

Использование данных измерений концентраций в воздухе и осадках для модельной оценки поступления соединений серы и азота из атмосферы в Байкальской природной территории

И.С. Ильин^{1)*}, Д.А. Галушин¹⁾, С.А. Громов^{1,2)}, Е.С. Жигачёва¹⁾

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Россия, 107058, Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾ Институт географии РАН, Россия, 109017 Москва, Старомонетный пер., 29

*Адрес для переписки: i.ilyin@igce.ru

Резюме. Представлены результаты расчетов и количественной оценки суммарных потоков атмосферных выпадений окисленной серы, окисленного азота и восстановленного азота на Байкальскую Природную Территорию (БПТ) с использованием данных измерений концентраций в воздухе и атмосферных осадках, и моделирования скоростей сухого осаждения для разных типов подстилающей поверхности региона. Данные измерений содержания загрязняющих веществ в воздухе и осадках получены на станции мониторинга Листвянка, работающей в рамках программы мониторинга ЕАНЕТ с 2000 г. На основании подходов, разработанных в ЕАНЕТ для использования данных наблюдений в оценке кислотных выпадений, были рассчитаны потоки сухих осадений и их вариации за двадцатилетний период для различных типов подстилающей поверхности. Для определения влажных выпадений были использованы данные станций мониторинга химического состава осадков на территории исследования. Пространственное распределение интенсивности суммарных (сухих и влажных) потоков серы и азота для региона БПТ было получено для условий 2020 года. В районе станции ЕАНЕТ Листвянка вклад сухих выпадений в суммарные на водную поверхность, луга и хвойный лес составляет в среднем 50%, 67% и 85%, соответственно. Вклады сухого выпадения окисленного азота на те же типы подстилающей поверхности составляют в среднем 6%, 20% и 50%, а восстановленного азота – 50%, 56% и 60%, соответственно. Средневзвешенные величины потоков суммарных выпадений на разные зоны суши БПТ оценены для окисленной серы $1300 - 1400 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$, окисленного и восстановленного азота $200 - 270 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$ и $340 - 360 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{г}^{-1}$, соответственно. Отмечено, что потоки выпадений этих веществ на акваторию озера Байкал существенно меньше.

Ключевые слова. ЕАНЕТ, сухое осаждение, влажное осаждение, сера, азот, Байкал.

Model estimates of atmospheric deposition of sulfur nitrogen and nitrogen compounds to Baikal Natural Territory based on observed concentration in air and precipitation

I.S. Ilyin ¹⁾, D.A. Galushin ¹⁾, S.A. Gromov ^{1,2)}, E.S. Zhigacheva ¹⁾

¹⁾Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

²⁾Institute of Geography, Russian Academy of Science,
29, Staromonetnyi lane, 119017, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *i.ilyin@igce.ru*

Abstract. Results of the model estimates of oxidized sulfur, oxidized and reduced nitrogen total atmospheric deposition fluxes to the Baikal Natural Territory (BNT) are presented. Measured data on concentrations in air and precipitation and modelling of ecosystem-dependent dry deposition velocities were used. Measurement data on the pollutant air concentrations were obtained at Listvyanka monitoring site which has been working under the international EANET monitoring programme since 2000. Ecosystem-dependent dry deposition fluxes and their variability over twenty-year period were estimated following the modelling approach practically developed in the EANET programme with the guidelines and recommendations addressing to application of monitoring data. For simulation of wet deposition the data on precipitation chemistry monitoring stations located on the research area were used. Spatial distribution of total (wet and dry) atmospheric deposition fluxes of sulfur and nitrogen across the BNT area was evaluated for the conditions of 2020. Sulfur dry deposition to water, grassland and coniferous forest in the Listvyanka area contributes around 50%, 67% and 85% to its total deposition, respectively, on average. Contribution of oxidized nitrogen dry deposition for water, grassland and coniferous forests amounts to 5%, 20% and about 50%, respectively. The similar corresponding values for dry deposition of reduced nitrogen were 50, 56 and 60%. Within the BNT domain the area-weighted mean deposition flux to different land type areas is about 1300-1400 mg·m⁻²·yr⁻¹ (sulfur), 200-270 mg·m⁻²·yr⁻¹ (oxidized nitrogen) and 340-360 mg·m⁻²·yr⁻¹ (reduced nitrogen), while mean deposition flux to the Lake Baikal water surface is substantially lower.

Keywords. EANET, dry deposition, wet deposition, sulfur, nitrogen, Lake Baikal.

Введение

Международная программа ЕАНЕТ (EANET – Acid deposition monitoring network in East Asia) начала свою деятельность в 1998 году. Быстрая индустриализация стран Восточной и Юго-восточной Азии в конце XX – начале XXI века сопровождалась ускоряющимся ростом выбросов в атмосферу загрязняющих веществ и увеличению загрязнения воздуха (Carmichael et al., 2002, Yang et al., 2024). Для оценки масштабов проблем и разработки мер ограничения последствий возникла необходимость получать регулярную информацию об уровнях загрязнения воздуха и других природных сред. Сеть международного мониторинга ЕАНЕТ была организована как региональная

инициатива 13 стран субконтинента, включая Россию. Основными целями ЕАНЕТ при её создании определены: 1) проведение долгосрочного мониторинга загрязнения природной среды; 2) обеспечение информационной поддержкой для принятия решений на региональном, национальном и международном уровнях с целью уменьшения последствий негативного влияния кислотных выпадений на окружающую среду и 3) обеспечение научного и технического взаимодействия между странами-участницами программы по вопросам, связанным с проблемами кислотного загрязнения (ЕАНЕТ, 2005). Начиная с 2000 года в России работает сеть из четырёх станций ЕАНЕТ. Три станции – Монды (фоновая), Листвянка (региональная), и Иркутск (городская) – расположены в районе оз. Байкал, а четвертая – Приморская (региональная, с 2002 г.) расположена в Приморском крае (Gromov et al., 2006).

Целью данного исследования является количественная оценка потоков суммарного выпадения атмосферных соединений серы и азота, и вкладов сухого и влажного выпадений в суммарные выпадения для станции Листвянка и на Байкальской природной территории (БПТ), включающую акваторию озера Байкал и экологические зоны БПТ. Для оценки измеряемого поступления кислотообразующих веществ из атмосферы на подстилающую поверхность непосредственно по данным наблюдений в виде влажных выпадений используются данные мониторинга концентраций в атмосферных осадках и суммы осадков. Для расчетов сухих выпадений в рамках программы ЕАНЕТ был разработан подход, учитывающий значения концентраций и свойств загрязняющих веществ в приземном слое воздуха, влияние метеорологических параметров на процессы выведения из атмосферы и особенности подстилающей поверхности (Strategy Paper, 2010). Этот подход, в дальнейшем реализованный в технические документы и рекомендации, был использован в данной работе с целью исследовать влияние разных видов подстилающей поверхности на интенсивность и величину потоков сухих выпадений окисленной серы, окисленного азота и восстановленного азота в районе станции ЕАНЕТ Листвянка и на БПТ.

Методы и материалы

Изучаемая территория

Согласно законодательству Российской Федерации (Федеральный закон от 01.05.1999 № 94-ФЗ), Байкальская природная территория (БПТ) включает акваторию озера Байкал, водоохранную зону, окружающую озеро Байкал, территорию водосбора озера в пределах границ России, особо охраняемые природные территории, а также прилегающая к озеру территория шириной до 200 км на запад и северо-запад от него (<https://rpn.gov.ru/activity/baikal/>). БПТ представлена тремя экологическими зонами (рис. 1). Центральная экологическая зона (ЦЭЗ) включает Озеро Байкал, его острова, водоохранную зону озера и особо охраняемые природные территории, примыкающие к Байкалу. Границы ЦЭЗ совпадают с границами Байкала как объекта всемирного природного наследия ЮНЕСКО. В представленной работе мы рассматриваем акваторию

озера Байкал и сухопутную часть ЦЭЗ как две отдельных территории. Буферная экологическая зона (БЭЗ) покрывает территорию водосбора озера Байкал в пределах границ России. Зона атмосферного влияния (ЗАВ) располагается к западу и северо-западу от озера и не затрагивает территорию его водосбора. Эта территория охватывает большинство источников атмосферного загрязнения воздуха, влияющих на природу Байкала.



Рисунок 1. Байкальская природная территория и её экологические зоны

Figure 1. Baikal Natural Territory (BNT) and its ecological zones

Данные мониторинга

Мониторинг концентраций в воздухе и потоков влажных выпадений на станции Листвянка ($51^{\circ}50'47''$ с.ш., $104^{\circ}53'34''$ в.д., рис. 1) по согласованной международной программе наблюдений ЕАНЕТ осуществляется с 2000-го года. Станция расположена на вершине холма на высоте 646 м над уровнем моря на юго-западном берегу озера. Окружающая местность представлена холмами с высотами от 600 до 900 м. На расстоянии около 1 км к юго-западу от станции расположены окрестности посёлка Листвянка, и в 4-х километрах к югу от станции находится побережье озера Байкал. Растительность представлена хвойными и лиственными лесами. Преобладающими направлениями ветра на станции являются ССЗ и СВ.

Отбор проб осадков осуществляется после каждого эпизода выпадения осадков. В случае затяжных дождей отбор производится раз в сутки. В тёплый сезон используется автоматический пробоотборник с диаметром воронки 375 мм US-320 (изготовитель – Япония), с открывающейся крышкой исключительно при наличии осадков. В холодный сезон пробоотбор осуществляется

вручную, путем сбора снега из открытой воронки или заменяющей ее емкости. Отбор проб для измерения концентраций газов и аэрозолей в воздухе проводится с помощью четырёхступенчатой кассеты с набором фильтров. Аккумуляция пробы осуществляется при прокачивании воздуха в течении недели (EANET, 2003). Метеорологические параметры, измеряемые непосредственно на станции, включают скорость и направление ветра, температуру и влажность воздуха в приземном слое. Данные о тех же и других метеорологических параметрах могут быть получены с метеорологической станции Исток Ангары, расположенной в 7 км к северо-западу от площадки отбора проб.

Химический анализ отобранных на станции Листвянка проб проводится в Лаборатории гидрохимии и атмосферной химии Лимнологического института Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск) с использованием ионной хроматографии. В ходе химического анализа атмосферных осадков измеряются концентрации 12 основных неорганических ионов, включая NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- и Cl^- , а также pH и электропроводность. В пробах атмосферного воздуха определяются концентрации газовых составляющих (SO_2 , HCl , HNO_3 , NH_3) и ионов водорастворимых фракций взвешенных частиц (NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Cl^-).

Моделирование сухого выпадения

Суммарный поток выпадений является суммой потоков сухого и влажного выпадений. Поток сухого выпадения F_d пропорционален приземной концентрации в воздухе (1). Коэффициентом пропорциональности является скорость сухого осаждения V_d , зависящая от высоты z над поверхностью:

$$F_d = C \cdot V_d(z) \quad (1)$$

Параметризация потока сухого выпадения основана на подходах, принятых в программе EANET (EANET, 2010). При вычислении скорости сухого осаждения предполагается, что частице или молекуле загрязняющего вещества, прежде чем достигнуть поверхности, надо преодолеть сопротивление приземного турбулентного слоя атмосферы $R_a(z)$, сопротивление приповерхностного квази-ламинарного слоя R_b и сопротивления поверхности R_c . Скорость сухого осаждения является обратной величиной суммы этих трёх сопротивлений (Wesely and Hicks, 1977)

$$V_d(z) = \frac{1}{R_a(z) + R_b + R_c} \quad (2)$$

Аэродинамическое сопротивление R_a рассчитывается согласно формуле (3):

$$R_a(z) = \frac{1}{k \cdot u^*} \cdot \left(\ln\left(\frac{z-d}{z_o}\right) - \Psi_h\left(\frac{z-d}{L}\right) + \Psi_h\left(\frac{z_o}{L}\right) \right) \quad (3)$$

Здесь k – безразмерная константа Кармана (0.4), z_0 – параметр шероховатости, L – масштаб длины Монина-Обухова, d – высота слоя вытеснения, u^* – скорость трения и Ψ_h – функция коррекции устойчивости атмосферы для тепла. Функции Ψ_h рассчитываются в соответствии с работой Эрисмана и Драайерса (Erisman, Draaijers, 1995). Высота слоя вытеснения d обычно оценивается как 0.7- 0.8 от высоты леса h_c (Jacobson, 1999; Kaimal and Finnigan, 1994). В данной работе принято, что $d = 0.75h_c$. Значения z_0 варьируются в зависимости от типов подстилающей поверхности и сезонности. Было использовано разделение на пять сезонов (Wesely, 1989): 1 – середина лета с пышной растительностью, 2 – осень с ещё не убраным урожаем, 3 – поздняя осень после заморозков, но без снега, 4 – зима с поверхностью, покрытой снегом, и 5 – переходный весенний сезон, когда начинают вегетировать однолетние растения. Значения z_0 , использованные в расчётах для различных типов подстилающей поверхности и сезонов, представлены в табл. 1 (EANET, 2010).

