



УДК 551.510.42(571.53)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.55.61>

Интенсивность осаждения субмикронных аэрозолей на поверхность озера Байкал

К. А. Лощенко*

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

В. Л. Потемкин

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

В. Л. Макухин

*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия
Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

Т. Г. Потемкина

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Представлены результаты измерений счетной концентрации атмосферных аэрозолей разной размерности над акваторией оз. Байкал, полученные в ходе летней экспедиции 2024 г., проводившейся с 17 по 25 июля на исследовательском судне «Академик В. А. Коптюг». Оценка скорости седиментации частиц на водную поверхность выполнена путем аналитического решения модифицированной версии первого закона Фика. Это решение основывалось на гипотезе однородной изотропной атмосферной турбулентности, предполагавшей равенство коэффициентов вихревой диффузии и турбулентной вязкости воздуха. Показана функциональная зависимость величины скорости осаждения аэрозольных частиц от условий окружающей среды, включая температуру воздуха, плотность частиц и интенсивность фрикционного воздействия ветрового потока. Выполнен обзор работ по расчету скорости осаждения аэрозолей. Установлено соответствие расчетных значений скоростей седиментации результатам экспериментов, выполненных в различных регионах мира. Согласно полученным данным, суммарная концентрация аэрозоля и скорость седиментации частиц существенно возрастают во время судовых стоянок вблизи берега, где существуют иные условия формирования аэрозольных облаков. Этим объясняется резкая неоднородность потоков осаждения аэрозольных частиц на водную поверхность оз. Байкал.

Ключевые слова: аэрозоли, скорость осаждения, Байкал.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственной темы ЛИН СО РАН (№ 0279-2021-0014).

Для цитирования: Интенсивность осаждения субмикронных аэрозолей на поверхность озера Байкал / К. А. Лощенко, В. Л. Потемкин, В. Л. Макухин, Т. Г. Потемкина // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2026. Т. 55. С. 61–72. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.55.61>

The Intensity of Submicron Aerosol Deposition on the Surface of Lake Baikal

К. А. Loshchenko*

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

V. L. Potemkin

Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

V. L. Makukhin

Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

T. G. Potemkina

Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The source materials for this work were the results of measurements of the number concentration of atmospheric aerosols of different dimensions over the waters of Lake Baikal, obtained during the summer expedition of 2024, conducted from July 17 to 25 on the research vessel "Akademik V. A. Koptuyug". The particle sedimentation rate on the water surface was estimated by analytically solving a modified version of Fick's first law. This solution was based on the hypothesis of homogeneous isotropic atmospheric turbulence, which assumed the equality of the coefficients of eddy diffusion and turbulent viscosity of air. The functional dependence of the settling velocity of aerosol particles on environmental conditions, including air temperature, particle density and the intensity of the frictional effect of the wind flow, is shown. A review of studies on the calculation of the sedimentation rate of aerosols is provided. The correspondence of the calculated values of sedimentation rates to the results of experiments carried out in various regions of the world is established. According to the data obtained, the total aerosol concentration and particle sedimentation rate increase significantly during ship moorings near the shore, where other conditions for the formation of aerosol clouds exist. This explains the sharp heterogeneity of the aerosol particle sedimentation flows on the water surface of Lake Baikal.

Keywords: aerosols, sedimentation rate, Lake Baikal.

For citation: Loshchenko K.A., Potemkin V.L., Makukhin V.L. The Intensity of Submicron Aerosol Deposition on the Surface of Lake Baikal. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2026, vol. 55, pp. 61-72. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.55.61> (in Russian)

Введение

Атмосферный аэрозоль является дисперсной системой, состоящей из мельчайших твердых или жидких частиц, суспендированных в воздушной среде. Термином «аэрозоль» традиционно обозначают мелкие фракции, характеризующиеся низкой скоростью гравитационной седиментации. Подавляющая масса атмосферного аэрозоля сосредоточена преимущественно в нижнем слое атмосферы – тропосфере, достигающей примерно 12 км над у. м. Диапазон размеров аэрозольных частиц варьирует от нанометровых кластеров до относительно крупных частиц с диаметрами до десятков мкм.

Чрезвычайно актуальны исследования в атмосфере процессов при участии аэрозоля. Иногда даже малая концентрация аэрозольных частиц может резко изменить свойства газа. Например, концентрация ядер конденсации в

атмосферном воздухе мала по сравнению с числом молекул воздуха, но именно их наличие определяет возможность образования облаков и осадков, являясь необходимым условием реализации цикла воды в атмосфере. Прозрачность атмосферы, которая регулирует радиационный баланс поверхности Земли, существенно зависит от концентрации аэрозолей в атмосферном воздухе. Глобальные и региональные климатические изменения во многом определяются физико-химическими процессами, связанными с присутствием в атмосфере аэрозольных частиц как естественного, так и антропогенного происхождения.

