

УДК 504.06

## Оценка накопления пыли от техногенного объекта хранения хвостов обогащения на территории города

П. В. Амосов\*, А. А. Бакланов

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

Информация о статье

Реферат

Поступила  
в редакцию  
30.06.2025;

принята  
к публикации  
21.01.2026

Ключевые слова:

пыление  
хвостов обогащения,  
пыль на автодорогах  
города

Результаты оценки осажденной на территории г. Апатиты пыли базируются на данных, полученных в ходе ранее выполненных численных экспериментов по прогнозу загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью (с учетом скорости осаждения) от техногенного объекта хранения хвостов обогащения. Модели разработаны в программе COMSOL для района "хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты". В ходе исследования реализован алгоритм вычисления осажденной пыли на горизонтальную поверхность и представлено описание современных подходов к оценке вторичного взмывания пыли на автодорогах городов. Поинтервальные и суммарные массы пыли, накопленные в течение 1 ч на территории г. Апатиты, рассчитаны с учетом вариации площади пыления 2–10 га (при случайном выборе пылящих участков на поверхности хвостохранилища) и скорости ветра 5–23 м/с. Для аналитического описания осредненной суммарной массы пыли, накопленной за 1 ч в условиях обозначенных диапазонов параметров модели, справедлива степенная функция скорости ветра и линейная зависимость от площади пыления. Выполнена оценка поверхностной плотности пыли  $PM_{10}$ , накопленной на автодорогах города Апатиты за 1 ч при пылении на объекте хранения хвостов обогащения, в условиях вариации скорости ветра и площади пыления. Приведенные оценки почасового накопления пыли на дорогах г. Апатиты необходимы для экологического мониторинга, разработки мер по снижению воздействия пыли на здоровье населения.

Для цитирования

Амосов П. В. и др. Оценка накопления пыли от техногенного объекта хранения хвостов обогащения на территории города. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 41–53. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-41-53>.

## Assessment of dust accumulation from a man-made enrichment tailings storage facility in the city

Pavel V. Amosov\*, Alexander A. Baklanov

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

Article info

Abstract

Received  
30.06.2025;

accepted  
21.01.2026

Key words:

dusting  
of enrichment tailings,  
dust on city roads

The results of the assessment of dust deposited on the territory of Apatity are based on data obtained during previously performed numerical experiments to predict atmospheric pollution with fine dust (taking into account the deposition rate) from a man-made enrichment tailings storage facility. The models are developed in the COMSOL program for the ANOF-2 – Apatity tailings storage area. In the course of the study, an algorithm for calculating deposited dust on a horizontal surface has been implemented and a description of modern approaches to assessing secondary dust generation on urban highways has been presented. The interval and total dust masses accumulated during 1 hour on the territory of Apatity are calculated taking into account variations in the dusting area of 2–10 ha (with a random selection of dusty areas on the surface of the tailings dump) and wind speeds of 5–23 m/s. For an analytical description of the average total mass of dust accumulated in 1 hour under the conditions of the indicated ranges of model parameters, a power function of wind speed and a linear dependence on the dusting area are valid. The surface density of  $PM_{10}$  dust accumulated on the motor roads of the town of Apatity for 1 hour during dusting at the enrichment tailings storage facility has been estimated under conditions of variation in wind speed and dusting area. The above estimates of the hourly accumulation of dust on the roads of Apatity are necessary for environmental monitoring and the development of measures to reduce the impact of dust on public health.

For citation

Amosov, P. V. et al. 2026. Assessment of dust accumulation from a man-made enrichment tailings storage facility in the city. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 41–53. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-41-53>.

## Введение

В процессе переноса пыли ветровым потоком с хвостохранилища АНОФ-2 мелкодисперсная пыль с различной скоростью осаждения попадает на территорию г. Апатиты. Пыль оказывается на крышах городских зданий (практически все крыши плоские), автомобильных дорогах, тротуарах, деревьях, газонах и пр. В солнечную погоду при ветровых порывах осаждаемая пыль, находящаяся в черте города, доставляет большие неудобства населению (в том числе и вторично загрязняя атмосферу) до той поры, пока городские коммунальные службы не выполнят уборку пыли на дорогах и тротуарах. Дороги и тротуары упомянуты здесь потому, что пыль на них является самой близкой к человеку и ее взметывание происходит не только под действием ветрового потока, но и при движении транспорта. Определенный вклад во вторичное загрязнение городской атмосферы вносит пыль, осаждаемая на крышах зданий: интенсивность пыления на высоте 15 м (высоте пятиэтажного дома) будет выше, чем у основания зданий.

Предыдущие исследования авторов, имеющие отношение к вопросам пыления на техногенном объекте хранения хвостов обогащения АНОФ-2 и переноса мелкодисперсной пыли вниз по ветровому потоку, касались исключительно загрязнения атмосферы. Наиболее полная информация по данной теме представлена в коллективной монографии (Амосов и др., 2023, гл. 3).

На базе ранее выполненных исследований (Амосов и др., 2023) и текущих изысканий можно приступить к оценке накопления пыли на горизонтальной поверхности – территории г. Апатиты – и проследить процессы пылевыведения при движении транспорта и загрязнения городской атмосферы.

Анализ случаев превышения ПДК пыли в воздухе г. Апатиты (Амосов и др., 2023, с. 26) с сопутствующими им метеорологическими условиями (скорость и направление ветра) далеко не всегда обнаруживает четкую корреляцию с поступлением пыли с хвостохранилища. Представляется, что в ряде случаев именно вторичное загрязнение атмосферы пылью, взметнувшейся при ветровых порывах и проезде автотранспорта с ранее загрязненных поверхностей, является определяющим фактором превышения ПДК пыли.

Таким образом, целью исследования является оценка: 1) скорости накопления поинтервальной и суммарной пыли с техногенного объекта хранения хвостов обогащения, которая в процессе осаждения накапливается на территории г. Апатиты; 2) эффекта наличия мелкодисперсной пыли на автомобильных дорогах города в плане объема предстоящей уборки для коммунальных служб, а также дополнительной величины удельного пылевыведения при движении автотранспорта.

## Материалы и методы

### Базовая информация по предыдущим исследованиям

В предыдущих исследованиях использовалась CFD-модель, созданная авторами в программе COMSOL<sup>1</sup>; значения ее главных параметров:

1) геометрия модели 3-мерная (Амосов и др., 2023, с. 90, рис. 3.12):

– размеры области моделирования 15 000 × 7 000 × 500 м;

– учет объектов пыления (высота хвостохранилища над плоскостью основания модели 74 м, что соответствует проектной высоте хвостохранилища АНОФ-2 на уровне 200 м), территории г. Апатиты (площадь 9 км<sup>2</sup>), ближайших возвышенностей (включая предгорья Хибин), которые при доминировании северо-западного ветра вносят некоторые изменения в структуру скоростного поля;

2) математический аппарат модели (Амосов и др., 2023, с. 92):

– расчет аэродинамических параметров в приближении несжимаемой жидкости с привлечением (к-ε)-модели турбулентности (нейтральное состояние атмосферы); применение уравнения конвективно-турбулентного переноса примеси с учетом скорости осаждения;

– анализ 7 интервалов крупности хвостов обогащения с шагом 10 мкм со своими "весами" (Амосов и др., 2023, с. 111, табл. 3.9); учет размера частиц до 70 мкм является вполне приемлемым для моделирования, основанного на подходе Эйлера-Эйлера (Shao, 2008; Lo Giudice et al., 2019), который использован авторами;

3) остальные параметры моделирования:

– оценка интенсивности пыления для каждого дискретного участка пылящей поверхности (Амосов и др., 2023, с. 122, рис. 3.34) по зависимости, представленной в работе (Westphal et al., 1988);

– реализация авторского алгоритма случайного выбора дискретных участков на поверхности хвостохранилища при вариации площади пыления от 2 до 10 га с шагом 2 га.