Таблица 1. Значения z_0 (м) для типов растительности в разные сезоны и высота растительности h_c (м), использованные в расчётах
Table 1. Values of z_0 (m) for vegetation types in different seasons and vegetation height h_c (m) used in the model simulations

Тип подстилающей поверхности	Сезон 1	Сезон 2	Сезон 3	Сезон 4	Сезон 5	h_c
Вечнозелёные хвойные леса	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	30.0
Листопадные хвойные леса	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	30.0
Листопадные широколиственные леса	1.05	1.05	0.95	1.05	1.05	30.0
Смешанные леса	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	30.0
Закрытые кустарники	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	5.0
Открытые кустарники	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	4.0
Лесостепи	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	10.0
Степи	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	8.0
Луга	0.1	0.1	0.05	0.02	0.05	0.0
Болота	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.0
Сельхозугодия	0.1	0.1	0.2	0.2	0.05	0.0
Городская застройка	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	5.0
Мозаика из природных/возделываемых земель	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	1.0
Снег/лёд	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
Без растительности	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.0
Водная поверхность	$f(u)$ (1)	$f(u)$ (1)	$f(u)$ (1)	$f(u)$ (1)	$f(u)$ (1)	0.0

(1): функция скорости ветра (см. формулу 10)

Сопротивление квази-ламинарного слоя R_b вычисляется согласно Эрисману и Драайерсу (Erisman, Draaijers, 1995):

$$R_b = \frac{2}{k \cdot u^*} \cdot \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (4)$$

Здесь Sc и Pr – числа Шмидта и Прандтля, соответственно.

Расчёт сопротивления поверхности R_c осуществляется в соответствии с подходом, при котором R_c складывается из ряда сопротивлений, включающих сопротивления кроны, подлеска, поверхности травы, и т.д. (Wesely, 1989). Кроме того, для SO_2 и NH_3 вводится коррекция сопротивления поверхности на влажность (Erisman, 1994; Smith, 2000). Также, в соответствии с условиями для сезона вводится учёт снежного покрова на поверхности. Скорость сухого осаждения для взвешенных частиц вычисляется по формуле (Erisman et al., 1997; ЕАНЕТ, 2010):

$$V_d = \left(\frac{1}{V_{ds}} + R_a \right)^{-1} + V_s \quad (5)$$

Где V_{ds} – так называемая приземная скорость выведения, и V_s – скорость осаждения за счёт гравитации. V_s рассчитывается по формуле (Seinfeld, Pandis, 2016):

$$V_s = \frac{\rho_p \cdot D_p^2 \cdot g \cdot C_c}{18 \cdot \mu} \quad (6)$$

В формуле (6) ρ_p – плотность частиц, D_p – диаметр частиц, μ – динамическая вязкость воздуха, g – ускорение свободного падения и C_c – поправка Каннингхема на проскальзывание.

Расчётные формулы для приземной скорости выведения V_{ds} зависят от типа подстилающей поверхности. Для поверхностей, покрытых низкой растительностью (например, луга, сельхозугодия), применяется следующая параметризация для устойчивой и нейтральной (7) и неустойчивой (8) стратификации приземной атмосферы (Wesely et al., 1985):

$$V_{ds} = u^* / 500 \quad (7)$$

$$V_{ds} = (u^* / 500) \cdot \left[1 + \left(\frac{300}{-L} \right)^{2/3} \right] \quad (8)$$

Для поверхностей, покрытых высокой растительностью (леса, кустарники, редколесья) для расчёта V_{ds} применяется другая формула (Ruijgrok et al., 1997):

$$V_{ds} = E \cdot (u^{*2} / u_h) \quad (9)$$

здесь E – эффективность захвата и u_h – скорость ветра на уровне высоты растительности. Параметризация эффективности захвата различается для

отдельных компонентов частиц (сульфаты, нитраты, аммоний, основные катионы) и для сухой и влажной подстилающей поверхности.

Около 9% территории БПТ представляет собой водную поверхность. Методика ЕАНЕТ по оценке потоков выпадений предназначена только для поверхностей суши, поэтому для учёта сухих выпадений на водную поверхность применялись подходы, представленные в других работах (Zhang et al., 2002, 2003). Скорость сухого выведения газовых компонент также рассчитывается по формуле (1). При этом учитывается зависимость параметра шероховатости от скорости ветра (Garrat, 1999):

$$z_0 = a_c \cdot u^* + 11.0 \cdot \nu / u^* \quad (10)$$

Здесь a_c – константа Чарнока (≈ 0.016 с) и ν – кинематическая вязкость воздуха.

Сопrotивление поверхности оценивается по формуле (Zhang et al, 2002, 2003):

$$\frac{1}{R_c} = \frac{\alpha}{R_{gSO_2}} + \frac{\beta}{R_{gO_3}} \quad (11)$$

В (11) α и β являются специфическими для каждого газ безразмерными параметрами, R_{gSO_2} ($10 \text{ с} \cdot \text{м}^{-1}$) и R_{gO_3} ($2000 \text{ с} \cdot \text{м}^{-1}$) являются сопротивлениями поверхности воды для SO_2 и озона, соответственно. Для SO_2 и NH_3 α и β равны 1 и 0, и для HNO_3 10 и 10, соответственно (Zhang et al., 2002).

Для расчёта скорости сухого выведения частиц на водные поверхности разработан ряд схем (Slinn, Slinn, 1980; Williams et al., 1982; Zhang et al., 2001; Petrov, Zhang, 2010; Pleim, Ran, 2010; Kouznetsov, Sofiev, 2012; Zhang, Shao, 2014; Zhang, He, 2014). В работе Кана и Перлингера (Khan, Perlinger, 2017) представлены результаты сравнения различных схем сухого выведения на водные поверхности с измеренными значениями. Было показано, что при использовании схемы (Zhang, He, 2014) продемонстрировано наименьшее отклонение от измеренных величин. Для частиц размером менее 2.5 мкм (ТЧ2.5) V_{ds} рассчитывается следующим образом:

$$V_{ds} = a_1 \cdot u^* \quad (12)$$

Здесь a_1 – безразмерный эмпирический коэффициент, зависящий от типа подстилающей поверхности и равный для воды 6.9×10^{-3} . В работе предполагается, что сульфаты, нитраты и аммоний представлены в основном частицами размером до 2.5 мкм. Измеренные на станции Листвянка месячные медианные значения концентраций ТЧ2.5 варьируются от 4 до 12 $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$, а ТЧ10 – от 5 до 13 $\text{мкг} \cdot \text{м}^{-3}$, таким образом подтверждая преобладание частиц 2.5 мкм (Шиховцев и др., 2023). Аналогичный вывод можно сделать на основании результатов измерений в Байкальском регионе, представленных в работе Dementeva et al. (2022). Однако, важно отметить, что в случае природных пожаров вклад более крупных частиц (от 2.5 до 10 мкм) в концентрации

ТЧ10 в воздухе может значительно возрастать (Dementeva et al., 2022; Жамсуева и др., 2022; Popovicheva et al., 2021).

Расчёт скорости сухого осаждения для района станции Листвянка проводился для трёх типов подстилающей поверхности: хвойный лес, луг и водная поверхность. Для оценки потоков выпадений на БПТ и её отдельные экологические зоны, сделанной для 2020 года, была введена модельная сетка с шагом $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ по долготе/широте для территории от 48° до 58° с.ш. и от 101° до 114° в.д. Метеорологические данные, данные о типах подстилающей поверхности и данные измерений концентраций в осадках, использованные для расчётов потоков выпадений, описаны ниже.

Моделирование влажных выпадений

Поток влажного выпадения F_w рассчитывается как произведение концентрации в осадках C_{prec} и суммы осадков P (13):

$$F_w = C_{prec} \cdot P \quad (13)$$

Для станции Листвянка F_w рассчитывался с использованием измеренных величин концентраций в осадках ионов сульфатов, нитратов и аммония. Для анализа потоков влажных выпадений на территорию БПТ привлекались данные измерений, полученных на сети мониторинга химического состава осадков, работающей под научно-методическим руководством Главной геофизической обсерватории им. Воейкова (ГГО) (рис. 2). Были рассмотрены данные с двадцати одной станции, расположенной на территории или вблизи БПТ и относящейся к Иркутскому, Забайкальскому, Якутскому и Среднесибирскому УГМС (Першина и др., 2021).

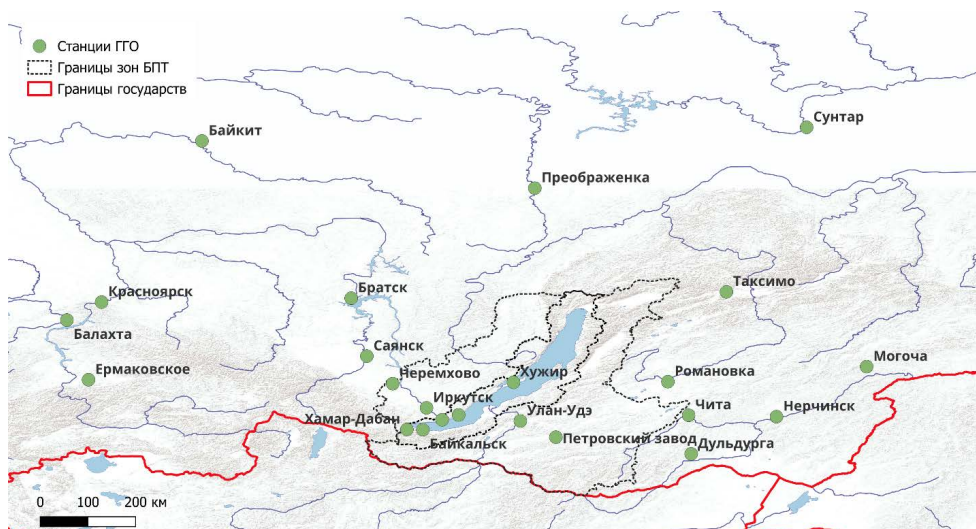


Рисунок 2. Расположение станций мониторинга химического состава осадков в Восточной Сибири

Figure 2. Location of precipitation chemical composition monitoring stations in Eastern Siberia

В соответствии с методологией, принятой в ГГО, средние за год концентрации в осадках рассчитываются как средневзвешенная величина среднемесячных концентраций (c_i), и в качестве веса используются месячные суммы осадков P_i (14):

$$C_{prec} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (14)$$

Данные измерений концентраций в осадках на станциях были интерполированы на регулярную сетку с шагом $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ используя метод обратных расстояний. Предполагалось, что вес каждой станции в каждой ячейке сетки пропорционален концентрации на станции и обратному квадрату расстояния между станцией и серединой ячейки сетки. Далее, поток влажных выпадений в каждой ячейке рассчитывался как произведение интерполированных концентраций и годовых сумм осадков в каждой ячейке.

Метеорологическая информация

Метеорологические данные для расчётов выпадений на станции Листвянка и на БПТ получены на основе результатов ре-анализа ERA5-Land с пространственным разрешением $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (Muñoz Sabater, 2019). В частности, использовались температура воздуха и точка росы на высоте 2 м, скорость ветра на высоте 10 м, приземное давление, приземная приходящая коротковолновая радиация, толщина снежного покрова и толщина озёрного льда. Кроме того, поле полной облачности с исходным разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ было проинтерполировано на сетку $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Для получения информации о толщине снежного покрова для водных и прибрежных ячеек сетки использовалась информация о снежном покрове, полученная в ходе полевых снегомерных измерений в России (<http://meteo.ru/>).

Средние за месяц значения температуры воздуха, толщины снега и льда, скорости ветра, и суммарных за месяц осадков в БПТ и её отдельных зонах показаны на рис. 3. Байкальский регион характеризуется резкоконтинентальным климатом с жарким влажным летом и холодной сухой зимой. Максимальные температуры над сухопутной частью БПТ отмечаются в июле, минимальные – в январе (рис. 3а). Из-за медленного прогревания значительной водной массы байкальской воды максимум температуры воздуха над озером Байкал сдвинут на август (Латышева и др., 2009). Согласно данным ERA5, Байкал покрывается льдом в конце декабря – начале января, а разрушение ледяного покрова происходит в мае (рис. 3б). Это согласуется с результатами исследования ледяного покрова Байкала на основе спутниковых данных (Kouraev et al., 2007). Отопляющее воздействие открытой воды Байкала в ноябре-декабре приводит к температуре на $7-8^\circ\text{C}$ выше над водой в сравнении с температурой воздуха над сушей. Тёплый период продолжается с апреля по октябрь. Внутригодовой ход скорости ветра характеризуется наличием двух

максимумов и двух минимумов (рис. 3в). Осенний максимум объясняется усилением зонального переноса, большими местными градиентами температуры и давления между относительно тёплой поверхностью озера Байкал и относительно холодной суши (Латышева и др., 2009). После того, как озеро покрывается льдом, градиенты ослабевают, и скорость ветра становится минимальной. Второй максимум весной обусловлен усилением атмосферной циркуляции. Месячные суммы осадков имеют максимум летом и минимум зимой (рис. 3г). Осадки тёплого периода (100-150 мм/месяц) на порядок выше, чем осадки в холодный период (10-30 мм/месяц) из-за преобладания высокого давления зимой. Для станции Листвянка характер изменения метеорологических характеристик в целом тот же, что и для БПТ (рис. 4).