Изучение процессов загрязнения атмосферы осуществляется не только прямыми инструментальными наблюдениями (например, [Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской ...», 2021; Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской ...», 2021; Study ... , 2021; Особенности суточной ... , 2018; Особенности переноса ... , 2018; Экологическое ... , 2018; Мамонтова, Тарасова, Мамонтов, 2019], но и посредством математического моделирования распространения и трансформации примесей [Аргучинцев, Аргучинцева, 2007; Алоян, 2008; Динамика ... , 2010; Лыкосов, Крупчатников, 2012; Особенности ... , 2019]. Данные методы обеспечивают глубокое понимание механизмов сложных атмосферных явлений, минимизируя затраты на дорогостоящие натурные эксперименты.

Исследование переноса аэрозолей требует детального анализа процесса осаждения частиц на границе раздела фаз. Основными механизмами осаждения являются броуновская диффузия в пограничном слое, гравитационная седиментация и турбофорез. Ряд исследователей предложил разнообразные теоретические модели данного процесса [Fan, Hua, 2016]. Так, Лай и Назарофф [Lai, Nazaroff, 2000] представили трехслойную модель, основанную на первом законе Фика. Последующее развитие данной концепции было осуществлено Чжао и Ву [Zhao, Wu, 2006], принявшими во внимание эффект турбофореза и получившими аналитическое решение. Альтернативный подход был реализован Лай и Чен [Lai, Chen, 2006], использовавшими RNG k - ϵ модель и концепцию взаимодействия завихрений. Нестационарную трехслойную модель предложила группа авторов во главе с Чиу [Chiou, Chiu, Chen, 2011]. Упомянутые аналитические подходы были эффективно применены при анализе осаждения частиц в вентиляционных установках [Baugram, Korobenko, 2022], рассеянии вредных веществ в производственных и бытовых помещениях [Zhang, Fan, Wei, 2021], а также при проведении оценки риска аварий на атомных электростанциях [Верификация ... , 2013].

Расчет скоростей осаждения

Данная работа является продолжением начатых ранее исследований [Латышева, Потемкин, Макухин, 2023]. Здесь при расчете скоростей осаждения субмикронных и более крупных (диаметром до 10 мкм) аэрозолей поток частиц через пограничный слой (J) считается постоянным и описывается модифицированной формой закона Фика [Lai, Nazaroff, 2000; Submicron ... , 2017]:

$$J = -(\underbrace{\varepsilon_p + D}_{\text{диффузия}}) \frac{\partial C}{\partial y} - \underbrace{v_s C}_{\text{гравитационное осаждение}}, \quad (1)$$

где ε_p – турбулентная (вихревая) диффузия частицы, D – броуновская диффузия частицы, C – концентрация частицы в воздухе, y – нормальное расстояние до поверхности, v_s – скорость гравитационного осаждения.

Обозначим концентрацию частиц на удалении от пограничного слоя через C_∞ . Тогда скорость осаждения частиц (v_d) определяется следующим образом [Lai, Nazaroff, 2000]:

$$v_d = \frac{|J(y=0)|}{C_\infty}. \quad (2)$$

Для удобства концентрация частиц (C), расстояние от поверхности (y) и скорость осаждения (v_d) нормированы по концентрации частиц набегающего потока (C_∞), скорости трения (u^*) и кинематической вязкости жидкости (ν) следующим образом в уравнениях (3)–(5).

$$C^+ = \frac{C}{C_\infty}, \quad (3)$$

$$y^+ = \frac{y u^*}{\nu}, \quad (4)$$

$$v_d^+ = \frac{v_d}{u^*}. \quad (5)$$

Используя уравнения (3)–(5), уравнение (1) можно записать следующим образом, чтобы рассчитать скорость осаждения для подстилающей поверхности:

$$v_d^+ = \left(\frac{\varepsilon_p + D}{\nu} \right) \frac{\partial C^+}{\partial y^+} + v_s C^+. \quad (6)$$

Граничные условия, учитывающие эффект твердой стенки на шероховатой поверхности, были сформулированы в [Zhao, Wu, 2006].

$$C^+ = \begin{cases} 0 & \text{при } y^+ = r^+ + b^+ \\ 1 & \text{при } y^+ = 200 \end{cases}. \quad (7)$$

Здесь r^+ – безразмерный радиус частицы; b^+ – безразмерное значение эффективной высоты шероховатости; $y^+ = 200$ – высота пограничного слоя.