Для каждого значения скорости ветра от 5 до 23 м/с с шагом 6 м/с проанализировано 50 сочетаний выбора участков пыления, что с учетом 7 интервалов размера пыли в целом составляет 1 400 ситуаций.

<sup>1</sup> COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru/> (дата обращения: 12.05.2022).

#### Алгоритм вычисления осажженной пыли на горизонтальной поверхности

Для вычисления массы песка, содержащего зерна крупностью  $r$ , на поверхности  $g$ . Апатиты использован описанный ниже подход.

Массовая скорость поступления песка (крупность зерен  $r$ ), кг/с, на поверхность вычисляется через интеграл:

$$\int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} w_{rg} C_r(x, y) dx dy,$$

где  $x_1, x_2$  – границы интегрирования вдоль оси  $X$ , м (12 000–15 000 м);  $y_1, y_2$  – границы интегрирования вдоль оси  $Y$ , м (3 000–6 000 м);  $w_{rg}$  – скорость осаждения песка, содержащего зерна крупностью  $r$ , оцененная по Стоксу (Амосов и др., 2023), м/с;  $C_r(x, y)$  – концентрация песка, содержащего зерна крупностью  $r$ , в атмосфере вблизи поверхности  $g$ . Апатиты, кг/м<sup>3</sup>.

Проверка размерности: (м/с)·(кг/м<sup>3</sup>)·м·м = кг/с.

Если вынести за знак интеграла скорость осаждения, то значение оставшегося интеграла в области указанных границ получаем через опцию программы COMSOL. Умножение на выбранное значение времени будет давать массу песка, относящегося к конкретному интервалу крупности, выпавшую за выбранный отрезок времени.

Предлагается использовать отрезок времени 1 ч (далее легко масштабировать) и, таким образом, получить почасовые массы пыли для конкретного интервала крупности, суммировав которые, можно определить общую почасовую массу пыли  $M_{1h}$ .

#### Подходы к оценке вторичного взметывания пыли на автодорогах

Специалисты в области экологии транспорта (Графкина и др., 2017; Beddows et al., 2021; Piscitello et al., 2021) отмечают важность нормирования и контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при эксплуатации транспорта, что является основным фактором воздействия на окружающую среду и население. Масштаб такого воздействия локализован преимущественно в пределах городских и промышленных территорий. Например, в диссертации (Графкина, 2008) приводятся цифры воздействия выбросов в атмосферный воздух: выброс локализован в пределах городских и промышленных территорий, занимающих около 2 % площади России, но именно на этой территории проживает более 60 % населения. В публикации (Азаров, 2011) подчеркивается, что с ростом интенсивности автотранспортных потоков в городах наиболее загрязненные территории перемещаются из промышленных зон в места компактного проживания населения.

Авторы обзора (Piscitello et al., 2021) отмечают, что для регулирования выбросов из различных источников и установления пределов, которые должны соблюдаться при эксплуатации транспортных средств, международными органами установлены пороговые значения коэффициента выбросов<sup>2</sup>. Европейский союз определил стандарты в отношении предельных выбросов выхлопных газов транспортных средств. Так, в 1992 г. введен стандарт ЕВРО-1 – 140 мг/(км·авто) для дизельных автомобилей<sup>3</sup>. Пороговое значение выбросов выхлопных газов как для дизельных, так и для бензиновых автомобилей постоянно снижается: ЕВРО-3 (2000 г.) – 50 мг/(км·авто); ЕВРО-5 (2009 г.) и подтверждено ЕВРО-6 (2014 г.) – 5 мг/(км·авто). Аналогичным образом, в США с 1991 г. устанавливаются национальные стандарты<sup>4</sup>. Строгие правила способствовали технологической модернизации систем контроля горения и очистки выхлопных газов, что привело к резкому снижению влияния выхлопных газов транспортных средств на уровень загрязнения.

Выбросы, не связанные с выхлопными газами транспортных средств, также представляют собой источник твердых частиц в городских условиях. Авторы работы (Piscitello et al., 2021) приводят графический материал (рис. 1), на основании которого можно утверждать, что доля выбросов твердых частиц (PM<sub>10</sub> и PM<sub>2,5</sub>), не связанных с выхлопными газами, в общем объеме загрязнений от дорожного движения сопоставима или даже превышает вклад выбросов выхлопных газов.

Российские специалисты (Графкина и др., 2017) отмечают, что в ходе анализа загрязнения атмосферного воздуха автотранспортными средствами (АТС) учитываются только выбросы, выделяемые при сгорании

<sup>2</sup> См.: European Community. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe // Official Journal of the European Union. 2008. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj/eng>; Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide : Global update 2005 : summary of risk assessment. World Health Organization, 2006 URL: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-SDE-PHE-OEH-06.02> (дата обращения: 25.04.2025).

<sup>3</sup> Williams M., Minjares R. A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards. 2016. URL: <https://bit.ly/3IZs05G> (дата обращения: 25.04.2025).

<sup>4</sup> US EPA. All EPA Emission Standards – Light-Duty Vehicles and Trucks and Motorcycles. United States Environmental Protection Agency. 2020. URL: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-emission-standards-light-duty-vehicles-and-trucks-and> (дата обращения: 25.04.2025).

топлива в силовых агрегатах (оксид углерода, оксиды азота (в пересчете на диоксид азота), углеводороды, сажа, диоксид серы, соединения свинца, формальдегид, бензпирен). Эксперты по экологической безопасности технических систем подчеркивают, что указанный подход к оценке воздействия АТС на окружающую среду не учитывает выбросы (пыление), возникающие при проезде АТС по дорожным покрытиям различных типов.

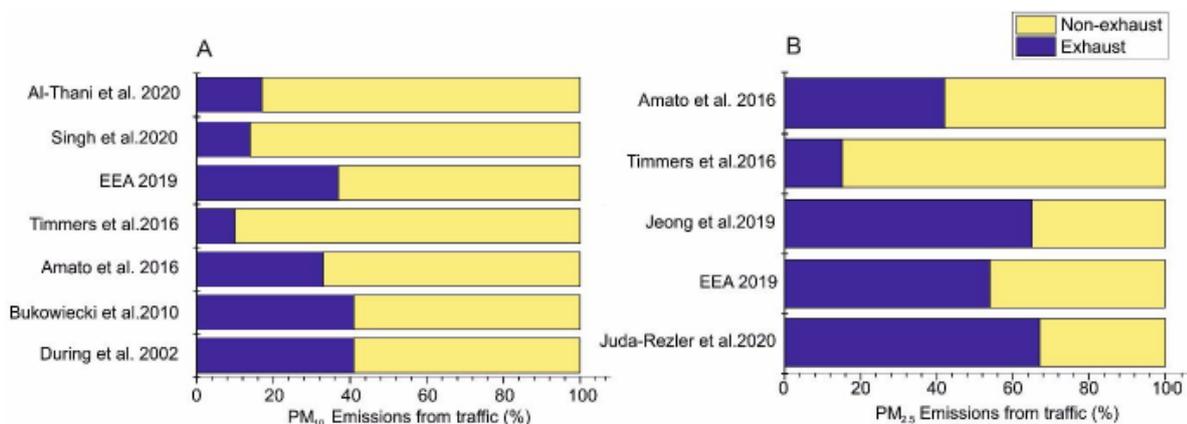


Рис. 1. Относительный вклад выбросов выхлопных газов и других веществ в общий объем выбросов PM<sub>10</sub> в результате дорожного движения (Piscitello et al., 2021)