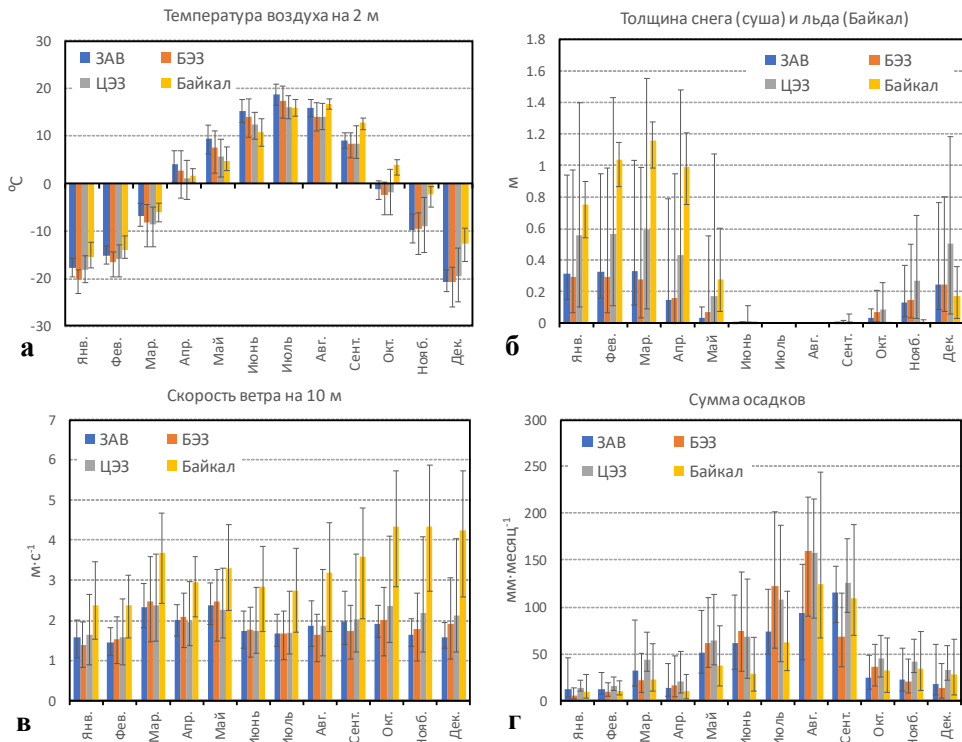


Рисунок 3. Средние за месяц осреднённые по пространству приземная температура (а), толщина снега или льда (б), приземная скорость ветра (в) и месячные суммы осадков (г) в различных зонах БПТ в 2020 г. «Усы» показывают разброс величин по пространству между 5-м и 95-м процентилими

Figure 3. Monthly mean spatially averaged near-surface air temperature (a), snow or ice depth (b), near-surface wind velocity (c) and monthly precipitation sums (d) in different zones of BNT in 2020. “Whiskers” depict the range between 5th and 95th percentiles across the area

Если для оценки потоков сухих выпадений ключевым параметром является пространственное распределение типов подстилающей поверхности, влажные выпадения определяются распределением атмосферных осадков. Наиболее высокие величины годовых сумм осадков, превышающих 1000 мм, отмечаются в северо-восточной и западной частях БПТ (рис. 5). Кроме того, определённое увеличение сумм осадков (800-1000 мм) имеет место в

южной части рассматриваемого региона. Орографический эффект обуславливает сравнительно высокие величины осадков в горных районах БПТ. Над центральной частью БПТ и над озером Байкал годовые суммы осадков, как правило, ниже 600 мм.

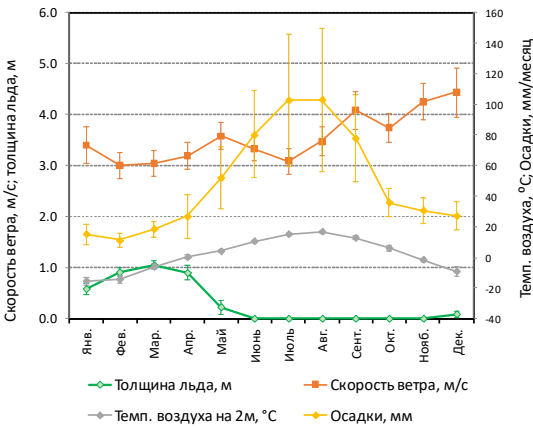


Рисунок 4. Месячные суммы осадков, средние за месяц температура воздуха, скорость ветра и толщина снега и льда на станции Листвянка, осреднённые за 2004-2023 год

Figure 4. Monthly precipitation sums, monthly mean air temperature, wind velocity and snow and ice depth at the Listvyanka station, averaged over the 2004-2023 period

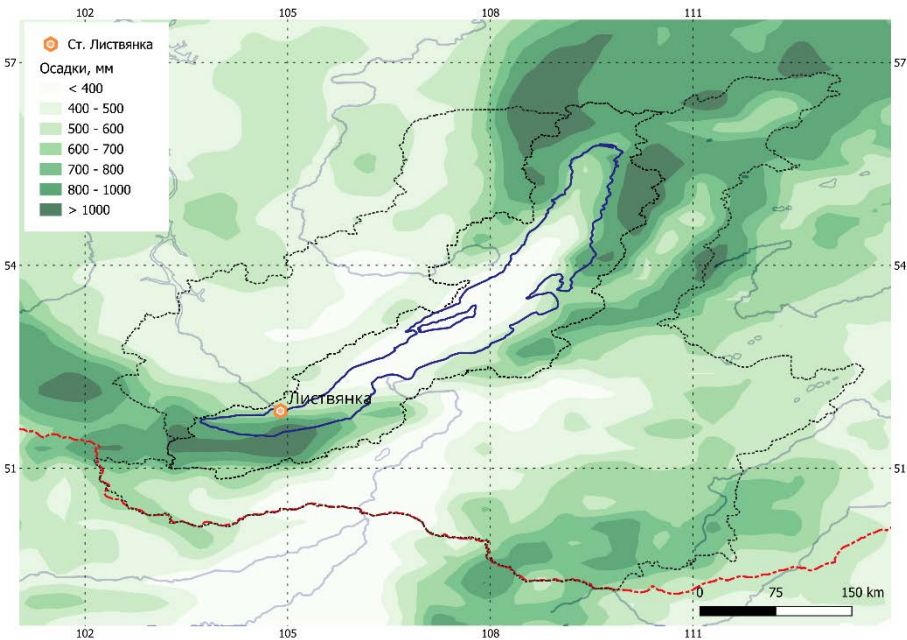


Рисунок 5. Пространственное распределение сумм осадков в 2020 году над БПТ

Figure 5. Spatial distribution of precipitation sums in 2020 over BNT

Данные по подстилающей поверхности

Параметризация потоков сухих выпадений подразумевает необходимость применения данных о типах подстилающей поверхности в БПТ. В работе были использованы данные по типам подстилающей поверхности, полученные с помощью спутниковых измерений MODIS (код продукта MCQ12Q1) (Sulla-Menashe, Friedl, 2018). Набор данных содержит сеточные данные с шагом 500 м для всего земного шара. Набор MODIS предлагает данные по типам подстилающей поверхности, представленные в нескольких классификациях. В данной работе использовалась классификация IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme – Международная геосферно-биосферная программа), согласно которой выделяется 17 типов подстилающей поверхности. Из них 16 типов встречаются в пределах БПТ.

Доли площадей, занимаемых отдельными группами типов подстилающей поверхности в границах БПТ и её экологических зонах (кроме акватории озера Байкал), приведены в табл. 2. Группа «леса», включающая хвойные вечнозелёные, хвойные листопадные, листопадные широколиственные и смешанные леса, занимают около 27% площади БПТ. Группа «кустарники и степи» включает степи, лесостепи, сплошные и разреженные кустарники и покрывает 44% площади БПТ. Группа «низкая растительность» представлена лугами, сельхозугодиями, болотами и мозаикой обрабатываемых и природных земель. Остальные типы подстилающей поверхности (земли, лишённые растительности, городская застройка, ледники, поверхность воды, включающая акваторию Байкала) включены в группу «Другие». Их доля составляет около 10% площади.

Таблица 2. Доля площади БПТ (%), занимаемая типами подстилающей поверхности, полученная на основе данных MODIS. Жирный шрифт: группы типов подстилающей поверхности, курсив – типы подстилающей поверхности по классификации IGBP

Table 2. BNT area fraction (%) covered by land cover types based on the MODIS data. Bold: groups of land cover types, italic – land cover types according to IGBP classification

Типы подстилающей поверхности	ЗАВ	БЭЗ	ЦЭЗ	Озеро Байкал	Суммарно для БПТ
<i>Леса</i>	38.2	24.5	35.8	0.0	27.3
Хвойные вечнозелёные	6.5	3.9	14.3	0.0	5.8
Хвойные листопадные	11.5	12.3	6.1	0.0	10.1
Листопадные широколиственные	2.3	1.0	0.4	0.0	1.1
<i>Смешанные</i>	17.8	7.5	14.9	0.0	10.4
Кустарники и степи	46.3	52.0	38.1	0.0	44.1
Сплошные кустарники	0.0	0.0	0.011	0.0	0.0
Разреженные кустарники	0.4	0.7	2.6	0.0	0.9
Лесостепь	44.2	37.6	28.5	0.0	34.4
Степь	1.7	13.7	7.0	0.0	8.8

Типы подстилающей поверхности	ЗАВ	БЭЗ	ЦЭЗ	Озеро Байкал	Сум-марно для БПТ
<i>Низкая растительность</i>	14.2	22.4	20.9	0.0	18.4
Луга	9.7	22.1	19.8	0.0	17.1
Болота	0.1	0.1	1.0	0.0	0.2
Сельхозугодия	4.0	0.2	0.1	0.0	1.0
Мозаика обрабатываемых/ природных земель	0.4	0.002	0.006	0.0	0.1
Другие	1.3	1.0	5.2	100.0	10.2
Городская застройка	0.9	0.5	0.1	0.0	0.5
Снег и лёд	0.000	0.012	0.004	0.0	0.007
Лишённые растительности	0.035	0.300	0.347	0.0	0.2
Водные объекты	0.4	0.2	4.7	100.0	9.4

Примеры пространственного распределения групп «Леса» и «Низкая растительность» на регулярной сетке приведены на рис. 6. Наибольшая пространственная плотность лесов (>60% от площади ячеек сетки) отмечается в северо-восточной, юго-западной и западной частях ЗАВ, вдоль юго-восточного побережья Озера Байкал и в западной части ЦЭЗ, а также в южной части БЭЗ. Области с низкой растительностью преобладают в основном в центральной и западной частях ЗАВ и в центральной и северо-восточной частях БЭЗ.

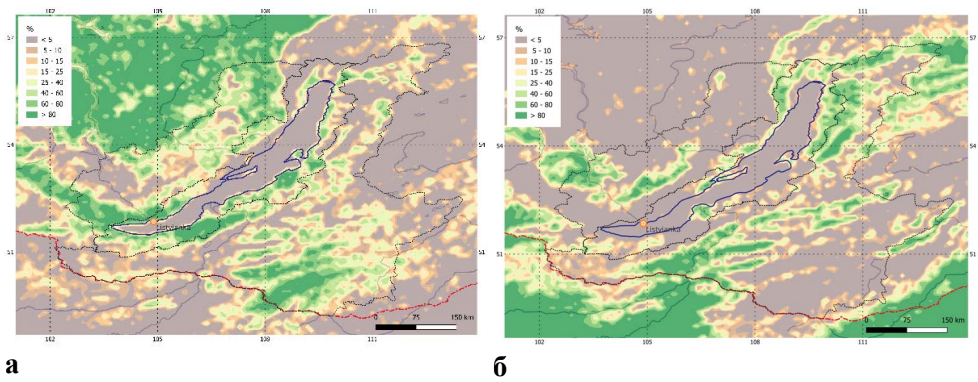


Рисунок 6. Пространственное распределение доли (%) в ячейках сетки групп типов подстилающей поверхности «Леса» (а) и «Низкая растительность» (б) в БПТ

Figure 6. Spatial distribution of gridcell area fractions (%) of type groups “Forests” (a) and “Low vegetation” (b) in BNT

Результаты

Поток выпадений на станции Листвянка в 2004-2021 гг.

Суммарные выпадения окисленной серы, окисленного и восстановленного азота на станции Листвянка были оценены для трёх типов подстилающей поверхности: поверхность с высокой растительностью (хвойный лес),

поверхность с низкой растительностью (луг) и водная поверхность. Оценки проведены для периода с 2004 по 2023 год.