Уравнение (6) с учетом граничных условий (7) преобразуется следующим образом [Lai, Nazaroff, 2000]:

$$\frac{1}{v_d^+} = \int_0^1 \frac{dC^+}{v_d^+} = \int_{r^+ + b^+}^{200} \left(\frac{v}{\varepsilon_p + D} \right) dy^+ = I. \quad (8)$$

Предполагается, что вихревая диффузия частиц равна турбулентной вязкости жидкости (v_t). Для однородной изотропной турбулентности и для частиц с безразмерными временами релаксации менее 0,1 доказано, что $\varepsilon_p/v_t = 1$ [Hinze, 1975]. Турбулентная вязкость жидкости рассчитывается по приведенному ниже соотношению [Johansen, 1991]:

$$\frac{v_t}{v} = \left(\frac{y^+}{a} \right)^3, \quad (9)$$

где a – константа. Из уравнения (8) рассчитывается скорость осаждения [Пискунов, 2010; Submicron ... , 2017; Wayam, Korobenko, 2022]:

$$v_d = \frac{v_s}{1 - \exp\left(-\frac{v_s I}{u^*}\right)}. \quad (10)$$

Интеграл в уравнении (10) решался аналитически [Lai, Nazaroff, 2000; Simulation ... , 2016]:

$$\begin{aligned} I(r^+, Sc) &= 3,64(Sc)^{2/3}(a-b) + 39, \\ a &= \frac{1}{2} \ln \left[\frac{(10,92Sc^{-1/3} + 4,3)^3}{Sc^{-1} + 0,0609} \right] + \sqrt{3} \operatorname{arctg} \left[\frac{8,6 - 10,92Sc^{-1/3}}{10,92 \cdot \sqrt{3} \cdot Sc^{-1/3}} \right], \\ b &= \frac{1}{2} \ln \left[\frac{(10,92Sc^{-1/3} + r^+)^3}{Sc^{-1} + 7,669 \cdot 10^{-4}(r^+)^3} \right] + \sqrt{3} \operatorname{arctg} \left[\frac{2r^+ - 10,92Sc^{-1/3}}{10,92 \cdot \sqrt{3} \cdot Sc^{-1/3}} \right], \end{aligned} \quad (11)$$

где $Sc = vD^{-1}$ – число Шмидта.

На рис. 1 представлены результаты сравнения значений скорости осаждения, рассчитанных в работе [Пискунов, 2010], измеренных в полевых условиях из работы [Schmel, 1973] и полученных при выполнении данной работы по уравнениям (1)–(11). Рисунок 2 иллюстрирует результаты сравнения значений скорости осаждения, рассчитанных в работе [Пискунов, 2010], измеренных в полевых условиях из фундаментальной работы [Slinn, 1978] и полученных при выполнении данной работы по уравнениям (1)–(11). Расхождение между результатами расчетов и наблюдениями не более 5 %.

Получены зависимости рассчитанных скоростей осаждения по уравнениям (1)–(11) от температуры окружающей среды, скорости трения и плотности аэрозолей. При повышении температуры скорость осаждения уменьшается, при увеличении значений скорости трения скорость осаждения возрастает. Зависимость рассчитанной скорости осаждения от плотности аэрозольных частиц представлена на рис. 3.

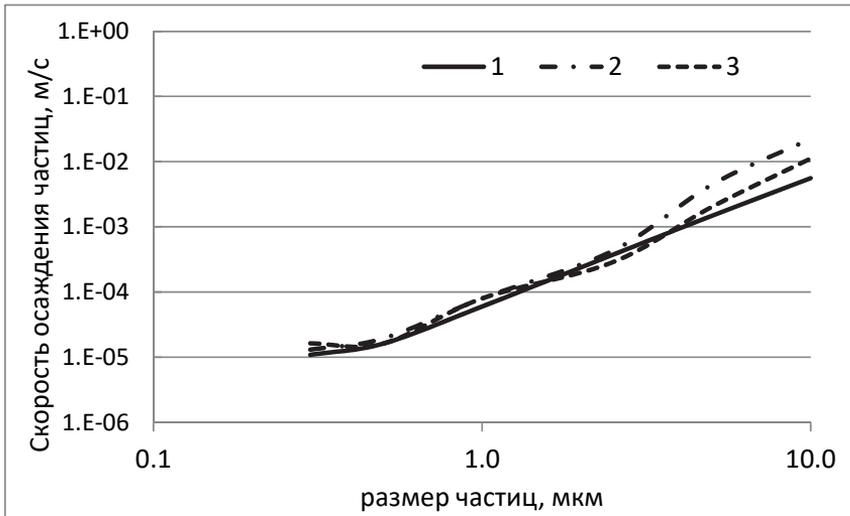


Рис. 1. Сравнение скоростей сухого осаждения на горизонтальную поверхность. По горизонтальной оси отложен диаметр аэрозольных частиц в мкм, по вертикальной – скорость осаждения в м/с (использованы логарифмические шкалы):
 1 – расчетная скорость осаждения аэрозолей по формулам (1)–(11);
 2 – расчетная скорость осаждения аэрозолей из работы [Пискунов, 2010];
 3 – измеренная скорость осаждения из работы [Sehmel, 1973]