Fig. 1. Relative contribution of exhaust gas emissions and other substances to total PM<sub>10</sub> emissions from road traffic (Piscitello et al., 2021)

В результате эксплуатации АТС в атмосферный воздух выбрасываются загрязняющие вещества: нефтепродукты; продукты износа шин, тормозных накладок и дорожного покрытия; сыпучие и пылящие грузы; антиобледенители дорожных покрытий. По данным, представленным в работе (Lozhkina et al., 2015), только в России ежегодно выбрасывается более 15 млн т указанных веществ.

Исследования по переносу пыли с объекта хранения хвостов обогащения вниз по ветровому потоку позволяют выйти на оценку дополнительного содержания мелкодисперсного песка на территории г. Апатиты, в том числе на автодорогах города после эпизодических пылевых бурь. В работе (Графкина и др., 2017) дается оценка дополнительного вклада в загрязнение атмосферы при пылении во время проезда АТС по дорожному покрытию, что обусловлено истиранием и отрывом и далее уносом твердых частиц, содержащихся на поверхности. Авторы указанной статьи подчеркивают, что источником выброса является установленный с применением единой государственной системы координат участок дороги, количественные и качественные показатели которого зависят от транспортной нагрузки и устанавливаются в зависимости от типа дорожного покрытия.

В публикации (Графкина и др., 2017) со ссылкой на рекомендации федерального закона "Об охране атмосферного воздуха"<sup>5</sup> приведена формула по расчету максимального разового выброса, г/с:

$$m_i = K_\gamma K_W \frac{(q_{i1} n_{i1} N_1 + q_{i2} n_{i2} N_2 + \dots + q_{in} n_{in} N_n)}{3600 T_{\text{сут}}}, \quad (1)$$

где  $K_\gamma$  – коэффициент, учитывающий влажность дорожного покрытия;  $K_W$  – коэффициент, учитывающий максимальную скорость ветра в исследуемом районе;  $q_{ni}$  – удельное пылевыделение при проезде АТС различного вида по дорожному покрытию  $i$ -го типа, г/км;  $n_{ni}$  – количество проезжаемых километров автомобильным транспортом вида  $n$  по дорожному покрытию  $i$ -го типа, км;  $N_n$  – количество единиц АТС вида  $n$ ;  $T_{\text{сут}}$  – количество часов эксплуатации АТС на рассматриваемом участке, ч/сут.

В формуле (1) содержится коэффициент удельного пылевыделения  $q_{ni}$ , который можно оценить по формуле, заимствованной из сборника коэффициентов выбросов (EF emission factor) загрязняющих веществ в атмосферу AP-42<sup>6</sup>, мг/(км·авто) (Beddows et al., 2021; Piscitello et al., 2021):

$$EF = k (sL)^{0,91} W^{1,02}. \quad (2)$$

<sup>5</sup> Об охране атмосферного воздуха (с изменениями на 13 июля 2015 г.) : федеральный закон № 96; принят Госдумой 02.04.1999 г. URL: <https://media.75.ru/gosins/documents/57247/ecd11100daf35582074f6dbf51a24100.pdf> (дата обращения: 25.04.2025).

<sup>6</sup> US EPA. AP-42, Fifth Edition, Volume I. Chapter 13: Miscellaneous Sources. Section 13.2.2. Paved roads. United States Environmental Protection Agency. 2014. URL: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-emission-standards-light-duty-vehicles-and-trucks-and> (дата обращения: 25.04.2025).

В формуле (2) для оценки количества взвешенной пыли, взмываемой транспортным средством, использованы параметры:  $sL$  – содержание наноса на дороге (дорожной пыли),  $\text{г}/\text{м}^2$ ;  $W$  – средний вес транспортных средств, перемещающихся по дороге, т;  $k$  – коэффициент крупности частиц, который зависит от выбранного диапазона,  $\text{мг}/(\text{км}\cdot\text{авто})$ . Мелкая пыль наиболее опасна для здоровья человека, и именно для нее приводятся значения коэффициентов: для  $\text{PM}_{2,5}$   $k = 150 \text{ мг}/(\text{км}\cdot\text{авто})$ ; для  $\text{PM}_{10}$   $k = 620 \text{ мг}/(\text{км}\cdot\text{авто})$ . Это уравнение справедливо для содержания дорожной пыли  $sL$  ( $\text{PM}_{10}$ ) в диапазоне  $0,03\text{--}400 \text{ г}/\text{м}^2$ , массы транспортного средства  $W$ , составляющей  $1,8\text{--}38$  т, и скорости транспортного средства до  $88 \text{ км}/\text{ч}$ . Вместе с тем авторы документов (*Beddows et al., 2021; Piscitello et al., 2021*) подчеркивают, что оценки взмывания нужно выполнять для пыли, размером частиц которой составляет не более  $75 \text{ мкм}$ , и одновременно отмечают, что в процессе движения автотранспорта происходит постепенное измельчение пыли, т. е. гранулометрический состав пыли имеет тенденцию меняться в сторону уменьшения размера частиц. Кроме того, в зависимости (2) предусмотрены понижающие коэффициенты, которые учитывают частоту выпадения осадков.

Содержание дорожной пыли  $sL$  является ключевым параметром. Неоднозначность результатов измерений содержания взвешенной дорожной пыли серьезным образом влияет на оценку коэффициентов выбросов, которые определяются с помощью прямых измерений (передвижная техника или отбор проб на обочинах дорог) или с помощью обратного моделирования (*Piscitello et al., 2021*).

В заключение обзора по этой проблеме отметим, что часто результаты экспериментов сильно варьируются, в том числе из-за включения в наборы данных различных видов АТС и типов дорог, но всегда подчеркивается ключевая роль содержания дорожной пыли.

Приведем модифицированные варианты формулы из сборника AP-42, указанные в работах:

1) (*Boulter et al., 2006*):

$$EF = c(sL)^{0,65} W^{1,5}, \quad (3)$$

где константа  $c$  установлена равной  $260 \text{ мг}/\text{м}^2$  для  $\text{PM}_{2,5}$  и  $560 \text{ мг}/\text{м}^2$  для  $\text{PM}_{10}$ ;

2) (*Amato et al., 2011*), предложенный на основе измерений (рис. 2), выполненных:

– в Цюрихе (Швейцария):

$$EF = 41,281 (sL)^{0,7722}, \quad (4)$$

– Барселоне (Испания):

$$EF = 52,949 (sL)^{0,8192}, \quad (5)$$

где  $sL$  – содержание дорожной пыли размером менее  $10 \text{ мкм}$  ( $\text{PM}_{10}$ ),  $\text{мкг}/\text{м}^2$ .