На рис. 7 показаны средние за месяц скорости сухого осаждения серы и азота в газовой и аэрозольной (в виде частиц) фазах, а также интервал изменений среднемесячных величин с 2004 по 2023 г. Скорость сухого осаждения SO_2 на лес и луг демонстрирует явно выраженную сезонную изменчивость с наиболее низкими значениями (около 0.15 для луга и $0.3\text{--}0.4 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$) в холодный период и с наиболее высокими значениями весной и ранней осенью (рис. 7а). Максимальные значения V_d для леса составляют $2.9 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$, а для луга – $1.2 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. Главным фактором, влияющим на сезонные изменения V_d , является сезонная изменчивость поверхностного сопротивления R_c , вычисляемого согласно (11) (Wesely, 1989; EANET, 2010). Скорость сухого осаждения SO_2 на водную поверхность достигает самых низких значений (около $0.1 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$) в период с января по апрель. Это объясняется тем, что в это время Байкал покрыт льдом, а скорость сухого осаждения на лёд ниже, чем на воду.

Среднемесячные значения скорости сухого осаждения аэрозольной серы на поверхности с высокой растительностью достигает минимума в феврале ($0.4 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$), а наибольшие – в декабре ($0.9 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$) (рис. 7б). Согласно параметризации (Ruijgrok, 1997), поверхностная скорость выпадения пропорциональна $(u^*)^2$, и обратно пропорциональна скорости ветра (см. формулу 9). Так как скорость трения также пропорциональна скорости ветра, то можно считать, что V_{ds} прямо пропорциональна скорости ветра. Кроме того, эффективность захвата, в свою очередь, также пропорциональна $(u^*)^p$, где показатель степени p варьируется от 0.25 до 0.45 в зависимости от конкретного загрязнителя и влажности подстилающей поверхности. Средние за месяц скорости ветра на ст. Листвянка имеют изменчивость, схожую с изменчивостью для V_d для леса (рис. 4). Скорость сухого осаждения для луга зависит от скорости ветра (через u^*) и от устойчивости атмосферы (см. формулы 7, 8). Комбинация этих факторов приводит к тому, что наибольшая среднемесячная скорость сухого осаждения достигается в июне ($0.4 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$), а наименьшая – в декабре (около $0.2 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$). Скорость сухого осаждения на водную поверхность пропорциональна скорости трения (формула 12). Следовательно, её сезонная изменчивость соответствует изменчивости скорости ветра (рис. 4). Скорость сухого осаждения других соединений, представленных в форме частиц, т.е., окисленного азота и аммония, на воду и луг (рис. 7 г, е) такие же, как и у окисленной серы, и немного различаются для леса.

Сезонная изменчивость скорости сухого осаждения газообразного окисленного азота (HNO_3) на лес значительно отличается от скорости для SO_2 (рис. 7в). Благодаря очень высокой растворимости азотной кислоты её приземное сопротивление практически пренебрежимо мало по сравнению с аэродинамическим и квази-ламинарным сопротивлением. Следовательно, скорость сухого осаждения HNO_3 становится пропорциональным скорости трения, и её сезонная изменчивость в целом совпадает с сезонной изменчивостью скорости приземного ветра. Подобное объяснение также приемлемо для описания сезонного хода скорости сухого осаждения на луг. Однако, необхо-

димо принимать в расчёт то, что параметр шероховатости для холодного периода, использованный при моделировании, ниже, чем для тёплого (табл. 1). Это приводит к снижению значений скорости сухого осаждения в холодный период по сравнению с тёплым периодом, и формированию максимума скорости сухого осаждения ($1.6 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$) в сентябре.

Сезонные изменения скорости сухого осаждения NH_3 в целом схожи с SO_2 (рис. 7д). Максимальные среднемесячные значения V_d для леса ($0.45 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$) и луга ($0.35 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$) имеют место в тёплый период, а минимальные – в холодный период ($0.1 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ и $0.15 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, соответственно). Эффективная растворимость у NH_3 меньше, чем у SO_2 и HNO_3 , что приводит к более высокому поверхностному сопротивлению. Согласно применяемой в ЕАНЕТ параметризации сухого выведения (ЕАНЕТ, 2010), поверхностное сопротивление R_c аммиака на порядок выше, чем R_a и R_b . Это, в свою очередь, приводит к более низкой скорости сухого осаждения аммиака по сравнению со значениями для диоксида серы и азотной кислоты. Скорость сухого осаждения аммиака на воду сопоставима со значениями для SO_2 и HNO_3 и зависит от растворимости и метеорологических условий. Максимальные среднемесячные значения V_d (около $0.3 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$) отмечаются в сентябре и ноябре, а минимальные ($0.04 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$) получены для января и февраля, что объясняется выпадением на поверхность льда.

Рассчитанные потоки выпадений окисленной серы, окисленного и восстановленного азота на водную поверхность, луг и хвойный лес на станции Листвянка показаны на рис. 8. Годовые суммы выпадений серы на водную поверхность составляют от 260 до $730 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ в период с 2004 по 2024 год (рис. 8а). Среднее значение за рассматриваемый период составляет $470 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Вклады сухого и влажного выведения в суммарный поток в среднем почти равны. Рассчитанные годовые потоки выпадений на луг варьируются от 360 до $1320 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ со средним значением $690 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (рис. 8б). Так как поток влажных выпадений не зависит от типа подстилающей поверхности, то вклад сухих выпадений на луг выше, чем на поверхность воды, и составляет 67% в среднем. Вклад сухих осадений в суммарные выпадения на лес ещё выше и составляют около 85% в среднем (рис. 8в). Значения потока суммарных годовых выпадений серы на лес на станции Листвянка находится в диапазоне от 650 до $3000 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, и при этом среднее многолетнее значение составило $1370 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Большая часть потока сухого осаждения обусловлена вкладом серы в газовой фазе, в то время как вклад аэрозольной серы составляет несколько процентов. Сравнительно низкий вклад частиц в выпадения объясняется, во-первых, более низкой концентрацией сульфата в воздухе на станции по сравнению с концентрацией диоксида серы, и, во-вторых, более низкой скоростью сухого осаждения. Поток сухого осаждения серы (в газовой и аэрозольной фазах) на водную поверхность почти вдвое ниже, чем на луг, и примерно в пять раз ниже, чем на лес. Рассчитанные потоки сухого осаждения серы сопоставимы с оценками (около $368 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$), приведёнными в более ранних работах (Голобокова и др., 2007).

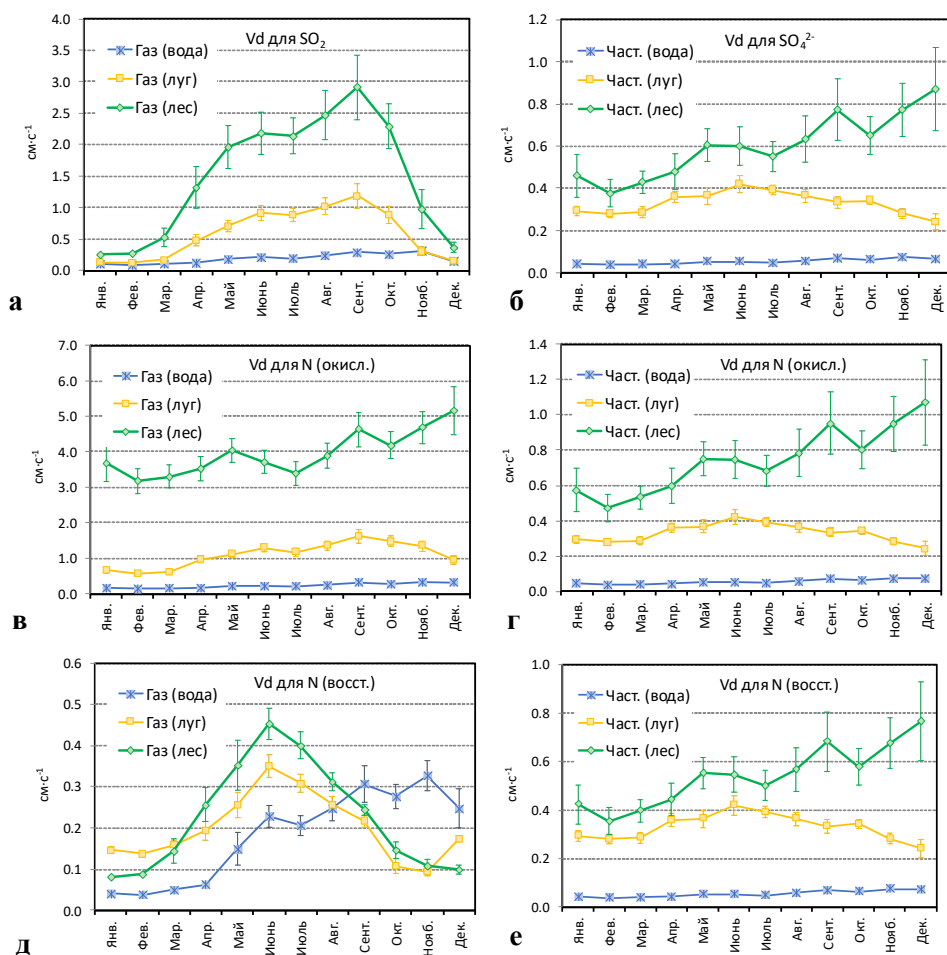


Рисунок 7. Скорости сухого осаждения (среднемесячные значения, осреднённые за 2004–2023 г. и их разброс за этот период) газовых (слева) и аэрозольных (справа) соединений серы (а,б), окисленного азота (в,г) и восстановленного азота (д,е) на станции Листвянка

Figure 7. Dry deposition velocities (monthly mean values averaged over 2004–2023, and the range over the period) of gaseous (left) and particulate (right) sulfur (a,b), oxidized nitrogen (c,d) and reduced nitrogen (e,f) compounds at the Listvyanka station

Годовой поток суммарных выпадений окисленного азота на водную поверхность в районе станции Листвянка в 2004–2023 гг. изменяется от 60 до 210 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ при среднем за период значении 90 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (рис. 8 г). Влажные выпадения являются основным вкладчиком в суммарные выпадения, и их доля составляет около 95%. Суммарные за год выпадения на травяную растительность (луг) и на хвойный лес меняются от 70 до 235 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (110 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ в среднем) и от 119 до 470 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (180 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ в среднем), соответственно (рис. 8 де). Вклад сухих выпадений в суммарную величину выпадений для луга сравнительно невелик (около 20% в среднем), и сопоставим с вкладом влажных выпадений на лес (около 50% в среднем). Подобно сере, вклад окисленного азота в газовой фазе (HNO_3) на порядок выше, чем

вклад аэрозольного азота (NO_3^-). Поток сухих выпадений на водную поверхность в 4.6 раза ниже потока на луг, и почти в 17 раз чем на лес. Рассчитанный поток сухих выпадений азота на станции Листвянка несколько ниже, чем оценки для периода с 2000 по 2006 гг. в $116 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (Голобокова и др., 2007).

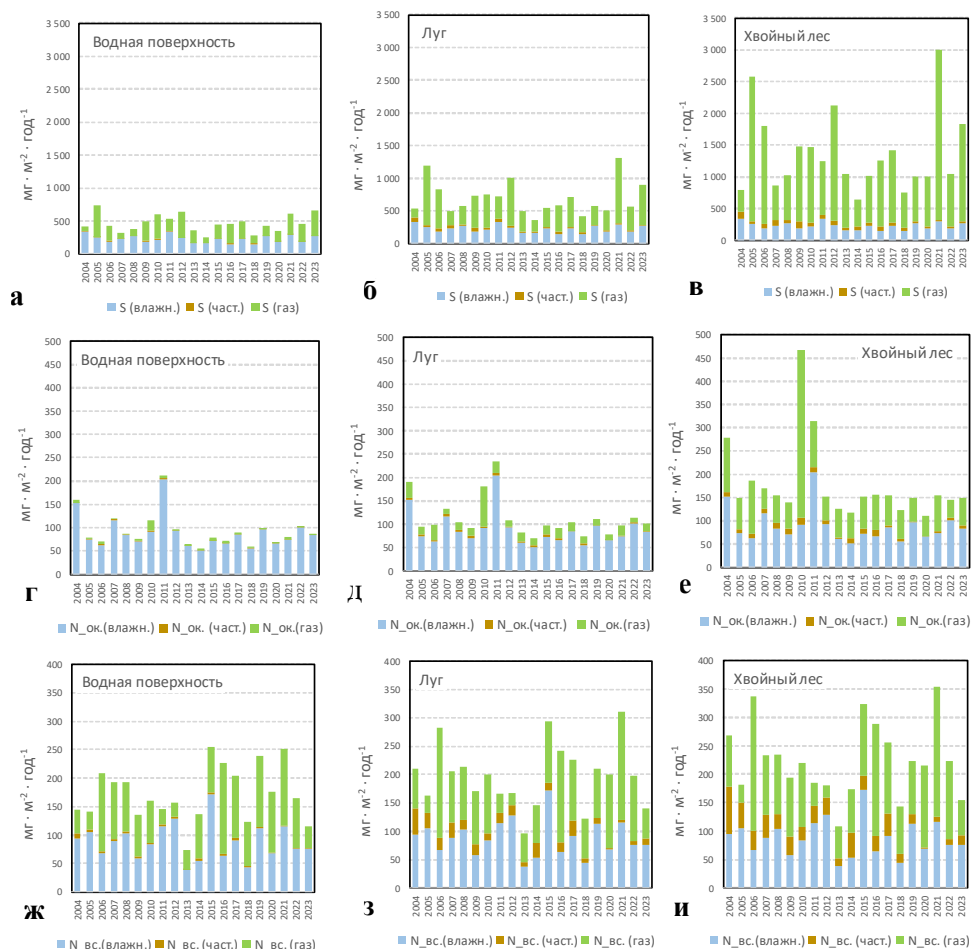


Рисунок 8. Суммарные годовые потоки выпадений серы (S), окисленного азота ($\text{N}_{\text{ок}}$) и восстановленного азота ($\text{N}_{\text{вс}}$), разделённые на потоки сухих осадений частиц (част.), газов (газ) и влажных выпадений (влажн.) на водную поверхность, луг и хвойный лес на станции Листвянка