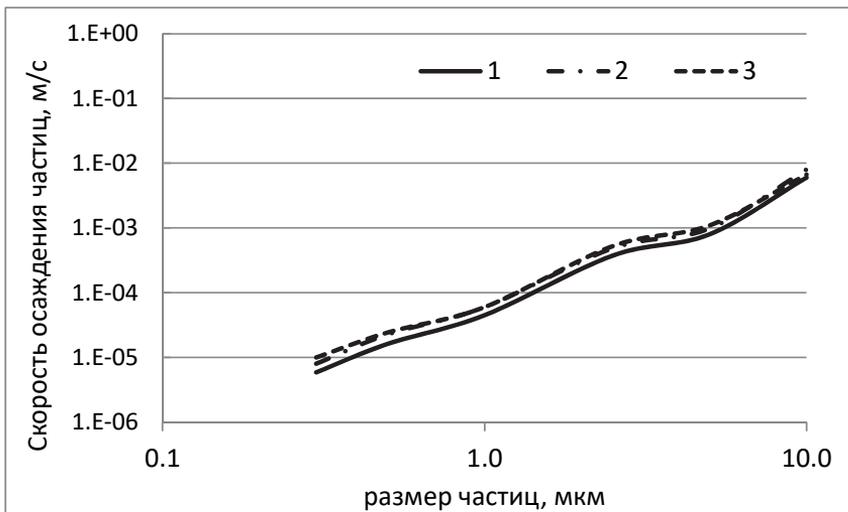


Рис. 2. Сравнение скоростей сухого осаждения на горизонтальную поверхность при условиях, отличных от рис. 1 (использованы логарифмические шкалы):
 1 – расчетная скорость осаждения аэрозолей по формулам (1)–(11);
 2 – расчетная скорость осаждения аэрозолей из работы [Пискунов, 2010];
 3 – измеренная скорость осаждения из работы [Slinn, 1978]

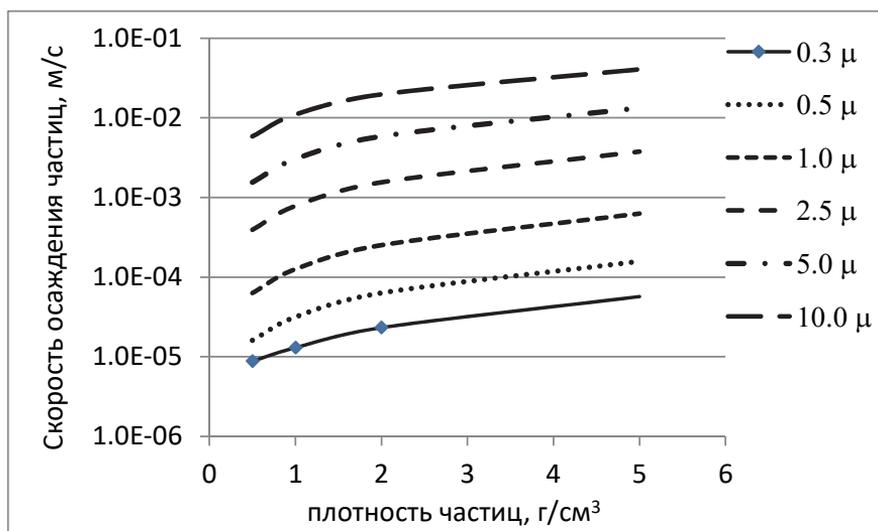


Рис. 3. Зависимость расчетной скорости осаждения частиц разного размера по формулам (1) от плотности аэрозолей при температуре окружающей среды 0 °С. Использована логарифмическая шкала

Расчет интенсивности осаждения на поверхность Байкала

В июле 2024 г. во время экспедиции на оз. Байкал были получены почасовые значения счетных и массовых концентраций аэрозолей шести размерных диапазонов (размеры частиц 0,3, 0,5, 1, 2,5, 5 и 10 мкм) по всем районам озера. Синхронно проводились измерения метеорологических характеристик. Используя описанный алгоритм (формулы (1)–(11)), были рассчитаны скорости осаждения на горизонтальную поверхность аэрозолей каждой размерной фракции, составившие в среднем 0,02, 0,06, 0,24, 1,5, 5,6 и 18,9 мм/с соответственно. По полученным данным были выполнены оценки интенсивности осаждения аэрозолей на водную поверхность озера. Осредненные почасовые значения представлены на рис. 4.