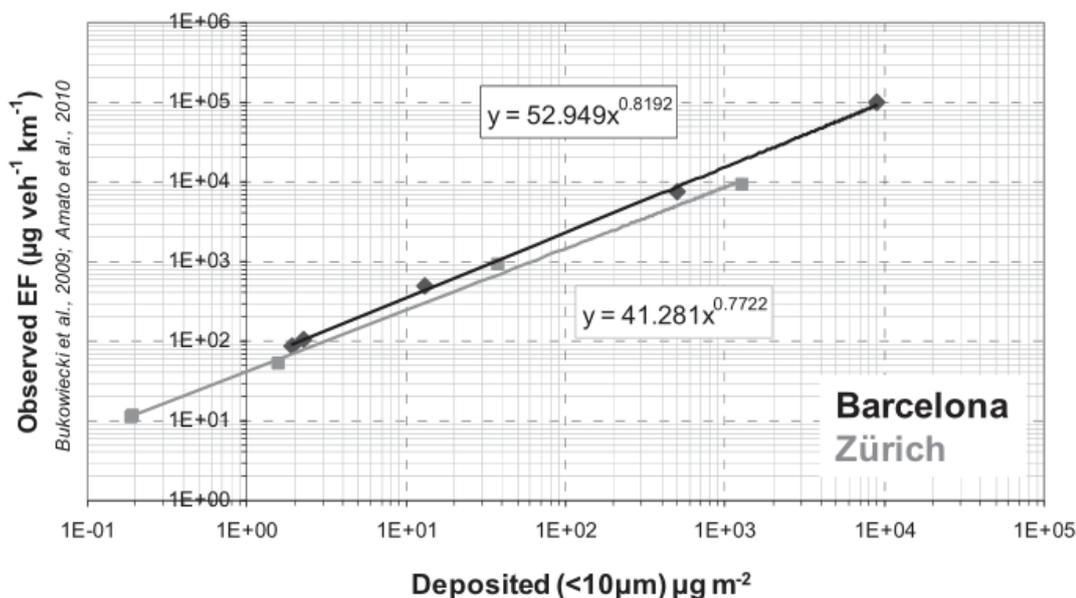


Рис. 2. Наблюдаемые коэффициенты выбросов в Барселоне и Цюрихе в зависимости от поверхностной плотности пыли (частицы размером менее  $10 \text{ мкм}$ ) (*Amato et al., 2011*)

Fig. 2. Observed emission coefficients in Barcelona and Zurich as a function of the surface density of dust less than  $10 \text{ microns}$  in size (*Amato et al., 2011*)

Авторы публикации (*Beddows et al., 2021*) приводят данные о пылевой нагрузке на дорожное покрытие (табл. 1), которые получены в ходе европейских исследований.

Данные весьма разнообразны. Следует отметить тот факт, что значения в табл. 1 приведены для фракции размером  $PM_{10}$ , а дорожная пыль, способная к взметыванию, содержит частицы размером менее 75 мкм, и есть тенденция к измельчению крупных частиц. Существуют разрозненные данные по распределению частиц дорожной пыли: частицы размером  $PM_{10}$  составляют около 10–50 % от фракций менее 75 мкм (*Lanzerstorfer, 2018; Lanzerstorfer et al., 2019; Padone et al., 2017*). Авторы публикации (*Beddows et al., 2021*) делают попытку использовать данные по содержанию всей пыли: значение  $sL_{All}$ , равное  $8 \text{ мг/м}^2$ , приблизительно соответствует концентрации пыли на поверхности  $PM_{10}$ , равной  $1\text{--}4 \text{ мг/м}^2$ , что соответствует многим значениям, указанным в табл. 1. Приведенная информация (на наш взгляд, без серьезного доказательства) позволяет сделать такой вывод:  $sL_{All} / (sLPM_{10}) \approx 8 \div 2$ , т. е. в среднем можно взять такое отношение равным 5. Представляется, что данный подход требует более строгого обоснования, но имеет и свои преимущества, позволяющие сделать консервативные оценки.

Таблица 1. Данные о запыленности европейских дорог с твердым покрытием\*,  $\text{мг } PM_{10}/\text{м}^2$  (*Beddows et al., 2021*)

Table 1. Data on the dust content of European paved roads\* [ $\text{mg } PM_{10}/\text{m}^2$ ] (*Beddows et al., 2021*)

Город	Тип дороги	Пылевая нагрузка (средненная)	Литература
Цюрих	Различный	0,2–1,3	(Amato et al., 2011)
Барселона	Различный	3,7–23,1	
Жирона	Различный	1,3–7,1	
Барселона II	Кольцевая дорога	12,8–73,7	
Утрехт	Район проживания, менее 50 ч после дождя	2,0	(Amato et al., 2012)
Барселона	Средний трафик, более 50 ч после дождя	3,0	
Кордоба	Средний трафик, более 26 ч после дождя	2,4–20,1	(Amato et al., 2013)
Севилья	Трафик ниже среднего, более 100 ч после дождя	1,9–11,2	
Залив Алгесира	Трафик ниже среднего, более 46 ч после дождя	1,9–3,0	
Малага	Средний трафик, более 242 ч после дождя	4,3–5,9	
Гранада	Трафик ниже среднего, более 246 ч после дождя	5,9–18,1	(Pant et al., 2015)
Бирмингем	Средний трафик	9,3	

Примечание. \*Исключаются образцы, собранные вблизи строительных площадок.

Таким образом, если первая цель исследований будет достигнута, то для достижения второй цели (цели исследования указаны во введении) необходимо разделить оцененную поинтервальную массу пыли, суммарную за определенный отрезок времени (наш интерес представляет  $PM_{10}$ , т. е. пыль интервала I), на площадь ее осаждения, отдельным образом выделив автодорожное покрытие.

## Анализ результатов оценок осаждения пыли

### Поинтервальные оценки

Расчетные значения поинтервальной массы пыли, накопленной в течение 1 ч при скорости ветра 5 м/с в процессе осаждения на участках размером 2 и 10 га, выбранных случайным образом и расположенных на территории г. Апатиты, представлены на рис. 3, а и б.

Отметим особенность представленных диаграмм. Максимальные скорости осаждения имеет пыль интервалов VI и VII, хотя доли этих интервалов в самом выбросе не являются максимальными. Сочетания участков пыления, которые расположены со стороны предгорий Хибин (участки 16–20) обеспечивают максимальные значения поинтервальной массы пыли за 1 ч.

