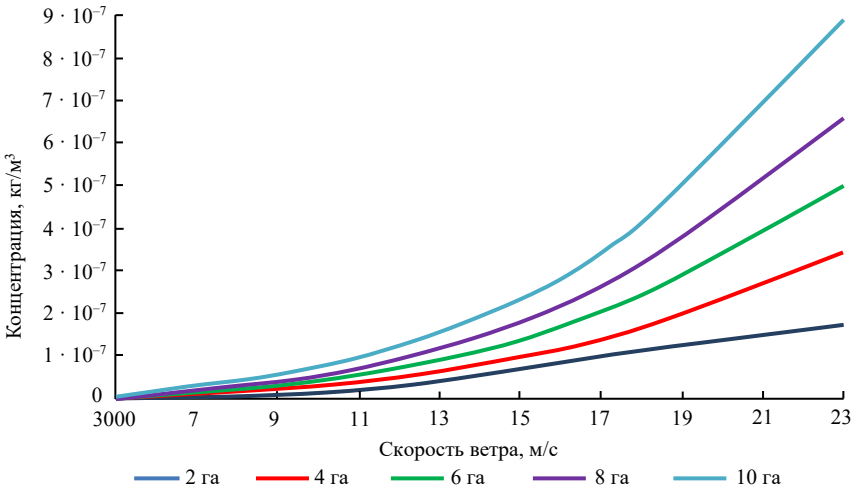

Рис. 3. Зависимость осредненной по количеству испытаний концентрации пыли в центре г. Апатиты от скорости ветрового потока при фиксированной площади пыления

Fig. 3. Dependence of the dust concentration averaged over the number of tests in the center of Apatity on the wind flow velocity at a fixed dusting area

Анализ зависимостей осредненной по количеству испытаний концентрации пыли в центре г. Апатиты от скорости ветрового потока при фиксированных значениях площади пыления свидетельствует (рис. 3), 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.

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

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

где S – площадь пыления, га.

Для второго коэффициента можно использовать среднее B = 3,0041 (максимальное отклонение значений коэффициента B от его среднего значения составляет 2,54 %). Уравнение обобщенной функции двух переменных, с помощью которой можно ориентировочно прогнозировать уровень осредненной по числу испытаний концентрации пыли в атмосфере в центре г. Апатиты:

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

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

Приведенная аналитическая зависимость осредненной по количеству испытаний концентрации пыли в центре г. Апатиты от скорости ветрового потока и площади пыления позволяет оценить критическую площадь, при которой в исследуемом диапазоне значений скорости ветра достигается уровень ПДК. На рис. 4 приведен график зависимости площади пыления от скорости ветра, который прекрасно описывается степенной функцией вида $S_{crit} = 34097V^{-2,937}$. 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.

Таблица 3. Значения коэффициентов A и B в функциях линейной аппроксимации осредненной по количеству испытаний концентрации пыли в центре г. Апатиты от скорости ветрового потока при фиксированной площади пыления
Table 3. Values of coefficients A and B in functions of linear approximation of the dust concentration averaged over the number of tests in the center of Apatity as a function of the wind flow velocity at a fixed dusting area

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

Представленный в статье материал можно рассматривать как изложение усовершенствованного методического подхода к оценке уровня загрязнения атмосферы г. Апатиты при пылении хвостохранилища АНОФ-2 и планированию 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.

Выводы. На базе построенных компьютерных моделей (в трехмерной постановке) выполнено исследование процесса загрязнения атмосферы г. Апатиты при пылении хвостохранилища АНОФ-2 (максимальная проектная высота). Помимо вариации скорости ветрового потока от 5 до 23 м/с в исследовании принято во внимание изменение площади пыления от 2 до 10 га по всей поверхности пляжа объекта. При вариации площади пыления применен подход дискретного расположения пылящих участков и их случайного выбора.

Для оценки вертикального потока массы использована зависимость Westphal D. L. et al., которая базируется на функциональной зависимости от динамической скорости в четвертой степени. Динамическая скорость вычисляется через осредненную скорость ветрового потока на высоте +10 м над конкретным участком пыления.

Анализ прогнозных значений уровней концентрации пыли срединного диаметра (35 мкм) в рассмотренном диапазоне параметров модели свидетельствует:

– наибольшему загрязнению подвержена атмосфера района Старые Апатиты, при этом вследствие операции осреднения по числу испытаний на графиках отсутствуют ярко выраженные экстремумы в этом районе;

– расчетные зависимости концентрации пыли от площади пыления 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.