Максимальные значения интенсивности осаждения аэрозолей, около 200 мкг/(м²·ч), получены 22.07 в 6 ч на стоянке у пос. Хужир (см. рис. 4); основной вклад (65 %) внесли частицы радиусом 5 и 10 мкм, счетная концентрация аэрозолей радиусом 5 мкм превышала среднее значение за все время экспедиции почти в 7 раз, радиусом 10 мкм – более чем в 8 раз. Счетная концентрация субмикронных аэрозолей (радиусом не более 1 мкм) не превышала среднее значение. Повышенное значение интенсивности осаждения могло быть вызвано поступлением крупных аэрозольных частиц с берега от поселка. Через 2 ч прошел небольшой дождь (интенсивность 1 мм/ч), и концентрации аэрозолей снизились до фоновых величин.

В дальнейшем (22–25.07.2024) на переходе пос. Хужир – Нижнеангарск – пос. Листвянка наблюдался стабильный режим, седиментация аэрозолей была в пределах 20–30 мкг/(м²·ч), вклад грубодисперсных частиц не превышал 15–25 %.

Выводы

На основе проведенных расчетов были установлены зависимости расчетной скорости осаждения аэрозолей на подстилающую поверхность согласно формулам (1)–(11) от таких факторов, как температура окружающего воздуха, плотность аэрозольной частиц (см. рис. 3) и скорости трения. Полученные результаты показывают, что повышение температуры воздуха снижает скорость осаждения частиц, тогда как увеличение скорости трения ведет к ее росту. В открытой части озера, вдали от берега, наблюдалась устойчивая система формирования аэрозольных облаков над поверхностью озера со средней суммарной концентрацией частиц $10\text{--}20\text{ мкг/м}^3$, что приводило к мало изменчивым потокам осаждения на водную поверхность в пределах $20\text{--}30\text{ мкг/(м}^2\cdot\text{ч)}$. В южной части озера концентрации частиц в воздухе повышались до $20\text{--}35\text{ мкг/м}^3$ локально (рис. 4, Лиственничный залив вблизи пос. Листвянка), в северо-западной части озера (пос. Нижнеангарск) концентрации частиц составляли $20\text{--}25\text{ мкг/м}^3$, что приводило к повышению потоков седиментации до $30\text{--}60\text{ мкг/(м}^2\cdot\text{ч)}$.

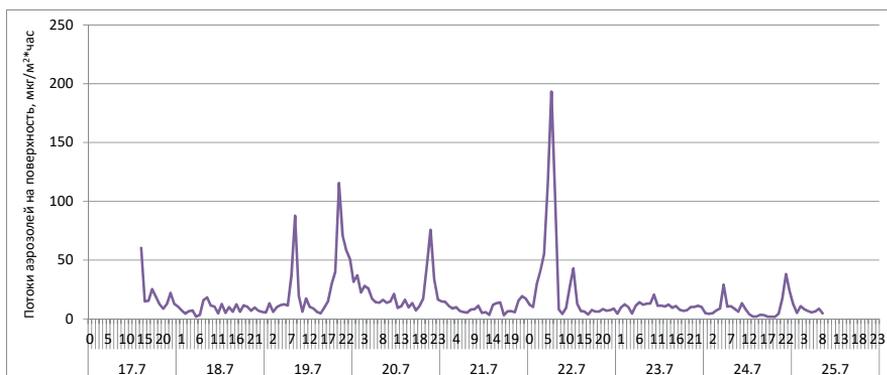


Рис. 4. Суммарная интенсивность осаждения аэрозольных частиц на поверхность оз. Байкал по данным экспедиционных исследований летом 2024 г. на научно-исследовательском судне «Академик В. А. Коптюг», в $\text{мкг/(м}^2\cdot\text{ч)}$

Список литературы

- Алоян А. Е. Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. М. : Наука, 2008. 415 с.
- Аргучинцев В. К., Аргучинцева А. В. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса антропогенных примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2007. 255 с.
- Верификация моделей осаждения продуктов деления в первом контуре ЯЭУ (диффузия, термофорез, турбофорез) в расчетном комплексе СОКРАТ/В3 / В. М. Алипченков, А. Е. Киселев, А. А. Сорокин [и др.] // Известия РАН. Энергетика. 2013. № 3. С. 53–59.
- Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2020 году». Иркутск : Мегалит, 2021. 330 с.
- Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». М. : Минприроды России ; МГУ им. М. В. Ломоносова, 2021. 864 с.