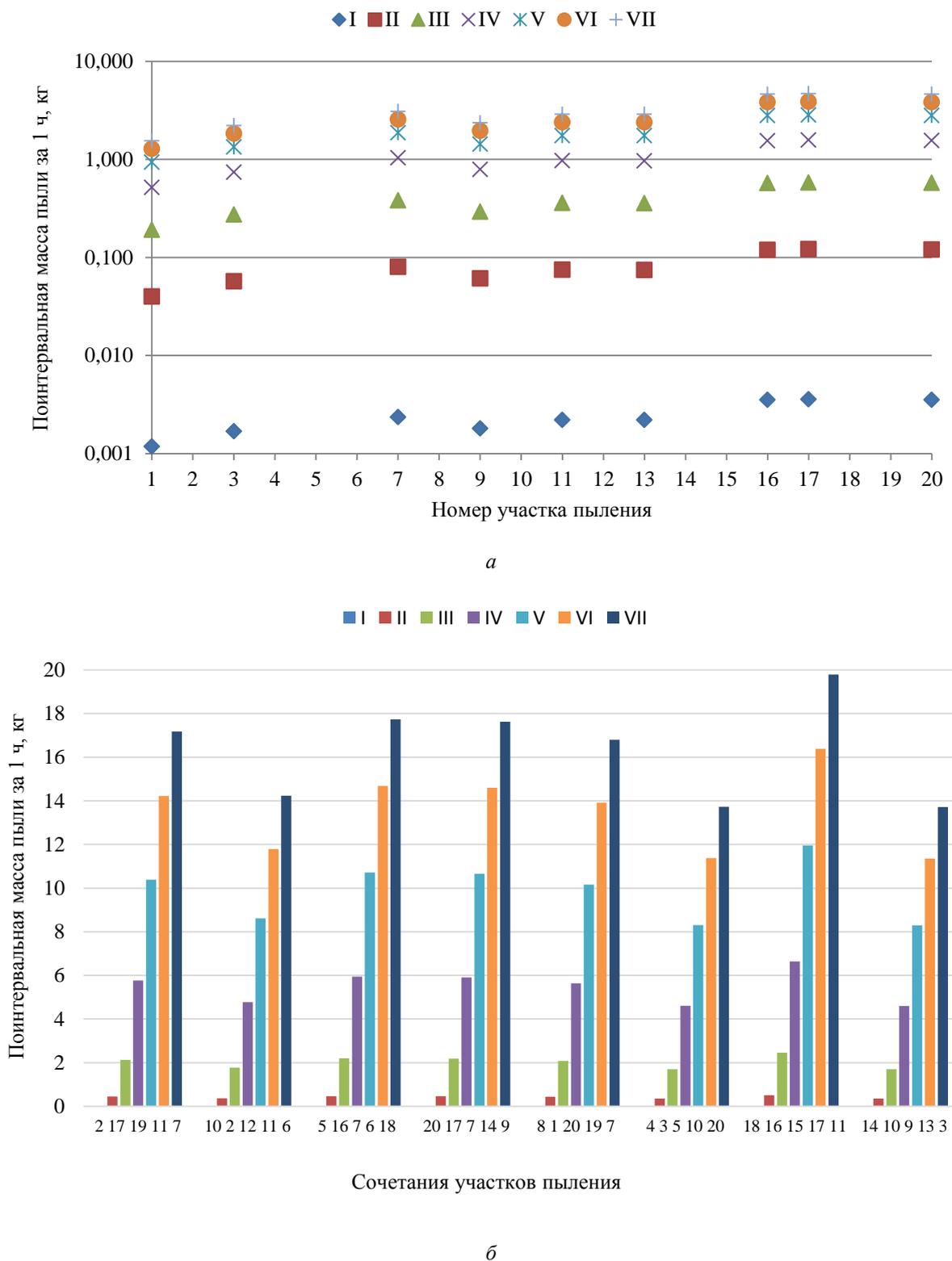


Рис. 3. Диаграммы поинтервальной массы пыли, накопленной в течение 1 ч на территории г. Апатиты при скорости ветра 5 м/с и случайном выборе участков для площади пыления: а – 2 га; б – 10 га  
 Fig. 3. Diagrams of the interval mass of dust accumulated in 1 hour on the territory of Apatity at a wind speed of 5 m/s and a random selection of sites for the dusting area: а – 2 ha; б – 10 ha

Общая масса пыли  $M_{1h}$  за 1 ч осадения

Визуализация почасового суммарного накопления пыли на территории г. Апатиты для площади пыления 2 и 10 га (при случайном выборе участков пыления) и вариации скорости ветра от 5 до 23 м/с представлена на рис. 4, а и б. Увеличение скорости ветра приводит к росту количества пыли на территории г. Апатиты. Существуют варианты сочетаний участков пыления, которые обеспечивают существенный прирост пыли на поверхности г. Апатиты. В первую очередь, такое характерно для сочетаний, в которых присутствуют участки 16–20 со стороны предгорий Хибин. С другой стороны, минимальные значения почасового накопления пыли имеют место в сочетаниях с участками пыления 1–5.

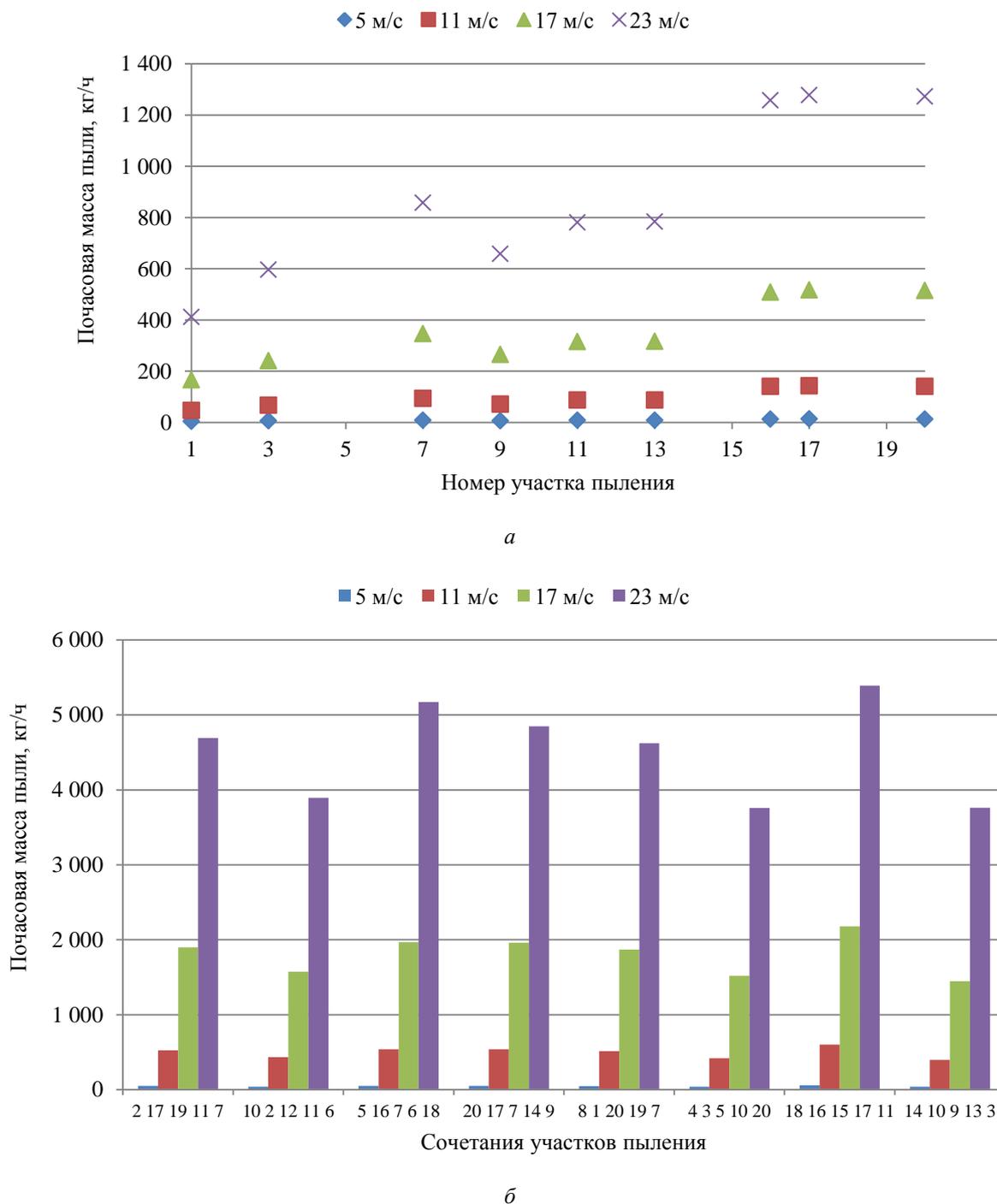


Рис. 4. Суммарное накопление пыли в течение 1 ч на территории г. Апатиты при скорости ветра 5–23 м/с и случайном выборе участков пыления: а – 2 га; б – 10 га  
 Fig. 4. The total accumulation of dust in 1 hour on the territory of Apatity under conditions of a random selection of dusting sites and wind speed variations from 5 to 23 m/s for the dusting area: а – 2 ha; б – 10 ha