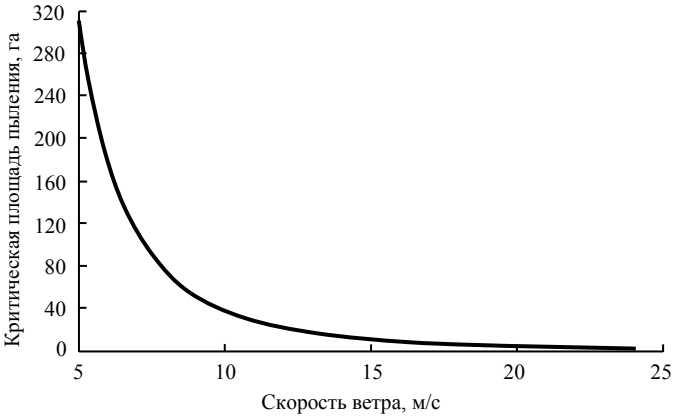

Рис. 4. Зависимость критической площади пыления от скорости ветрового потока
Fig. 4. Critical dusting areas as a function of wind flow velocity

Получено обобщенное аналитическое выражение, позволяющее прогнозировать концентрацию пыли как функцию двух параметров (площади пыления и скорости ветра), которые в значительной степени определяют уровень пылевого загрязнения атмосферы. Выполнен прогноз критической площади пыления, при которой уровень загрязнения атмосферы достигает ПДК при вариации скорости ветрового потока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nickovic S. [et al.]. Sand and dust storm warning advisory and assessment system (SDS-WAS). Science and implementation plan 2015–2020. Geneva; World Meteorological Organization, WMO WWRP 2015-5. 2015. 37 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.20089.57447

2. Shepherd G. [et al.]. Global assessment of sand and dust storms. Nairobi: UNEP, WMO, UNCCD, United nations environment programme. 2016. 139 p.

3. 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.

4. 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.

5. Shannon S. R. Modelling the atmospheric mineral dust cycle using a dynamic global vegetation model: a diss. … of Doctor of Philosophy. 2009. URL: https://www.paleo.bristol.ac.uk/~ggsrs/website/thesis/thesis.pdf (дата обращения: 24.03.2020).

6. 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 // Journal of Geophysical Research. 2001. Vol. 20. P. 20255–20273.

7. 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.

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. P. 2145–2175.

9. 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.

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. DOI:10.1029/2002JD002775. URL: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2002JD002775 (дата обращения: 23.01.2019).

11. Семенов О. Е. Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы: КазНИИЭК, 2011. 580 с.

12. 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. URL: http://chem.atmos.colostate.edu/Thesis/Johnson_thesis_final.pdf (дата обращения: 26.01.2019).

13. Амосов П. В., Бакланов А. А. Влияние геометрических параметров источника пыления на оценку загрязнения атмосферы // ГИАБ (научно-технический журнал). 2017. № S23. С. 502–509.

14. 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 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-80-89

15. Амосов П. В., Бакланов А. А. Результаты проверки идеи по сокращению трудозатрат на выполнение численных экспериментов процессов пыления // Математические методы в технике и технологиях. 2020. Т. 3 С. 111–113.

16. Интегрированная среда численного моделирования COMSOL. URL: https://www.comsol.ru/ (дата обращения: 12.01 2014).

17. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2004. 479 с.

18. 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.

19. Стриженок А. В. Управление экологической безопасностью намывных техногенных массивов ОАО «Апатит» в процессе их формирования: дисс. … канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2015. 184 с.

Поступила в редакцию 23 апреля 2021 года

Сведения об авторах:

Амосов Павел Васильевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. E-mail: p.amosov@ksc.ru; https://orcid.org/0000-0002-7725-6261

Бакланов Александр Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, научный сотрудник отдела науки и инноваций Всемирной метеорологической организации. E-mail: aabaklanov@yahoo.com; https://orcid.org/0000-0002-5396-8440

Макаров Дмитрий Викторович – доктор технических наук, директор Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. E-mail: mdv_2008@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-0097-6583

Маслобоев Владимир Алексеевич – доктор технических наук, научный руководитель Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. E-mail: v.masloboev@ksc.ru; https://orcid.org/0000-0002-1536-921x

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-5-63-74

Forecast of atmospheric pollution with a random selection of discrete dusty areas (based on numerical modeling)

Pavel V. Amosov[1], Aleksandr A. Baklanov[2], Dmitrii V. Makarov[1], Vladimir A. Masloboev[1]
[1] Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Russia.
[2] World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

Abstract

Research aim *is to estimate levels of atmospheric pollution in the city of Apatity by numerical modeling, depending on discrete locations of the changing number of randomly selected dusting areas, and the wind flow velocity.*

Methods of research. *Computer simulation of aerodynamics and dust transport in three-dimensional geometry is performed using the COMSOL program. To calculate aerodynamic properties, the approach of the incompressible fluid and standard (k–ε)-model of turbulence were used. The dusting intensity was set as a function of the dynamic velocity at the dry state of the dump areas on the beach surface. The spread of dust pollution has been modeled by numerically solving the convective-diffusion equation of impurity transfer taking into account the deposition rate. Numerical experiments were performed with a random selection of discrete areas and variations of wind flow velocity between 5 and 23 m/s and dusting area between 2 and 10 ha.*

Results. *The spatial distributions of the model's aerodynamic properties and the distributions of dust pollution (dust particles with a diameter of 35 μm) were obtained. The Starye Apatity area is most exposed to atmospheric pollution. The estimated levels of atmospheric pollution in the center of Apatity were analyzed and generalized to functional dependencies. The ranges of values of the variable parameters of the model are considered, taking into account averaging the number of tests for a specific dusting area.*

Calculated dependences of the dust concentration in the city center from the dusting area at a fixed of the wind flow velocity are described by linear functions. It is demonstrated that the dependence of the dust concentration on wind flow velocity at a fixed dusting source area value can be approximated by a power-law function.