Динамика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере с учетом гетерогенных процессов / А. Е. Алоян, А. Н. Ермаков, В. О. Арутюнян, В. А. Загайнов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 5. С. 657–671.

Латышева И. В., Потемкин В. Л., Макухин В. Л. Исследование процессов осаждения аэрозолей на акваторию озера Байкал // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы V Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 23–25 нояб. 2022 г. / отв. ред. Е. Н. Сутырина. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2023. С. 397–401.

Лыкосов В. Н., Крупчатников В. Н. Некоторые направления развития динамической метеорологии в России в 2007–2010 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 3. С. 284–303.

Мамонтова Е. А., Тарасова Е. Н., Мамонтов А. А. Содержание стойких органических загрязнителей в почве, снеговой воде и растительности в Южном Прибайкалье // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 86–98.

Особенности вертикального распределения аэрозолей и газовых примесей в регионе оз. Байкал / В. Л. Потемкин, И. В. Латышева, В. Л. Макухин, Т. Г. Потемкина // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2019. Т. 27. С. 111–121.

Особенности переноса и трансформации аэрозольных и газовых примесей атмосферы в береговой зоне оз. Байкал / А. С. Заяханов, Г. С. Жамсуева, В. В. Цыдыпов [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 12. С. 968–973.

Особенности суточной изменчивости микродисперсной фракции аэрозоля в атмосфере прибрежной зоны озера Байкал и аридной зоны Монголии / А. С. Заяханов, Г. С. Жамсуева, И. П. Сунграпова, В. В. Цыдыпов // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 01. С. 17–23.

Пискунов В. Н. Динамика аэрозолей. М. : Физматлит, 2010. 296 с.

Экологическое состояние побережья озера Байкал и его влияние на загрязнение озера / И. А. Белозерцева, И. Б. Воробьева, Н. В. Власова [и др.] // Успехи современного естествознания. 2018. № 11-1. С. 85–95.

Bayram A., Korobenko A. Modelling the transport of expelled cough particles using an Eulerian approach and the variational multiscale method // Atmospheric Environment. 2022. Vol. 271. P. 1–16.

Chiou M. C., Chiu C. H., Chen H. S. Modeling particle deposition from fully developed turbulent flow // Applied Mathematical Modelling. 2011. Vol. 35, N 7. P. 3238–3254.

Fan H., Hua J. Experimental Research and Modeling of Particle Deposition in Ventilation Ducts // Advances in Mechanical Engineering. 2016. Vol. 2013. P. 1–7.

Hinze J. O. Turbulence. 2nd ed. New York : McGraw-Hill, 1975. 790 p.

Johansen S. T. The deposition of particle on vertical walls // Int. J. Multiph. Flow. 1991. Vol. 17, N 3. P. 355–376.

Lai A. C. K., Chen F. Modeling particle deposition and distribution in a chamber with a two-equation Reynoldsaveraged Navier-Stokes model // Journal of Aerosol Science. 2006. Vol. 37, N 12. P. 1770–1780.

Lai A. C. K., Nazaroff W. W. Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces // Journal of Aerosol Science. 2000. Vol. 31, N 4. P. 463–476.

Sehmel G. A. Particle eddy diffusivities and deposition for isothermal flow and smooth surfaces // J. Aerosol Sci. 1973. Vol. 4. P. 125–138.

Simulation of particulate matter ingress, dispersion and deposition in a historical building / J. Grau-Bove, L. Mazzei, L. Malkii-Ephstein [et al.] // Journal of Cultural Heritage. 2016. Vol. 18. P. 199–208.

Slinn W. G. N. Parameterization for resuspension and for Wet and Dry Deposition of Particles and Gases for Use in Radiation Dose Calculations // Nucl. Safety. 1978. Vol. 19, N 2. P. 205–219.

Study of aerosol nano- and submicron particle compositions in the atmosphere of Lake Baikal during natural fire events and their interaction with water surface / T. V. Khodzher, V. A. Zagaynov, A. A. Lushnikov [et al.] // Water, Air and Soil Pollution. 2021. Vol. 232, N 7. P. 266.

Submicron particle dynamics for different surfaces under quiescent and turbulent conditions / K. Vohra, K. Ghosh, S. N. Tripathi [et al.] // Atmospheric Environment. 2017. Vol. 152. P. 330–344.

Zhang X., Fan Y., Wei S. Experimental study on particle deposition in pipelines in a fresh air system // Thermal Science. 2021. Vol. 25, N 38. P. 2319–2325.

Zhao B., Wu J. Modeling particle deposition from fully developed turbulent flow in ventilation duct // *Atmospheric Environment*. 2006. Vol. 40, N 3. P. 457–466.