Анализ поинтервального массового содержания пыли на поверхности г. Апатиты показал, что зависимость данного содержания от изменения скорости ветра крайне слабая (табл. 2).

Таблица 2. Поинтервальное массовое содержание пыли на поверхности г. Апатиты при вариации скорости ветра (% с точностью до сотых долей)

Table 2. Interval mass content of dust on the surface of Apatity with wind speed variation (% accurate to hundredths)

Скорость ветра, м/с	Пыль интервала						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
5	0,03	0,89	4,25	11,49	20,72	28,37	34,26
11	0,03	0,91	4,32	11,64	20,85	28,34	33,91
17	0,03	0,91	4,35	11,68	20,89	28,33	33,81
23	0,03	0,92	4,36	11,70	20,91	28,32	33,76

С точностью до сотых долей процента можно констатировать тот факт, что увеличение скорости ветра приводит к небольшому снижению содержания пыли интервалов VI и VII, а также незначительному увеличению пыли интервалов II–V. Основной вклад (почти 82 %) вносит пыль интервалов V–VII (размером более 40 мкм). Доля мелкой пыли (интервалы I и II, не более 20 мкм) составляет менее 1 %.

Предпринята попытка оценить зависимость почасовой массы пыли на территории г. Апатиты от скорости ветра при вариации площади пыления. Такую оценку можно сделать для отдельных сочетаний участков пыления, что достаточно трудозатратно. Поэтому предложенный подход применен для осредненных значений массы пыли рассмотренных сочетаний участков пыления при фиксированной скорости ветра. На рис. 5 представлена визуализация осредненных значений почасовой массы пыли  $M_{1h}$ , кг/ч, в зависимости от скорости ветра при вариации площади пыления. Оказалось, что для аналитического описания представленных зависимостей отлично применима степенная функция скорости ветра:

$$M_{1h} = AV^B,$$

где  $V$  – скорость ветра, м/с;  $A = 0,0390S - 0,0010$  – линейная функция площади пыления  $S$ , га;  $B = 2,9703$  (модуль максимального отклонения от среднего не превышает 0,4 %).

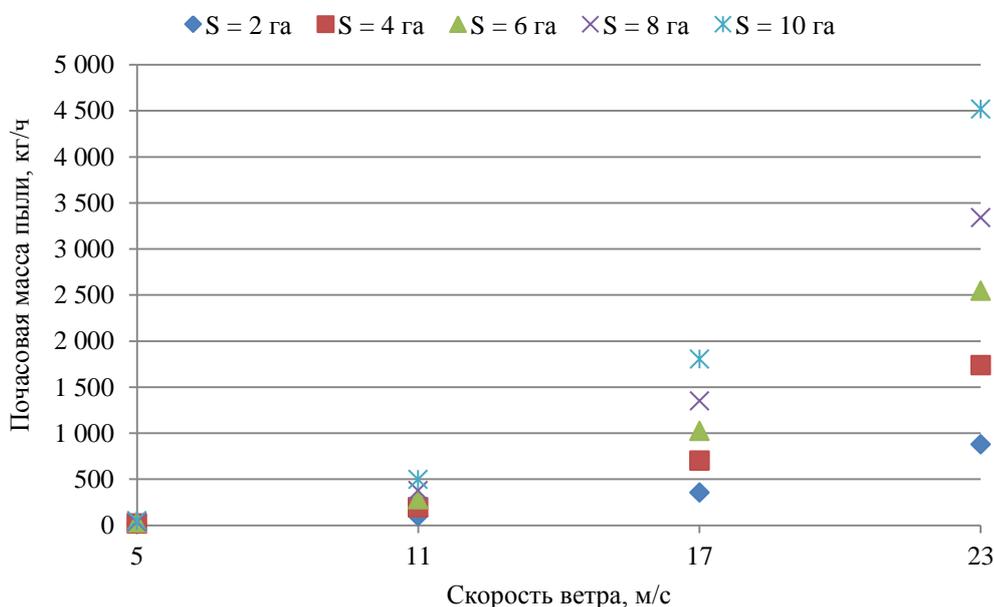


Рис. 5. Прогнозные значения осредненной почасовой массы пыли в зависимости от скорости ветра при вариации площади пыления  
 Fig. 5. Forecast values of the hourly average dust mass with variation of the dusting area depending on wind speed

Таким образом, оценку почасового накопления пыли  $M_{1h}$ , кг/ч, на территории г. Апатиты в указанных выше диапазонах варьирования параметров площади пыления и скорости ветра можно выполнять по обобщенной зависимости

$$M_{1h} = (0,0390S - 0,0010) V^{2,9703}.$$

Выполненные оценки показывают прогнозные диапазоны изменения общей массы пыли, накопленной в процессе ее осаждения в течение 1 ч, при увеличении площади пыления от 2 до 10 га и скорости ветра:

5 м/с – 10–50 кг;

11 м/с – 100–500 кг;

17 м/с – 350–1 800 кг;

23 м/с – 900–4 500 кг.

#### Оценка содержания осаждаемой разнокалиберной пыли на автодорогах города

Данные документа "Об утверждении местных нормативов..."<sup>7</sup> позволяют оценить площадь автомобильных дорог. В п. 5.1.7 указана плотность сети магистральных улиц, равная 2,2 км/км<sup>2</sup>. С учетом площади города 9 км<sup>2</sup> получаем длину автодорожного покрытия, составляющую почти 20 км. Ширина дорожного полотна варьируется от 5 до 14 м (въезды во дворы, межквартальные проезды, боковые улицы, центральные улицы, проспекты). Для упрощения оценок целесообразно использовать ширину 10 м (0,01 км). Таким образом, площадь дорожного покрытия составит 0,2 км<sup>2</sup>, т. е. доля площади дорог от площади города равна 0,02222.

Учитывая условие равномерного выпадения песка на территорию города<sup>8</sup>, в том числе и на дороги, вычленив из массы дорожного песка долю пыли интервала I (она очень слабо зависит от скорости ветра) и разделив полученную величину на площадь дорог, получим поверхностную плотность пыли (PM<sub>10</sub>). Необходимо также килограммы перевести в микрограммы (9 порядков!). Масса пыли без пыли интервала I будет "заботой" коммунальной служб и негативом для жителей города.