Figure 8. Total annual deposition fluxes of sulfur (S), oxidized nitrogen ($\text{N}_{\text{ок}}$) and reduced nitrogen ($\text{N}_{\text{вс}}$) split into dry deposition fluxes of particles (част.), gases (газ) and wet deposition fluxes (влажн.) to water surface (водная поверхность), grassland (луг) and coniferous forests (хвойный лес) at Listvyanka station

Средний поток суммарных выпадений восстановленного азота на водную поверхность, луг и хвойный лес на станции Листвянка равен 170, 200, $225 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, соответственно (рис. 8 ж,з,и). Соответствующие диапазоны значений годовых величин потоков составляют 70-255, 100-310 и $110-350 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. В отличие от серы и окисленного азота, величина вклада сухих выпадений в суммарный поток выпадений близка для всех трёх типов подстилающей

поверхности, и составляет в среднем 50%, 56% и 60% на воду, луг и лес, соответственно. Это объясняется тем, что скорости сухого осаждения NH_3 на разные типы подстилающей поверхности сопоставимы. Так как измеренные концентрации NH_3 значительно выше, чем для NH_4^+ , то и вклад газовой фазы в сухие выпадения восстановленного азота значительно выше, чем вклад аэрозольного восстановленного азота. В отличие от серы и окисленного азота, различия в величине потоков сухих выпадений восстановленного азота на рассмотренные типы подстилающей поверхности сравнительно невелики. Потоки сухих выпадений на луг на 30% и леса на 60% выше, чем на водную поверхность.

Пространственное распределение выпадений в границах БПТ в 2020 г

Пространственное распределение потоков суммарных выпадений зависит от ряда факторов, среди которых наиболее значимыми являются распределения типов подстилающей поверхности, режима и значений метеорологических параметров (особенно атмосферных осадков) и концентраций измеряемых веществ в осадках.

Наиболее высокие значения потоков сухих выпадений окисленной серы, окисленного и восстановленного азота в пределах БПТ отмечаются для южного побережья Озера Байкал (рис. 9 а,б). Относительно высокие потоки сухих выпадений в юго-восточной части БЭЗ объясняются сравнительно высокими средними скоростями ветра, приводящими к более высокой скорости трения и, следовательно, к более высоким значениям скорости сухого осаждения. Потоки выпадений серы и окисленного азота на водную поверхность сравнительно невелики. Схожие величины потоков сухих выпадений отмечаются для северо-восточной и юго-западной частей БЭЗ, что согласуется с пространственным распределением областей с низкой растительностью в этом регионе (рис. 6). Так как скорость сухого осаждения восстановленного азота менее чувствительна к особенностям подстилающей поверхности по сравнению с окисленной серой и азотом, то её пространственное распределение выглядит более сглажено (рис. 9ж).

Пространственные распределения потоков влажных выпадений всех трёх рассматриваемых соединений схожи. Сравнительно высокие уровни, встречающиеся в северо-восточной части БПТ, в западной части ЦЭЗ и ЗАВ в южной части БЭЗ (рис 9 б,д,з), обусловлены сравнительно высокими суммами осадков (рис. 5). Область высоких потоков влажных выпадений в восточной части БЭЗ объясняется высокими концентрациями компонентов на станции мониторинга в районе г. Чита. Аналогично, сравнительно высокие величины потоков выпадений серы в западной части ЗАВ обусловлены концентрациями, измеренными на станции Черемхово. Кроме того, высокие влажные выпадения аммония в западной части ЦЭЗ и ЗАВ являются комбинацией двух факторов – высоких значений концентраций, измеренных на станции Хамар-Дабан, и значительных годовых сумм осадков (> 1000 мм).

Суммарные выпадения серы варьируются в основном от 400 до 1400 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}$ (рис. 9в). Наибольшие величины потоков, превышающие 1400

$\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$, отмечаются на юго-западном побережье озера Байкал. Самые низкие потоки серы ($<400 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$) характерны для водной поверхности центральной части Байкала. Поток суммарных выпадений окисленного азота на большей части расчётной области лежит в пределах от 50 до $500 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ (рис. 9е). В восточной части БПТ отмечаются самые высокие потоки окисленного азота, составляющие от 200 до $500 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$, а вблизи Читы превышающие $500 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$. Над центральной частью озера Байкал потоки преимущественно ниже $50 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$. На большей части БПТ поток восстановленного азота составляет от 200–450 $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ (рис. 9и). В западной части ЗАВ и ЦЭЗ, а также в БЭЗ вблизи Читы потоки восстановленного азота превышают $450 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$. Величины потоков на большей части акватории Байкала и в центральной части БЭЗ ниже $200 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$.

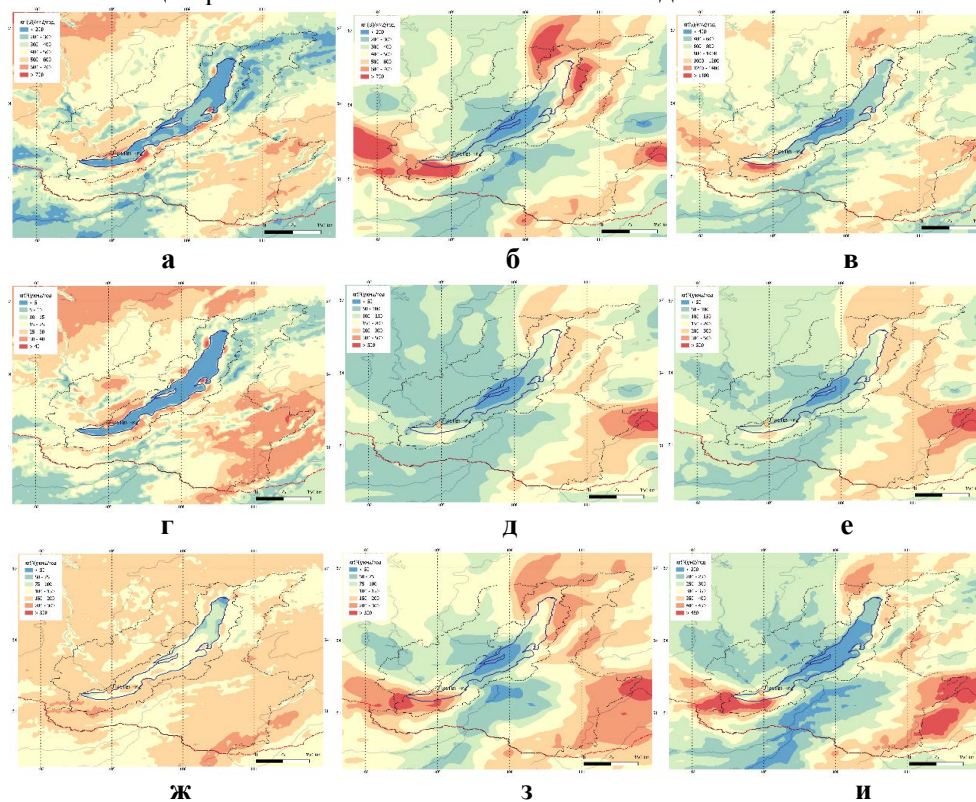


Рисунок 9. Пространственное распределение потоков сухих (слева), влажных (в центре) и суммарных (справа) выпадений серы (вверху), окисленного азота (в центре) и восстановленного азота (внизу) в 2020 году на БПТ

Figure 9. Spatial distribution of dry (left), wet (middle) and total (right) deposition fluxes of sulfur (top), oxidized nitrogen (middle) and reduced nitrogen (bottom) in 2020 over BNT

Оценки суммарных выпадений на БПТ

Результаты расчётов пространственного распределения выпадений на БПТ послужили основой для оценок среднего поступления серы и азота из атмосферы в границы зон БПТ. Рассчитанные суммарные выпадения серы, окисленного азота и восстановленного азота в 2020 году составили 40, 86 и

122 кг, соответственно, на всю площадь БПТ. Средние потоки сухого и влажного выпадения в выделенных зонах БПТ и на поверхность озера Байкал представлены в табл. 3. Средние потоки выпадений на сухопутные зоны БПТ составляют 1300-1400 мг·м⁻²·год⁻¹, что примерно вдвое выше, чем поток на акваторию Байкала. Подобное соотношение также отмечается для потоков окисленного азота, составляющих в среднем 200-270 мг·м⁻²·год⁻¹ для зон суши и около 100 мг·м⁻²·год⁻¹ для поверхности озера Байкал. По сравнению с серой и окисленным азотом, у восстановленного азота это отношение ниже. В целом, более низкие потоки выпадений на водную поверхность Байкала объясняются меньшими суммами осадков и меньшей скоростью сухого осаждения на водную поверхность.

Таблица 3. Потоки выпадений (мг·м⁻²·год⁻¹) серы, окисленного и восстановленного азота на сгруппированные типы подстилающей поверхности в отдельных зонах БПТ в 2020 году. «Сухие ср.-взвеш.» и «Влажные ср.-взвеш.» обозначают средневзвешенные по площади потоки сухих и влажных выпадений, соответственно

Table 3. Sulfur (Серa), oxidized nitrogen (Окисленный азот) and reduced nitrogen (Восстановленный азот) deposition fluxes (mg·m⁻²·a⁻¹) to grouped land cover types in BNT zones in 2020. «Сухие ср.-взвеш.» и «Влажные ср.-взвеш.» denote area-weighted dry and wet deposition fluxes, respectively

Тип подстилающей поверхности	Серa				Окисленный азот				Восстановленный азот			
	ЗАВ	БЭЗ	ЦЭЗ	Бай-кал	ЗАВ	БЭЗ	ЦЭЗ	Бай-кал	ЗАВ	БЭЗ	ЦЭЗ	Бай-кал
Леса (сухие)	938	945	1079	0	104	108	125	0	192	203	205	0
Леса (влажные)	424	433	484	0	100	160	126	0	121	131	156	0
Кустарники и степи (сухие)	1041	1059	1049	0	124	130	129	0	205	223	223	0
Кустарники и степи (влажные)	387	444	494	0	90	181	134	0	99	157	157	0
Низкая раст-ть (сухие)	427	376	377	0	34	30	32	0	170	146	156	0
Низкая раст-ть (влажные)	417	386	546	0	86	139	166	0	88	128	177	0
Остальные (сухие)	941	750	291	371	25	24	12	14	95	86	103	150
Остальные (влажные)	442	419	397	321	82	167	106	89	80	143	125	101
Сухие ср.-взвеш. по всем типам	913	875	880	371	102	101	101	14	194	199	196	150
Влажные ср.-взвеш. по всем типам	406	428	496	321	93	166	136	89	106	144	159	101
Средний поток суммарных выпадений	1320	1303	1376	691	195	267	237	103	299	343	355	251

Среднее отношение влажных выпадений серы к сухим выпадениям над сушей составляет от 1.8 (ЦЭЗ) до 2.2 (ЗАВ). Для окисленного азота это отношение лежит в диапазоне от 0.6 (БЭЗ) до 1.1 (ЗАВ), а для восстановленного азота – от 1.2 (ЦЭЗ) до 1.8 (ЗАВ). Это отношение наиболее высокое для ЗАВ в силу двух причин. Во-первых, ЗАВ характеризуется самыми низкими суммами осадков по сравнению с другими зонами БПТ. В 2020 году осреднённая по территории ЗАВ сумма осадков составляет 530 мм, в то время как в БЭЗ эта величина равна примерно 610 мм, а для ЦЭЗ – 740 мм. Кроме того, в ЗАВ высокая растительность (леса) занимает значительно большую долю площади по сравнению с другими зонами (рис. 6).

На рис. 10 показаны вклады влажной и сухой компоненты в суммарный поток выпадения серы и азота на сгруппированные типы подстилающей поверхности в отдельных зонах БПТ. Основной вклад приходится на выпадения на леса и редколесья, чьё совместное поступление составляет 80-90%. Очевидно, что такой значительный вклад объясняется большой долей площади, занимаемой лесами и редколесьями (>70%), а также большей скоростью сухого выпадения по сравнению с другими типами подстилающей поверхности. В БЭЗ относительная площадь лесов ниже, а доля кустарников и степей – выше в сравнении с ЗАВ и ЦЭЗ, что приводит к несколько меньшему вкладу выпадений на леса в БЭЗ. Вклад группы «Остальные», в которую входят водные поверхности, городская застройка, земли, лишённые растительности и поверхности, постоянно покрытые снегом и льдом, почти незначительный (1-3%) для зон суши.