References

Aloyan A.Ye. *Modelirovaniye dinamiki i kinetiki gazovykh primesey i aerorozley v atmosfere* [Modeling the dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 2008. 415 p. (in Russian)

Arguchintsev V.K., Arguchintseva A.V. *Modelirovaniye mezomasshtabnykh gidrotermodynamicheskikh protsessov i perenosa antropogennykh primesey v atmosfere i gidrosfere regiona oz. Baykal* [Modeling mesoscale hydrothermodynamic processes and transport of anthropogenic impurities in the atmosphere and hydrosphere of the Lake Baikal region]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2007. 255 p. (in Russian)

Alipchenkov V.M., Kiselev A.E., Sorokin A.A. et al. Verifikatsiya modeley osazhdeniya produktov deleniya v pervom konture YAEU (diffuziya, termoforez, turboforez) v raschotnom komplekse SOKRAT/V3 [Verification of models of fission product deposition in the primary circuit of a nuclear power plant (diffusion, thermophoresis, turbophoresis) in the SOKRAT/V3 calculation complex]. *Izvestiya RAN. Energetika* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2013, no. 3, pp. 53–59. (in Russian)

Gosudarstvennyy doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Irkutskoy oblasti v 2020 godu" [State report "On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2020"]. Irkutsk, Megaprint Publ., 2021, 330 p. (in Russian)

Gosudarstvennyy doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2020 godu" [On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020. State report]. Moscow, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation Publ., Lomonosov Moscow State University Publ., 2021, 864 p. (in Russian)

Aloyan A.E., Ermakov A.N., Arutyunyan V.O., Zagainov V.A. Dinamika gazovykh primesey i aerorozley v atmosfere s uchotom geterogennykh protsessov [Dynamics of gas impurities and aerosols in the atmosphere taking into account heterogeneous processes]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Atmosphere and Ocean], 2010, vol. 46, no. 5, pp. 657–671. (in Russian)

Latysheva I.V., Potemkin V.L., Makukhin V.L. Issledovaniye protsessov osazhdeniya aerorozley na akvatoriyu ozera Baykal [Study of aerosol deposition processes on the water area of Lake Baikal]. *Sovremennyye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii* [Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia], 2023, pp. 397–401. (in Russian)

Lykosov V.N., Krupchatnikov V.N. Nekotoryye napravleniya razvitiya dinamicheskoy meteorologii v Rossii v 2007–2010 gg. [Some directions of development of dynamic meteorology in Russia in 2007–2010]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean], 2012, vol. 48, no. 3, pp. 284–303. (in Russian)

Mamontova E.A., Tarasova E.N., Mamontov A.A. Soderzhaniye stoykikh organicheskikh zaryaznitateley v pochve, snegovoy vode i rastitel'nosti v Yuzhnom Pribaykal'ye [Content of persistent organic pollutants in soil, snow water and vegetation in the Southern Baikal region]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2019, no. 2, pp. 86–98. (in Russian)

Potemkin V.L., Latysheva I.V., Makukhin V.L., Potemkina T.G. Osobennosti vertikalnogo raspredeleniya aerorozley i gazovykh primesey v regione oz. Baykal [Features of the vertical distribution of aerosols and gas impurities in the Lake Baikal region]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2019, vol. 27, pp. 111–121. (in Russian)

Zayahanov A.S., Zhamsueva G.S., Tsydygov V.V. et al. Osobennosti perenosa i transformatsii aerorozolnykh i gazovykh primesey atmosfery v beregovoy zone oz. Baykal [Features of the transfer and transformation of aerosol and gas impurities of the atmosphere in the coastal zone of Lake Baikal]. *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean], 2018, vol. 31, no. 12, pp. 968–973. (in Russian)

Zayahanov A.S., Zhamsueva G.S., Sungrapova I.P., Tsydygov V.V. Osobennosti sutochnoy izmenchivosti mikrodispersnoy fraktsii aerorozolya v atmosfere pribrezhnoy zony ozera Baykal i aridnoy zony Mongolii [Features of daily variability of the microdispersed fraction of aerosol in the at-

mosphere of the coastal zone of Lake Baikal and the arid zone of Mongolia]. *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the atmosphere and ocean], 2018, vol. 31, no. 01, pp. 17-23. (in Russian)

Piskunov V. N. *Dinamika aerorozley* [Dynamics of aerosols]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010, 296 p. (in Russian)

Belozertseva I.A., Vorobyova I.B., Vlasova N.V. et al. Ekologicheskoye sostoyaniye poberezh'ya ozera Baykal i yego vliyaniye na zagryazneniye ozera [Ecological state of the coast of Lake Baikal and its impact on lake pollution]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Advances in modern natural science], 2018, no. 11-1. pp. 85-95. (in Russian)

Bayram A., Korobenko A. Modelling the transport of expelled cough particles using an Eulerian approach and the variational multiscale method. *Atmospheric Environment*, 2022, vol. 271, pp. 1-16.