Результаты оценок по указанным алгоритмам представлены в табл. 3 и 4. Напомним, что все полученные значения соответствуют всего лишь одночасовому времени процесса пыления хвостов обогащения; данный вид пыления рассматривается как дополнительный вклад в процесс естественного поступления пыли на территорию города.

Данные табл. 3 и 4 получены линейными преобразованиями расчетных значений накопленной почасовой массы пыли, значит, будут следовать ранее указанным функциональным зависимостям (линейной и степенной) со своими коэффициентами. Анализ данных табл. 3 позволяет отметить, что уровни поверхностного пылевого загрязнения городов Апатиты, Барселоны и Цюриха находятся практически в одном интервале (рис. 2), т. е. представленные в работе (Amato et al., 2011) зависимости коэффициентов выбросов могут быть использованы и для расчетов выбросов в г. Апатиты.

Таблица 3. Осредненная поверхностная плотность пыли интервала I (PM<sub>10</sub>) на дорогах г. Апатиты с учетом вариации скорости ветра, массовой доли пыли интервала I и площади пыления  
Table 3. Average surface dust density of the I interval (PM<sub>10</sub>) on the roads of the town of Apatity with variations in wind speed, mass fraction of the I interval and dusting area, micrograms/m<sup>2</sup>

Скорость ветра, м/с	Доля пыли интервала I	Плотность пыли, мкг/м <sup>2</sup> , с учетом площади пыления				
		2 га	4 га	6 га	8 га	10 га
5	0,0262	27,4	53,9	78,9	104,2	139,2
11	0,0267	290,7	573,8	836,0	1 106,9	1 473,0
17	0,0269	1 061,1	2 098,2	3 056,1	4 036,2	5 387,2
23	0,0270	2 632,5	5 205,9	7 638,6	10 012,5	13 551,9

Таблица 4. Осредненная масса пыли интервалов II–VII на дорогах г. Апатиты с учетом вариации скорости ветра и площади пыления  
Table 4. The average mass of dust of II–VII intervals on the roads of the town of Apatity with variations in wind speed and dusting area, kg

Скорость ветра, м/с	Масса пыли, кг, с учетом площади пыления				
	2 га	4 га	6 га	8 га	10 га
5	0,20	0,40	0,59	0,77	1,03
11	2,12	4,18	6,10	8,07	10,74
17	7,68	15,18	22,11	29,20	38,98
23	18,97	37,52	55,05	72,16	97,67

<sup>7</sup> Об утверждении местных нормативов градостроительного проектирования муниципального образования г. Апатиты с подведомственной территорией Мурманской области. Решение Совета депутатов г. Апатиты от 26.12.2017 г. № 579. URL: <https://apatity.gov-murman.ru/city/grad/579.pdf> (дата обращения: 31.05.2025).

<sup>8</sup> На самом деле это не совсем так, и для поперечного к направлению ветра сечения в монографии (Амосов и др., 2023) продемонстрирован эффект выбора участков пыления на уровень загрязнения атмосферы вблизи поверхности.

Уборка пыли, мусора и благоустройство городских территорий – обязанность коммунальных служб. Необходимости решения проблемы пылевого загрязнения посвящены многие материалы сети Интернет: "Роликовый эффект: почему песок и пыль на дорогах провоцируют ДТП", "Пыль автодорог – опасное вещество для человека", "На каком этаже надо жить, чтобы меньше было дорожной пыли. Ученые рассказали и даже сделали замеры", "Борьба с пылью на дорогах"<sup>9</sup> и др.

### **Заключение**

Результаты оценки (поинтервальной и суммарной) осажденной на территории г. Апатиты пыли размером до 70 мкм базируются на данных, полученных в ходе ранее выполненных численных экспериментов по прогнозу загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью (с учетом скорости осаждения) от техногенного объекта хранения хвостов обогащения. Модели разработаны в программе COMSOL для района "хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты".

Поинтервальные и суммарные массы пыли, накопленные в течение 1 ч, на территории г. Апатиты рассчитаны с учетом вариации площади пыления 2–10 га (при случайном выборе пылящих участков на поверхности хвостохранилища) и скорости ветра 5–23 м/с. Для аналитического описания осредненной суммарной массы пыли, накопленной за 1 ч в условиях обозначенных диапазонов параметров модели, справедлива степенная функция скорости ветра и линейная зависимость от площади пыления.

В ходе исследования выполнена оценка поверхностной плотности пыли интервала I ( $PM_{10}$ ), накопленной на автодорогах города Апатиты в течение 1 ч при пылении на объекте хранения хвостов обогащения, в условиях вариации скорости ветра и площади пыления. Уровень почасового дополнительного поверхностного пылевого загрязнения мелкой пылью сопоставим с уровнями пыли в городах Европы (Барселоне и Цюрихе).

Приведенные оценки почасового накопления пыли (размером до 70 мкм) при пылении хвостохранилища АНОФ-2 на дорогах г. Апатиты необходимы для экологического мониторинга, принятия решений коммунальными службами города по уборке пыли с целью снижения негативных последствий для здоровья населения.

### **Благодарности**

Исследования выполнены в рамках темы НИР № гос. рег. 1023032200038-4 "Трансформация природных и техногенных систем в условиях перехода к низкоуглеродному развитию экономики и изменяющегося климата Арктической зоны Российской Федерации (на примере Мурманской области)". Часть исследований (анализ суммарного накопления пыли) выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-30008.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

- Азаров В. Н., Калужина Е. А. Об организации мониторинга  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  на примере г. Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2011. № 25(44). С. 398–401. EDN: PDXKNF.
- Амосов П. В., Бакланов А. А., Горячев А. А., Кони́на О. Т. [и др.]. Пыление хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд: экологическая проблема и пути ее решения : монография. Апатиты : Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 168 с. DOI: <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.505.8>.
- Графкина М. В. Теория и методы оценки геоэкологической безопасности создаваемых природно-технических систем : дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.36. М., 2008. 338 с.
- Графкина М. В., Азаров А. В., Добринский Д. Р., Николенко Д. А. К вопросу контроля и нормирования выбросов мелкодисперсной пыли в атмосферный воздух при движении автомобильного транспорта // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 4(103). С. 373–380. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.4.373-380>. EDN: YNCVRH.
- Amato F., Pandolfi M., Alastuey A., Lozano A. [et al.]. Impact of traffic intensity and pavement aggregate size on road dust particles loading // Atmospheric Environment. 2013. Vol. 77. P. 711–717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.020>.

<sup>9</sup> См.: Роликовый эффект: почему песок и пыль на дорогах провоцируют ДТП. URL: <https://110km.ru/art/rolikovyy-effekt-pochemu-pesok-i-pyl-na-dorogah-provociruyut-dtp-138715.html> (дата обращения: 14.06.2025). ; Пыль автодорог – опасное вещество для человека. URL: <https://nia.eco/2022/04/11/34275/> (дата обращения: 14.06.2025). ; На каком этаже надо жить, чтобы меньше было дорожной пыли. Ученые рассказали и даже сделали замеры. URL: <https://www.ixbt.com/live/offtopic/na-kakom-etazhe-nado-zhit-chtoby-menshe-bylo-dorozhnoy-pyli-uchenye-rasskazali-i-dazhe-sdelali-zamery.html> (дата обращения: 14.06.2025). ; Борьба с пылью на дорогах. URL: [https://studopedia.ru/10\\_77856\\_borba-s-pilyu-na-dorogah.html](https://studopedia.ru/10_77856_borba-s-pilyu-na-dorogah.html) (дата обращения: 14.06.2025).