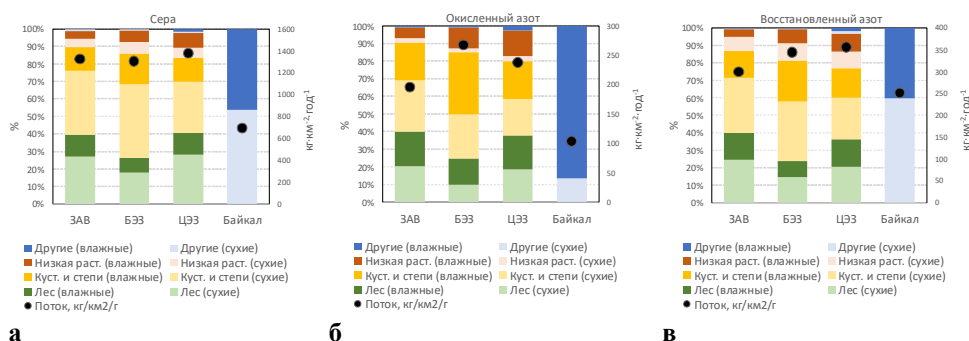


Рисунок 10. Вклады потоков выпадений на сгруппированные типы подстилающей поверхности в средний поток выпадений серы (а), окисленного азота (б) и восстановленного азота (в) в БПТ и величина среднего потока суммарных выпадений

Figure 10. Contributions of deposition fluxes to grouped land cover types to mean deposition flux of sulfur (a), oxidized nitrogen (b) and reduced nitrogen (c) in BNT and mean total deposition flux

Дискуссия

Оценки суммарных выпадений, приведённые в табл. 3, содержат ряд неопределённостей. Во-первых, к ним относится предположение о равномерности пространственного распределения концентраций в воздухе по всей территории БПТ. В действительности, пространственное распределение будет

зависеть от расположения источников выбросов в пределах БПТ, атмосферного переноса внутри и из-за границ расчётной области, пространственной изменчивости метеорологических параметров. Другим важным источником неопределённости, ведущим к некоторой недооценке выпадений азота, является то, что не принимается в расчёт вклад NO_2 в суммарные выпадения окисленного азота. Например, согласно работе Флешара и др. (Flechard et al., 2011), вклад NO_2 в сухие выпадения на станциях мониторинга Европы может быть значительным, или даже преобладающим. В работе Голобоковой и др. (Golobokova et al., 2018) представлены результаты мониторинга газовой HNO_3 и аэрозольной фракции NO_3^- на станции Листвянка начиная с 2000-го года, в то время как измерения NO_2 доступны только для нескольких последних лет. Согласно работе Шиховцева и др. (2024), средние концентрации NO_2 , измеренные на станции Листвянка с 2020 по 2023 г., составляют $5.7 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$. В работе Жамсуевой и др. (2022) представлена величина концентрации NO_2 в $1 \text{ мкг} \cdot \text{м}^{-3}$ как фоновая для региона Байкала, полученная в ходе экспедиционных измерений на побережье оз. Байкал. Предполагая, что разброс скоростей сухого осаждения составляет от 0.1 до $0.3 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ (Zhang et al., 2009), можно оценить, что недоучтённый вклад NO_2 в сухие впадения может составлять от 30 до $540 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Кроме того, неопределённости могут быть вызваны допущениями параметризаций скоростей сухого осаждения, погрешностями измерительных и метеорологических данных, и т.д. В частности, оценки скоростей сухого осаждения, полученные в данной работе, были сопоставлены с измеренными величинами или с оценками, вычисленными в ходе других исследований (табл. 4). Из таблицы следует, что скорости сухого осаждения на поверхность воды, полученные в данной работе несколько ниже, чем значения, приведенные в других работах. Для лесов и экосистем с низкой растительностью скорости сухого осаждения, приведённые в данной работе и других исследованиях, в целом, сопоставимы. Применение химико-транспортных моделей атмосферного переноса и выпадений может способствовать снижению части упомянутых неопределённостей, например тех, что обусловлены предположениями об отсутствии пространственной изменчивости концентраций в воздухе.

Таблица 4. Измеренные и рассчитанные скорости сухого осаждения на поверхности, покрытые лесами («Лес»), низкой растительностью («Низк. раст.») и водные поверхности («Вода»), найденные в литературных источниках и полученные в данной работе. «Изм.» обозначает измеренную, и «Расч.» – рассчитанную V_d . Значения, использованные в данной работе, представлены в виде разброса средних за месяц величин и среднегодовых за 2004-2023 г.

Table 4. Measured and calculated dry deposition velocity values to surfaces covered with forests («Лес»), low vegetation («Низк. раст.») and water surfaces («Вода») found in scientific literature and obtained in this work. «Изм.» denotes measured and «Расч.» denotes calculated V_d value. The values used in the current work are presented as a range of monthly mean values and mean values for the 2004-2023 period

Веще-ства	Тип поверх-ности	Среднее, меди-ана или раз-брос, см·с ⁻¹	Примечания	Ссылки
SO ₂	Лес	2.1-5.9 (сред-нее 4.6)	Изм; хвойный лес, тёплый сезон, Канада	Gordon et al., 2023
		0.1-0.6	Расч.; хвойный лес, тёплый сезон, Канада	Gordon et al., 2023
		3.4	Изм. (самолёт); август-сентябрь 2013 г, бореальный лес, Канада	Hyden et al., 2021
		0.16	Расч.; хвойный лес	Zhang et al., 2004
		0.3– 0.9	Расч.; сосновый лес	Matsuda et al., 2001
		0.59	Изм; преимущественно лиственный лес, за год	Wu et al., 2016
		0.2–0.6 (лето), 0.2-0.5 (зима)	Изм; преимущественно лиственный лес, за год	Wu et al., 2018
		1.94	Расч.; Типичное значение для влажных дней, хвойный лес.	Zhang et al., 2003
		0.86/0.74	Изм/расч.; смешанный лес; май-октябрь, США	Zhang et al., 2002
		0.26-2.9 (сред. 1.5)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
	Низк. раст.	0.25/0.40/0.34	Расч.; с/х земли/луга/прерии	Zhang et al., 2004
		~ 1.0	Расч.; типичное значения для влажного дня	Zhang et al., 2003
		0.1- 1.2 (сред. 0.6)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
	Вода	0.7	Расч.	Zhang et al., 2004
		0.7 - 0.9	Расч; типичные значения	Zhang et al., 2003
		0.1- 0.3 (сред. 0.2)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа

Продолжение таблицы 4

Веще-ства	Тип поверх-ности	Среднее, меди-ана или раз-брос, см·с ⁻¹	Примечания	Ссылки
	Лес	2.5 - 3.5	Расч.; год; разброс для 4-х моделей	Flechard et al., 2011
HNO ₃		2.2 или 4.7	Изм. (самолёт); август-сентябрь 2013 г, бореальный лес, Канада, шлейфы выбросов	Hyden et al. 2021
		2.66	Расч.; хвойный лес	Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016
		0.6 - 2.1	Расч.; хвойный лес, Канада	Zhang et al., 2009
		3.4	Расч.; типичное значение для влажного дня; хвойный лес	Zhang et al., 2003
		1.05 / 0.47	Расч.; лиственный лес в Япо-нии, медианы для деревьев с листьями/без листьев	Xu et al., 2021
		3.2 – 5.2 (сред. 3.9)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
	Низк. раст.	1 - 1.2	Расч.; год; разброс для 4-х моделей	Flechard et al., 2011
		0.76/1.68/1.16	Расч.; с/х земли/луга/прерии	Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016
		1.0 -1.4	Расч..., многолетнее среднее; Канада	Zhang et al., 2009
		~1.9	Расч.; типичное значение для влажного дня	Zhang et al., 2003
		0.6 - 1.6 (сред. 1.1)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
	Вода	0.84	Расч.	Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016
		0.8–1	Расч.; типичные значения	Zhang et al., 2003
NH ₃		0.1-0.3 (сред. 0.2)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
	Лес	0.7 - 2.5	Расч.; год; разброс для 4-х моделей	Flechard et al., 2011
		0.2	Расч.; хвойный лес	Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016
		0.1- 0.6	Расч.; многолетнее среднее; хвойный лес в Канаде	Zhang et al., 2009
		0.5 - 3.3 (сред. 2.2)	Компиляция; хвойные леса	Schrader and Brümmer, 2014
		0.1-0.5 (сред. 0.2)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
	Низк. раст.	~0.5- 1	Расч.; год; разброс для 4-х моделей	Flechard et al., 2011

Веще-ства	Тип поверх-ности	Среднее, меди-ана или раз-брос, см·с ⁻¹	Примечания	Ссылки
		0.18/0.23/0.23	Расч.; с/х земли/луга/прерии	Zhang et al, 2004, Jia et al, 2016
		0.3 - 0.5	Расч. многолетнее среднее, Канада	Zhang et al., 2009
		0.2 - 7.1 (сред. 1.0)	Компиляция данных из разных источников; сельхозугодия	Schrader and Brümmer, 2014
		1.5 (медиана)	Изм.; вересковая пустошь; раз-ные сезоны в 1984 – 1987 г.	Duyzer, 1994
		0.1 – 0.3 (сред. 0.2)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
	Вода	0.55	Расч.	Zhang et al., 2004, Jia et al, 2016
		0.5-0.9 (сред. 0.7)	Компиляция данных из разных источников	Schrader and Brümmer, 2014
		0.04 – 0.3 (сред. 0.2)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
SO ₄ ²⁻	Лес	0.25	Расч.; хвойный лес	Zhang et al., 2004
		0.9/0.3	Изм.; лиственный лес, лето, день/ночь	Matsuda et al., 2010
		1.3/1.0	Изм.; день/ночь; хвойный лес	Ruijgrok et al., 1997
		0.5	Изм.; лето-осень	Matsuda et al., 2015
		0.9/0.4	Изм.; лиственный лес, май, Китай, день/ночь	Zhao et al., 2017
		1.3/0.8	Изм.; хвойный лес, май, Китай, день/ночь	Zhao et al., 2017
		~0	Расч.; лиственный лес в Япо-нии, медиана	Xu et al., 2021
		0.82	Изм.; хвойный лес в Венгрии	Horvath, 2003
		0.4-0.9 (сред. 0.6)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
	Низк. раст.	0.24	Расч.; луг	Zhang et al., 2004
		0.2-0.4 (сред. 0.3)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
	Вода	0.26	Расч.	Zhang et al., 2004
		0.04-0.07 (сред. 0.05)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа

Продолжение таблицы 4

Веще-ства	Тип поверх-ности	Среднее, меди-ана или раз-брос, см·с ⁻¹	Примечания	Ссылки
NO ₃ ⁻	Лес	0.2- 2.5	Расч.; год; разброс для 4-х моделей	Flechard et al., 2011
		0.3	Расч.; хвойный лес	Zhang et al., 2004
		1.3/1.0	Изм.; день/ночь; хвойный лес	Ruijgrok et al., 1997
		0.93/0.47	Расч.; хвойный лес в Японии, медиана для деревьев с листьями/без листьев	Xu et al., 2021
		0.5 -1.1 (сред. 0.7)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
	Низк. раст.	~0.1-0.2	Расч.; год; разброс для 4-х моделей	Flechard et al., 2011
		0.25	Расч.; луг	Zhang et al., 2004
		0.2 -0.4 (сред. 0.3)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
	Вода	0.27	Расч.	Zhang et al., 2004
		0.04-0.07 (сред. 0.05)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
NH ₄ ⁺	Лес	0.2 - 2	Расч.; год; разброс для 4-х моделей	Flechard et al., 2011
		0.3	Расч.; хвойный лес	Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016
		1.3/1.0	Изм.; день/ночь; хвойный лес	Ruijgrok et al., 1997
		0.84	Изм.; хвойный лес в Венгрии	Horvath, 2003
		0.4-0.8 (сред. 0.5)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
	Низк.раст	~0.1 - 0.2	Расч.; год; разброс для 4-х моделей	Flechard et al., 2011
		0.25	Расч.	Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016
		0.2	Изм.; вересковая пустошь; раз-ные сезоны в 1984–1987 г.	Duyzer, 1994
		0.2-0.4 (сред. 0.3)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа
	Вода	0.27	Расч.	Zhang et al., 2004, Jia et al., 2016
		0.04 - 0.07 (сред. 0.05)	Ст. Листвянка, Байкал, Россия	Данная работа

Выводы

Многолетние измерения концентраций в воздухе и осадках окисленной серы, окисленного и восстановленного азота на станции Листвянка позволили

определить вклады сухих выпадений в суммарные выпадения на различные типы подстилающей поверхности. Вклад сухих выпадений в суммарные выпадения серы для водной поверхности, луга и хвойного леса составляет 50%, 67% и 85%, соответственно. Вклад сухих выпадений окисленного азота в суммарные выпадения сравнительно невелик для водной поверхности и луга и составляет в среднем 5% и 20%, соответственно. Для хвойных лесов вклады сухих и влажных выведений примерно равны. Вклады сухого осаждения восстановленного азота сопоставимы для всех трёх рассматриваемых типов подстилающей поверхности, и составляют в среднем 50%, 56% и 60% для водной поверхности, луга и хвойного леса, соответственно.