Chiou M.C., Chiu C.H., Chen H.S. Modeling particle deposition from fully developed turbulent flow. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, vol. 35, no 7, pp. 3238-3254.

Fan H., Hua J. Experimental Research and Modeling of Particle Deposition in Ventilation Ducts. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 2013, pp. 1-7.

Hinze J.O. *Turbulence*. 2nd ed. New York, McGraw-Hill, 1975, 790 p.

Johansen S.T. The deposition of particle on vertical walls. *Int. J. Multiph. Flow*. 1991, vol. 17, no 3, pp. 355-376.

Lai A.C.K., Chen F. Modeling particle deposition and distribution in a chamber with a two-equation Reynoldsaveraged Navier-Stokes model. *Journal of Aerosol Science*. 2006, vol. 37, no. 12, pp. 1770-1780.

Lai A.C.K., Nazaroff W.W. Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. *Journal of Aerosol Science*, 2000, vol. 31, no. 4, pp. 463-476.

Shmel G.A. Particle eddy diffusivities and deposition for isothermal flow and smooth surfaces. *J. Aerosol Sci*, 1973, vol. 4, pp. 125-138.

Grau-Bove J., Mazzei L., Malkii-Ephstein L. et al. Simulation of particulate matter ingress, dispersion and deposition in a historical building. *Journal of Cultural Heritage*, 2016, vol. 18, pp. 199-208.

Slinn W.G.N. Parameterization for resuspension and for Wet and Dry Deposition of Particles and Gases for Use in Radiation Dose Calculations. *Nucl. Safety*, 1978, vol. 19, no. 2, pp. 205-219.

Khodzher T.V., Zagaynov V.A., Lushnikov A.A. et al. Study of aerosol nano- and submicron particle compositions in the atmosphere of Lake Baikal during natural fire events and their interaction with water surface. *Water, Air and Soil Pollution*, 2021, vol. 232, no. 7, p. 266.

Vohra K., Ghosh K., Tripathi S.N. et al. Submicron particle dynamics for different surfaces under quiescent and turbulent conditions. *Atmospheric Environment*, 2017, vol. 152, pp. 330-344.

Zhang X., Fan Y., Wei S. Experimental study on particle deposition in pipelines in a fresh air system. *Thermal Science*, 2021, vol. 25, no. 38, pp. 2319-2325.

Zhao B., Wu J. Modeling particle deposition from fully developed turbulent flow in ventilation duct. *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40, no. 3, pp. 457-466.

Сведения об авторах

Лощенко Кристина Анатольевна
кандидат географических наук, доцент,
кафедра метеорологии и физики
околоземного космического пространства
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: loshchenko@bk.ru

Потемкин Владимир Львович
кандидат географических наук, старший
научный сотрудник лаборатории гидрохимии
и химии атмосферы
Лимнологический институт СО РАН

Information about the authors

Loshchenko Kristina Anatolevna
Candidate of Sciences (Geography),
Associate Professor, Department of Meteorology
and Physics of Near-Earth Space
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: loshchenko@bk.ru

Potemkin Vladimir Lwovich
Candidate of Sciences (Geography),
Senior Research Scientist, Laboratory of
Hydrochemistry and Atmospheric Chemistry
Limnological Institute SB RAS

Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 3
e-mail: klimat@lin.irk.ru

Макухин Владимир Леонидович
кандидат технических наук, доцент
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
Лимнологический институт СО РАН
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. Улан-
Баторская, 3
e-mail: aerosol@lin.irk.ru

Потемкина Татьяна Гавриловна
кандидат географических наук,
старший научный сотрудник
Лимнологический институт СО РАН,
Россия, 664003, Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 3,
e-mail: tat_pot@lin.irk.ru

3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: klimat@lin.irk.ru

Makukhin Vladimir Leonidovich
Candidate of Sciences (Technical),
Associate Professor
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
Limnological Institute SB RAS
3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: aerosol@lin.irk.ru

Potemkina Tatiana Gavrilovna
Candidate of Sciences (Geography),
Senior Research Scientist
Limnological Institute SB RAS
3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: tat_pot@lin.irk.ru

Код научной специальности: 1.6.18

Статья поступила в редакцию 10.07.2025; одобрена после рецензирования 18.12.2025; принята к публикации 13.03.2026

The article was submitted July, 10, 2025; approved after reviewing December, 18, 2025; accepted for publication March, 13, 2026