- Amato F., Pandolfi M., Moreno T., Furger M. [et al.]. Sources and variability of inhalable road dust particles in three European cities // *Atmospheric Environment*. 2011. № 45, Iss 37. P. 6777–6787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.003>.
- Amato F., Schaap M., Denier van der Gon H. A. C., Pandolfi M. [et al.]. Effect of rain events on the mobility of road dust load in two Dutch and Spanish roads // *Atmospheric Environment*. 2012. Vol. 62. P. 352–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.042>.
- Beddows D. C. S., Harrison R. M. PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles // *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 244. Article number: 117886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117886>.
- Boulter P. G., Thorpe A. J., Harrison R. M., Allen A. G. Road vehicle non-exhaust particulate matter: Final report on emission modelling. TRL, 2006.
- Lanzerstorfer C. Heavy metals in the finest size fractions or road-deposited sediments // *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 239. P. 522–531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.063>.
- Lanzerstorfer C., Logiewa A. The upper size limit of the dust samples in road dust heavy metal studies: Benefits of a combined sieving and air classification sample preparation procedure // *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 245. P. 1079–1085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.131>.
- Lo Giudice A., Nuca R., Preziosi L., Coste N. Wind-blown particulate transport: A review of computational fluid dynamics models // *Mathematics in Engineering*. 2019. Vol. 1, Iss. 3. P. 508–547. DOI: <https://doi.org/10.3934/mine.2019.3.508>.
- Lozhkina O. V., Lozhkin V. N. Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2015. Vol. 36. P. 178–189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.013>.
- Padoan E., Rome C., Ajmone-Marsan F. Bioaccessibility and size distribution of metals in road dust and roadside soils along a peri-urban transect // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 601–602. P. 89–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.180>.
- Pant P., Baker S. J., Shukla A., Maikawa C. [et al.]. The PM<sub>10</sub> fraction of road dust in the UK and India: Characterization, source profiles and oxidative potential // *Science of The Total Environment*. 2015. Vol. 530–531. P. 445–452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.084>.
- Piscitello A., Bianco C., Casasso A., Sethi R. Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 766. Article number: 144440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144440>.
- Shao Y. *Physics and modelling of wind erosion*. Springer, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8895-7>.
- 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. P. 2145–2175.

## References

- Azarov, V. N., Kalyuzhina, E. A. 2011. About the organization of monitoring of RM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> on the example of Volgograd. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Ser.: Construction and Architecture*, 25(44), pp. 398–401. EDN: PDXKNF. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Baklanov, A. A., Goryachev, A. A., Konina, O. T. et al. 2023. Dusting of apatite-nepheline ores enrichment tailings: An environmental problem and pathways to solve it. Monograph. Apatity. DOI: <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.505.8>. (In Russ.)
- Grafkina, M. V. 2008. Theory and methods of assessment of geocological safety of created natural and technical systems. Ph.D. Thesis. Moscow. (In Russ.)
- Grafkina, M. V., Azarov, A. V., Dobrinsky, D. R., Nikolenko, D. A. 2017. On the Issue of control and normalization of fine dust emissions into the atmospheric air during the road transport movement. *Vestnik MGSU*, 12(4(103)), pp. 373–380. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.4.373-380>. EDN: YNCVRH. (In Russ.)
- Amato, F., Pandolfi, M., Alastuey, A., Lozano, A. et al. 2013. Impact of traffic intensity and pavement aggregate size on road dust particles loading. *Atmospheric Environment*, 77, pp. 711–717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.020>.
- Amato, F., Pandolfi, M., Moreno, T., Furger, M. et al. 2011. Sources and variability of inhalable road dust particles in three European cities. *Atmospheric Environment*, 45(37), pp. 6777–6787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.003>.
- Amato, F., Schaap, M., Denier van der Gon, H. A. C., Pandolfi, M. et al. 2012. Effect of rain events on the mobility of road dust load in two Dutch and Spanish roads. *Atmospheric Environment*, 62, pp. 352–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.042>.
- Beddows, D. C. S., Harrison, R. M. 2021. PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles. *Atmospheric Environment*, 244. Article number: 117886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117886>.

- Boulter, P. G., Thorpe, A. J., Harrison, R. M., Allen, A. G. 2006. Road vehicle non-exhaust particulate matter: Final report on emission modelling. TRL.
- Lanzerstorfer, C. 2018. Heavy metals in the finest size fractions or road-deposited sediments. *Environmental Pollution*, 239, pp. 522–531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.063>.
- Lanzerstorfer, C., Logiewa, A. 2019. The upper size limit of the dust samples in road dust heavy metal studies: Benefits of a combined sieving and air classification sample preparation procedure. *Environmental Pollution*, 245, pp. 1079–1085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.131>.
- Lo Giudice, A., Nuca, R., Preziosi, L., Coste, N. 2019. Wind-blown particulate transport: A review of computational fluid dynamics models. *Mathematics in Engineering*, 1(3), pp. 508–547. DOI: <https://doi.org/10.3934/mine.2019.3.508>.
- Lozhkina, O. V., Lozhkin, V. N. 2015. Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 36, pp. 178–189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.013>.
- Padoan, E., Rome, C., Ajmone-Marsan, F. 2017. Bioaccessibility and size distribution of metals in road dust and roadside soils along a peri-urban transect. *Science of The Total Environment*, 601–602, pp. 89–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.180>.
- Pant, P., Baker, S. J., Shukla, A., Maikawa, C. et al. 2015. The PM<sub>10</sub> fraction of road dust in the UK and India: Characterization, source profiles and oxidative potential. *Science of The Total Environment*, 530–531, pp. 445–452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.084>.
- Piscitello, A., Bianco, C., Casasso, A., Sethi, R. 2021. Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures. *Science of The Total Environment*, 766. Article number: 144440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144440>.
- Shao, Y. 2008. Physics and modelling of wind erosion. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8895-7>.
- 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, pp. 2145–2175.

#### Сведения об авторах

**Амосов Павел Васильевич** – Академгородок, 14а, г. Апатиты, Россия, 184209;  
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник;  
Малоохтинский пр., 98, г. Санкт-Петербург, Россия, 195196;  
Российский государственный гидрометеорологический университет, 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;  
98 Malookhtinskiy Ave., Saint Petersburg, Russia, 195196;  
Russian State Hydrometeorological University, Leading Researcher;  
e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

**Бакланов Александр Анатольевич** – Малоохтинский пр., 98, г. Санкт-Петербург, Россия, 195196;  
Российский государственный гидрометеорологический университет,  
д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник;  
Jagtvej 128, 2nd floor, tower A+F. DK-2200-Copenhagen, Дания;  
Центр физики льда, климата и Земли, Институт Нильса Бора Копенгагенского университета;  
e-mail: aabaklanov@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>

**Alexander A. Baklanov** – Jagtvej 128, 2nd floor, tower A+F. DK-2200-Copenhagen, Denmark;  
Physics of Ice, Climate and Earth, Niels Bohr Institute, Copenhagen University, Copenhagen,  
Dr Sci. (Phys.&Math.), Professor;  
98 Malookhtinskiy Ave., Saint Petersburg, Russia, 195196;  
Russian State Hydrometeorological University, Chief Scientist;  
e-mail: aabaklanov@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>