Потоки сухих выпадений серы и азота на станции Листвянка зависят от типа подстилающей поверхности и концентраций газовой и аэрозольной компоненты в воздухе. Потоки сухих выпадений серы (в газовой и аэрозольной фракциях) на поверхность воды почти вдвое ниже, чем потоки на травяные участки, и почти в пять раз ниже, чем на хвойный лес. Для окисленного азота разница в потоках ещё выше: отношение потоков на воду и луг составляет 4.6, а на воду и лес – почти 17 раз. В отличие от серы и окисленного азота, для восстановленного азота разница в потоках сухих выпадений на рассматриваемые типы подстилающей поверхности не столь высока: выпадения на луг выше на 30%, а на хвойный лес на 60%, чем на водную поверхность.

Предположение о равномерном распределении концентрации серы и азота в воздухе БПТ и интерполяция значений измеренных концентраций в атмосферных осадках позволили оценить осреднённые по площади потоки суммарных выпадений в разных зонах БПТ. Осреднённый поток серы на поверхность озера Байкал (около $700 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) примерно вдвое ниже, чем поток на суше в ЦЭЗ, БЭЗ и ЗАВ ($1300\text{-}1400 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). Средний поток суммарных выпадений окисленного азота на поверхность озера Байкал ($100 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) почти в 2-3 раза ниже, чем поток в ЗАВ ($200 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$), БЭЗ ($270 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) и ЦЭЗ ($240 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). Средние потоки суммарных выпадений восстановленного азота в зонах БПТ демонстрируют меньший разброс по сравнению с другими соединениями, и составляют $250 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (Озеро Байкал), $360 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (ЦЭЗ), $340 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (БЭЗ) и $300 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ (ЗАВ).

Список литературы

Голобокова, Л.П., Ходжер, Т.А., Ходжер, Т.В. (2007) Современная оценка сухих осадений химических веществ на подстилающую поверхность в разных районах азиатской территории России, *Оптика атмосферы и океана*, т. 20, № 6, с. 512-516.

Жамсуева, Г.С., Ходжер, Т.В., Балин, Ю.С., Заяханов, А.С., Цыдыпов, В.В., Пеннер, И.Э., Насонов, С.В., Маринайте, И.И. (2022) Экспериментальные исследования аэрозольных и газовых примесей в приводном слое атмосферы оз. Байкал (корабельная экспедиция, сентябрь 2021 г.), *Оптика атмосферы и океана*, т. 35, № 9.

Латышева, И.В., Синюкович, В.Н., Чумакова, Е.В. (2009) Современные особенности гидрометеорологического режима южного побережья оз. Байкал, *Известия Иркутского государственного университета, серия «Науки о Земле»*, т. 2., № 2, с. 117-133,

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2024 год. Под ред. Черногоаевой Г.М., Росгидромет, 2025, 224 с.

Першина, Н. А., Павлова, М. Т., Полищук, А. И., Семенец, Е. С. (2021) Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2016-2020 гг. (обзор данных), ФГБУ «ГГО», Санкт-Петербург, Саратов, Амирит, 114 с.

Сиховцев, М.Ю., Оболкин, В.А., Ходжер, Т.В., Моложникова, Е.В. (2023) Изменчивость приземной концентрации твердых частиц PM₁–PM₁₀ в воздушном бассейне южного Прибайкалья, *Оптика атмосферы и океана*, т. 36, № 6.

Carmichael, G.R., Streets, D.G., Calori, G., Amann, M., Jacobson M.Z., Hansen, J. and Ueda, H. (2002) Changing trends in sulfur emissions in Asia: implications for acid deposition, air pollution and climate, *Environmental science and technology*, vol. 36, no. 22, pp. 4707- 4713.

Dementeva, A., Zhamsueva, G., Zayakhanov, A. and Tsydypov, V. (2022) Interannual and Seasonal Variation of Optical and Microphysical Properties of Aerosol in the Baikal Region, *Atmosphere*, vol. 13, 211 p. <https://doi.org/10.3390/atmos13020211>.

Duyser, J. (1994) Dry deposition of ammonia and ammonium aerosols over heathland, *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, no D9, pp. 18757-18763.

EANET (2003) *Technical Document for Filter Pack Monitoring in East Asia. Adopted by Third Session of the Science Advisory Committee (SAC3) of EANET*, Network Center for EANET.

EANET (2005) *Goal, Achievements and Way Forward*. Report for Policy Makers on EANET., EANET Secretariat/UNEP, November, 21 p.

EANET (2010) *Technical manual on dry deposition flux estimation in East Asia*, Network Center for EANET, 61 p.

Erismann, J. W. (1994) Evaluation of a surface resistance parameterization of sulfur dioxide, *Atmospheric Environment*, vol. 28, pp. 2583-2594.

Erismann, J.W., Draaijers, G.P.J., (1995) Atmospheric Deposition in Relation to Acidification and Eutrophication, *Studies in Environmental Science*, vol. 63, Elsevier, pp. 55-75.

Garrat, J.R. (1999) *The atmospheric boundary layer*. Cambridge University Press, 316 p.

Flechar, C.R., Nemitz, E., Smith, R.I., Fowler, D., Vermeulen, A.T., Bleeker A., Erismann, J.W., Simpson, D., Zhang, L., Tang, Y.S., Sutton, M.A.

(2011) Dry deposition of reactive nitrogen to European ecosystems, a comparison of inferential models across the NitroEurope network, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 11, pp. 2703-2728, www.atmos-chem-phys.net/11/2703/2011/.

Golobokova, L.P., Khodzher, T.V., Obolkin, V.A., Potemkin, V.L., Khuriganova, O.I. and Onischuk, N.A. (2018) Aerosol in the atmosphere of the Baikal region, history and contemporary researches, *Limnology and Freshwater Biology*, vol. 1, pp. 49-57, doi:10.31951/2658-3518-2018-A-1-49.

Gordon, M., Blanchard, D., Jiang, T., Makar, P.A., Staebler, R.M., Aherne, J., Mihele, C. and Zhang, X. (2023) High sulfur dioxide deposition velocities measured with the flux-gradient technique in a boreal forest in the Alberta Oil Sands Region, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 23, pp. 7241-7255, <https://doi.org/10.5194/acp-23-7241-2023>.

Gromov, S.A., Ginzburg, V.A., Paramonov, S.G. (2006) Russian governmental monitoring networks related to acid deposition and results of their activities over east Asian territory, *EANET Science Bulletin. Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET)*, November 2006, vol. 1, p. 141-152.

Hayden, K., Li, S-M., Makar, P., Liggio, J., Moussa, S.G., Akingunola, A., McLaren, R., Staebler, R.M., Darlington, A., O'Brien, J., Zhang, J., Wolde, M. and Zhang, L. (2021) New methodology shows short atmospheric lifetimes of oxidized sulfur and nitrogen due to dry deposition, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 21, pp. 8377-8392, <https://doi.org/10.5194/acp-21-8377-2021>.

Horvath, L. (2003) Dry deposition velocity of PM_{2.5} ammonium sulfate particles to a Norway spruce forest on the basis of S- and N-balance estimations, *Atmospheric Environment*, vol. 37, pp. 4419-4424.

Jacobson, M. (1999) *Fundamentals of atmospheric modeling*, Cambridge university press, 656 p.

Jia, Y., Yu, G., Gao, Y., He, N., Wang, Q., Jiao, C. and Zuo, Y. (2016) Global inorganic nitrogen dry deposition inferred from ground- and space-based measurements, *Scientific Reports*, doi: 10.1038/srep19810.

Kaimal, J.C., Finnigan, J.J. (1994) *Atmospheric Boundary Layer Flows. Their Structure and Measurement*, Oxford University Press, 289 p.

Khan, T.R. and Perlinger J.A. (2017) Evaluation of five dry particle deposition parameterizations for incorporation into atmospheric transport models, *Geosci. Model Dev.*, vol. 10, pp. 3861-3888.

Kouraev, A., Swmowski, S.V., Shimaraev, M.N., Mognard, N.M., Legrisy, B. and Rmy, F. (2007) The ice regime of Lake Baikal from historical and satellite data. Relationship to air temperature, dynamical, and other factors, *Limnol. Oceanogr.*, vol. 52(3), pp. 1268-1286.

Kouznetsov, R., and Sofiev, M. (2012) A methodology for evaluation of vertical dispersion and dry deposition of atmospheric aerosols, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 117, D01202.

Matsuda, K., Aoki, M., Zhang, S., Kominami, T., Fukuyama, T., Fukuzaki, N. and Totsuka T. (2001) Dry deposition velocity of sulfur dioxides on a red pine forest in Nagano, Japan, *J. Jpn., Soc. Atmos. Environ.*, vol. 37(6), pp. 387-392.

Matsuda, K., Fujimura, Y., Hayashi, K., Takahashi, A. and Nakaya, K. (2010) Deposition velocity of PM_{2.5} sulfate in the summer above a deciduous forest in central Japan, *Atmospheric Environment*, vol. 44, pp. 4582-4587.

Matsuda, K., Watanabe, I., Mizukami, K., Ban, S. and Takahashi, A. (2015) Dry deposition of PM_{2.5} sulfate above a hilly forest using relaxed eddy accumulation, *Atmospheric Environment*, vol. 107, pp. 255-261.

Muñoz Sabater, J. (2019) *ERA5-Land hourly data from 1950 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), doi 10.24381/cds.e2161bac (Accessed on 20-Jul-2025).

Petrov, A. and Zhang, L. (2010) Development and validation of a size-resolved particle dry deposition scheme for application in aerosol transport models, *Geosci. Model Dev.*, 3, pp. 753-769.

Pleim, J. and Ran, L. (2011) Surface Flux Modeling for Air Quality Applications, *Atmosphere*, vol. 2, pp. 271-302.

Popovicheva, O., Molozhnikova, E., Nasonov, S., Potemkin, V., Penner, I., Klemasheva, M., Marinaite, I., Golobokova, L., Vratolis, S., Eleftheriadis, K. and Khodzher, T. (2021) Industrial and wildfire aerosol pollution over world heritage Lake Baikal, *Journal of Environmental Science*, vol. 107, pp. 49-64.

Ruijgrok, W., Tieben, H., Eisinga, P., (1997) The dry deposition of particles to a forest canopy: a comparison of model and experimental results, *Atmospheric Environment*, vol. 31, pp. 399-415.

Schrader, F. and Bmmmer, C. (2014) Land use specific ammonia deposition velocities: a review of recent studies (2004-2013), *Water Air Soil Pollut.*, vol. 225, p. 2114, doi: 10.1007/s11270-014-2114-7.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, Wiley Interscience Publication, 1120 p.

Shikhovtsev, M. Y., Molozhnikova, Y. V., Obolkin, V.A., Potemkin, V.L., Lutskin, E.S., and Khodzher, T. V. (2024) Features of Temporal Variability of the Concentrations of Gaseous Trace Pollutants in the Air of the Urban and Rural Areas in the Southern Baikal Region (East Siberia, Russia), *Appl. Sci.*, vol. 14, p. 8327, <https://doi.org/10.3390/app14188327>.

Shikhovtsev, M.Yu., Obolkin, V.A., Khodzher, T.V., Molozhnikova, Ye.V. (2023) Variability of the ground concentration of particulate particles PM₁ – PM₁₀ in the air basin of the southern Baikal region, *Atmos. Ocean. Opt.*, vol. 36, no. 6. pp. 448-454.

Slinn, S.A. and Slinn, W.G.N. (1980) Predictions for particle deposition on natural waters, *Atmospheric Environment*, vol.14., pp. 103-1016.

Smith, R. I., Fowler, D., Sutton, M. A., Flechard, C., Coyle, M., (2000) Regional estimation of pollutant gas dry deposition in the UK, model description, sensitivity analyses and outputs, *Atmospheric Environment*, vol. 34, pp. 3757-3777.

Strategy Paper for Future Direction of Dry Deposition Monitoring of EANET (2011-2015) [Second Edition] (2010) Network Center for EANET, October 2010, 15 p.

Sulla-Menashe, D. and Friedl, M.A. (2018) *User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product?* 18 p.

Williams, R.M. (1982) A model for the dry deposition of particles to natural water surfacesm, *Atmospheric Environment*, vol.16, no.8, pp 1933-1938.

Wu, Z., Staebler, R., Vet, R. and Zhang, L. (2016) Dry deposition of O₃ and SO₂ estimated from gradient measurements above a temperate mixed forest, *Environmental Pollution*, pp. 202-210.

Wu, Z., Schwede, D.B., Ve,t R., Walker, J.T., Shaw, M., Staebler, R. and Zhang, L. (2018) Evaluation and intercomparison of five North American dry deposition algorithms at a mixed forest site, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 10, pp. 1571-1586, <https://doi.org/10.1029/2017MS001231>.