Summary. *A generalized analytical formula has been derived it allows predicting dust concentrations in the city of Apatity depending on the dusting area of randomly selected discrete tailings storage areas and the wind velocity. The obtained dependence allows us to make a forecast of the critical dusting area at which the level of atmospheric pollution reaches the air pollution critical values.*

Keywords: *tailings storage; wind velocity; dusting area; discreteness; random selection; air pollution; numerical modeling.*

Acknowledgements. *The research has been carried out within R&D theme no. 0226-2019-0047 and supported by RFBR grant 19-05-50065 Microworld "Integrated assessment of the impact made by microparticles in emissions from Murmansk mining enterprises and steelworks on ecosystems and Arctic population health status".*

REFERENCES

1. Nickovic S. et al. *Sand and dust storm warning advisory and assessment system (SDS-WAS). Science and implementation plan 2015–2020*. Geneva; World Meteorological Organization, WMO WWRP 2015-5. 2015. 37 p. Available from: doi: 10.13140/RG.2.2.20089.57447

2. Shepherd G. et al. *Global assessment of sand and dust storms*. Nairobi: UNEP, WMO, UNCCD, United nations environment programme. 2016. 139 p.

3. Marticorena B., Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle. 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 1995; 100(D8): 16415–16430.

4. Shao Y., Raupach M. R. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 1993; 98(D7): 12719–12726.

5. Shannon S. R. *Modelling the atmospheric mineral dust cycle using a dynamic global vegetation model*. 2009. Available from: https://www.paleo.bristol.ac.uk/~ggsrs/website/thesis/thesis.pdf [Accessed 24 March 2020].

6. 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. *Journal of Geophysical Research*. 2001; 20: 20255–20273.

7. 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; 19: 113–128.

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; 45: 2145–2175.

9. Gillette D. A., Passi R. Modeling dust emission caused by wind erosion. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1988; 93(D11): 14233–14242.

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; 108(D14). Available from: doi: 10.1029/2002JD002775. Available from: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2002JD002775 [Accessed 23rd January 2019].

11. Semenov O. E. *Introduction to experimental meteorology and climatology of sandstorms*. Almaty; 2011. (In Russ.)

12. 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. Available from: http://chem.atmos.colostate.edu/Thesis/Johnson_thesis_final.pdf [Accessed 26th January 2019].

13. Amosov P. V., Baklanov A. A. The influence of the geometric parameters of the dust source on the assessment of atmospheric pollution. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; S23: 502–509. (In Russ.)

14. 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. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 5: 80–89. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2020-5-80-89 (In Russ.)

15. Amosov P.V., Baklanov A. A. Results of testing the idea of reducing labor costs for performing numerical experiments of dusting processes. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiiakh = Mathematical Methods in Technics and Technologies-MMTT*. 2020; 3: 111–113. (In Russ.)

16. *The COMSOL modeling environment*. Available from: https://www.comsol.ru/ [Accessed 12th January 2014]. (In Russ.)

17. Gmurman V. E. *Probability theory and mathematical statistics*. Moscow: Vysshaia shkola Publishing; 2004. (In Russ.)

18. Mikhailov E. V., Platonova N. N., Tepliakov V. V. *Probability theory in examples and problems: Part 1. Combinatorics. Random events and their probabilities*. Arkhangelsk: SAFU Publishing; 2013.

(In Russ.)
19. Strizhenok A. V. *Environmental safety management of alluvial anthropogenic materials at Apatit OJSC in the process of their formation: PhD in Eng. Thesis*. St. Petersburg; 2015. (In Russ.)

Received 23 April 2021

Information about authors:

Pavel V. Amosov – PhD (Engineering), leading researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC RAS. E-mail: p.amosov@ksc.ru; https://orcid.org/0000-0002-7725-6261
Aleksandr A. Baklanov – DSc (Physico-Mathematical Sciences), Professor, researcher, Department of Science and Innovations, World Meteorological Organization. E-mail: aabaklanov@yahoo.com; https://orcid.org/0000-0002-5396-8440
Dmitrii V. Makarov – DSc (Engineering), Director, Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC RAS. E-mail: mdv_2008@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-0097-6583
Vladimir A. Masloboev – DSc (Engineering), researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems of the KSC RAS. E-mail: v.masloboev@ksc.ru; https://orcid.org/0000-0002-1536-921x

Для цитирования: 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
For citation: Amosov P. V., Baklanov A. A., Makarov D. V., Masloboev V. A. Forecast of atmospheric pollution with a random selection of discrete dusty areas (based on numerical modeling). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 5: 63–74 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-5-63-74