Xu, M., Kasahara, K., Sorimachi, A. and Matsuda, K. (2021) *Nitric acid dry deposition associated with equilibrium shift of ammonium nitrate above a forest by long-term measurement using relaxed eddy accumulation*, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.118454>.

Yang, Y., Mou, S., Wang, H., Wang, P., Li, B. and Liao, H. (2024) Global source apportionment of aerosols into major emission regions and sectors over 1850-2017, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 24, pp. 6509-6523.

Zhang, L., Brook, J.R. and Vet, R. (2003) A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models, *Atmos. Chem. Phys.*, no. 3, pp. 2067-2082, www.atmos-chem-phys.org/acp/3/2067/.

Zhang, L., He, Z. (2014) Technical Note. An empirical algorithm estimating dry deposition velocity of fine, coarse and giant particles, *Atmos. Chem. Phys.*, no. 14, pp. 3729-3737.

Zhang, L., Gong, S., Padro, J. and Barrie, L. (2001) A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module, *Atmospheric Environment*, vol. 35, pp. 549-560.

Zhang, L., Moran, M.D., Makar, P.A., Brook, J.R. and Gong, S. (2002) Modelling gaseous dry deposition in AURAMS, a unified regional air-quality modelling system, *Atmospheric Environment*, vol. 36, pp. 537-560.

Zhang, L. and Shao, Y. (2014) A new parameterization of particle dry deposition over rough surfaces, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 14, pp. 12429-12440.

Zhang, L., Vet, R., O'Brien, J.M., Mihele, C., Liang, Z. and Wiebe, A. (2009) Dry deposition of individual nitrogen species at eight Canadian rural sites, *Journal*

Zhang, Y., Wang, T. J., Hu, Z. Y. and Xu, C. K. (2004) Temporal variety and spatial distribution of dry deposition velocities of typical air pollutants over different land use types, *Climatic and Environmental Research*, no. 9, pp. 591-604.

Zhao, L., Lun, X., Li, R., Gao, Y., Sun, F. and Xu, X. (2017) Deposition of PM_{2.5} Sulfate in the Spring on Urban Forests in Beijing, China, *Atmosphere*, no. 8, p. 3, doi:10.3390/atmos8010003.

References

Golobokova L.P., Khodzher T.A., Khodzher T.V. (2007) Sovremennaya otsenka sukhikh osazhdeniy khmicheskikh veschestv na podstilayushuyu poverkhnost v raznykh rayonah aziatskoy territorii Rossii [Present-day estimate of chemical species dry deposition to the underlying surface in different regions of Asian part of Russia], *Atmospheric and ocean optics*, 20, no. 6, pp. 512-516.

Zhamsuyeva G.S., Khodzher T.V., Balin Y.S., Zayakhanov A.S., Tsydypov V.V., Penner I.E., Nasonov S.V., Marinaite I.I. (2022) Experimentalnye issledovaniya aerolnykh i gasovykh promesey v provodnom sloye atmosfery oz. Baikal (korabelnaya ekspedicia, sentiabr 2021 g.) [Experimental research of particulate and gaseous species in near-water atmospheric layer of Lake Baikal (seaborn expedition, September 2021)], *Atmospheric and ocean optics*, 35, no. 9.

Latysheva I.V., Sinukovich V.N., Chumakova E.V. (2009) Sovremennye osobennosti gidrometeorologicheskogo rejima yuzhnogo poberezhia oz. Baikal. [Modern peculiarities of hydrometeorological mode of the Lake Baikal southern coast]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta, seria "Nauki o Zemle"*, vol. 2, no. 2, pp. 117-133.

Obzor sostoyania i zagriazneniya okruzhayushey sredy v Rossiyskoy Federacii za 2024 god. [Review of environmental state and pollution in Russian Federation in 2024] (2025) in Chernogaeva G.M. (ed.), *Rosgidromet*, 2025, 224 p.

Pershina N.A., Pavlova M.T., Polischuk A.I., Semenets, E.S (2021) Yezhegodnye dannye po khimicheskomy sostavy i kislotnosty atmosfernnykh osadkov za 2016- 2020 gg. (obzor dannykh) [Annual data on atmospheric precipitation chemical composition and acidity in 2016- 2020 (data review)]. FGBU "GGO", St-Petersburg, Saratov, Amirit, 114 p.

Shikhovtsev M.U., Obolkin V.A., Khodzher T.V., Molozhnikova E.V. (2023) Izmenchivost' prizemnoy koncentracii tvordyykh chastits PM₁ – PM₁₀ v vozdushnom bassejne yuzhnogo Probaikalia [Variability of surface concentrations of PM₁ – PM₁₀ particulate matter in air of the southern Baikal region], *Atmospheric and ocean optics*, vol. 36, no. 6.

Carmichael, G.R., Streets, D.G., Calori, G., Amann, M., Jacobson M.Z., Hansen, J. and Ueda, H. (2002) Changing trends in sulfur emissions in Asia: implications for acid deposition, air pollution and climate, *Environmental science and technology*, vol. 36, no. 22, pp. 4707- 4713.

Dementeva, A., Zhamsueva, G., Zayakhanov, A. and Tsydypov, V. (2022) Interannual and Seasonal Variation of Optical and Microphysical Properties of Aerosol in the Baikal Region, *Atmosphere*, vol. 13, 211 p. <https://doi.org/10.3390/atmos13020211>.

Duyser, J. (1994) Dry deposition of ammonia and ammonium aerosols over heathland, *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, no D9, pp. 18757-18763.

EANET (2003) *Technical Document for Filter Pack Monitoring in East Asia. Adopted by Third Session of the Science Advisory Committee (SAC3) of EANET*, Network Center for EANET.

EANET (2005) *Goal, Achievements and Way Forward*. Report for Policy Makers on EANET. EANET Secretariat/UNEP, November, 21 p.

EANET (2010) *Technical manual on dry deposition flux estimation in East Asia*, Network Center for EANET, 61 p.

Erismann, J. W. (1994) Evaluation of a surface resistance parameterization of sulfur dioxide, *Atmospheric Environment*, vol. 28, pp. 2583-2594.

Erismann, J.W., Draaijers, G.P.J., (1995) Atmospheric Deposition in Relation to Acidification and Eutrophication, *Studies in Environmental Science*, vol. 63, Elsevier, pp. 55-75.

Garrat, J.R. (1999) *The atmospheric boundary layer*, Cambridge University Press, 316 p.

Flechard, C.R., Nemitz, E., Smith, R.I., Fowler, D., Vermeulen, A.T., Bleeker, A., Erismann, J.W., Simpson, D., Zhang, L., Tang, Y.S. and Sutton, M.A. (2011) Dry deposition of reactive nitrogen to European ecosystems, a comparison of inferential models across the NitroEurope network, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 11, pp. 2703-2728, www.atmos-chem-phys.net/11/2703/2011/.

Golobokova, L.P., Khodzher, T.V., Obolkin, V.A., Potemkin, V.L., Khuriganova, O.I. and Onischuk, N.A., (2018) Aerosol in the atmosphere of the Baikal region, history and contemporary researches, *Limnology and Freshwater Biology*, vol. 1, pp. 49-57, doi:10.31951/2658-3518-2018-A-1-49.

Gordon, M., Blanchard, D., Jiang, T., Makar, P.A., Staebler, R.M., Aherne, J., Mihele, C. and Zhang, X. (2023) High sulfur dioxide deposition velocities measured with the flux-gradient technique in a boreal forest in the Alberta Oil Sands Region, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 23, pp. 7241-7255, <https://doi.org/10.5194/acp-23-7241-2023>.

Gromov, S.A., Ginzburg, V.A. and Paramonov, S.G. (2006) Russian governmental monitoring networks related to acid deposition and results of their activities over east Asian territory, *EANET Science Bulletin*. Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET), November 2006, vol. 1, p. 141-152.

Hayden, K., Li, S-M., Makar, P., Liggio, J., Moussa, S.G., Akingunola, A., McLaren, R., Staebler, R.M., Darlington, A., O'Brien, J., Zhang, J., Wolde, M. and Zhang, L. (2021) New methodology shows short atmospheric lifetimes of oxidized

sulfur and nitrogen due to dry deposition, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 21, pp. 8377-8392, <https://doi.org/10.5194/acp-21-8377-2021>.

Horvath, L. (2003) Dry deposition velocity of PM_{2.5} ammonium sulfate particles to a Norway spruce forest on the basis of S- and N-balance estimations, *Atmospheric Environment*, vol. 37, pp. 4419-4424

Jacobson, M. (1999) *Fundamentals of atmospheric modeling*. Cambridge university press, 656 p.

Jia, Y., Yu, G., Gao, Y., He, N., Wang, Q., Jiao, C. and Zuo, Y. (2016) Global inorganic nitrogen dry deposition inferred from ground- and space-based measurements. *Scientific Reports*, doi: 10.1038/srep19810.

Kaimal, J.C., Finnigan, J.J. (1994) *Atmospheric Boundary Layer Flows, Their Structure and Measurement*, Oxford University Press, 289 p.

Khan, T.R. and Perlinger J.A. (2017) Evaluation of five dry particle deposition parameterizations for incorporation into atmospheric transport models, *Geosci. Model Dev.*, vol. 10, pp. 3861-3888.

Kouraev, A., Swmowski, S.V., Shimaraev, M.N., Mognard, N.M., Legrésy, B. and Rémy, F. (2007) The ice regime of Lake Baikal from historical and satellite data. Relationship to air temperature, dynamical, and other factors, *Limnol. Oceanogr.*, vol. 52(3), pp. 1268-1286.

Kouznetsov, R., and Sofiev, M. (2012) A methodology for evaluation of vertical dispersion and dry deposition of atmospheric aerosols, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 117, D01202.

Matsuda, K., Aoki, M., Zhang, S., Kominami, T., Fukuyama, T., Fukuzaki, N. and Totsuka T. (2001) Dry deposition velocity of sulfur dioxides on a red pine forest in Nagano, Japan, *J. Jpn. Soc. Atmos. Environ.*, vol. 37(6), pp. 387-392.

Matsuda, K., Fujimura, Y., Hayashi, K., Takahashi, A. and Nakaya, K. (2010) Deposition velocity of PM_{2.5} sulfate in the summer above a deciduous forest in central Japan, *Atmospheric Environment*, vol. 44, pp. 4582-4587.

Matsuda, K., Watanabe, I., Mizukami, K., Ban, S. and Takahashi, A. (2015) Dry deposition of PM_{2.5} sulfate above a hilly forest using relaxed eddy accumulation, *Atmospheric Environment*, vol. 107, pp. 255-261.

Muñoz Sabater, J. (2019) *ERA5-Land hourly data from 1950 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), doi: 10.24381/cds.e2161bac (Accessed on 20-Jul-2025).

Petrov, A. and Zhang, L. (2010) Development and validation of a size-resolved particle dry deposition scheme for application in aerosol transport models, *Geosci. Model Dev.*, 3, pp. 753-769.

Pleim, J. and Ran, L. (2011) Surface Flux Modeling for Air Quality Applications, *Atmosphere*, vol. 2, pp. 271-302.

Popovicheva, O., Molozhnikova, E., Nasonov, S., Potemkin, V., Penner, I., Klemasheva, M., Marinaite, I., Golobokova, L., Vratolis, S., Eleftheriadis, K. and Khodzher, T. (2021) Industrial and wildfire aerosol pollution over world heritage Lake Baikal, *Journal of Environmental Science*, vol. 107, pp. 49-64.

Ruijgrok, W., Tieben, H., Eisinga, P., (1997) The dry deposition of particles to a forest canopy: a comparison of model and experimental results, *Atmospheric Environment*, vol. 31, pp. 399-415.

Schrader, F. and Brümmer, C. (2014) Land use specific ammonia deposition velocities: a review of recent studies (2004-2013), *Water Air Soil Pollut*, vol. 225, p. 2114, doi: 10.1007/s11270-014-2114-7.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, Wiley Interscience Publication, 1120 p.

Shikhovtsev, M. Y, Molozhnikova, Y. V., Obolkin, V.A., Potemkin, V.L., Lutskan, E.S., and Khodzher, T. V. (2024) Features of Temporal Variability of the Concentrations of Gaseous Trace Pollutants in the Air of the Urban and Rural Areas in the Southern Baikal Region (East Siberia, Russia), *Appl. Sci.*, vol. 14, p. 8327, <https://doi.org/10.3390/app14188327>.

Shikhovtsev, M.Yu., Obolkin, V.A., Khodzher, T.V., Molozhnikova, Ye.V. (2023) Variability of the ground concentration of particulate particles PM1 – PM10 in the air basin of the southern Baikal region, *Atmos. Ocean. Opt.*, vol. 36, no. 6. pp. 448-454.

Slinn, S.A. and Slinn, W.G.N. (1980) Predictions for particle deposition on natural waters, *Atmospheric Environment*, vol.14, pp. 103-1016.

Smith, R. I., Fowler, D., Sutton, M. A., Flechard, C., Coyle, M., (2000) Regional estimation of pollutant gas dry deposition in the UK, model description, sensitivity analyses and outputs, *Atmospheric Environment*, vol. 34, pp. 3757-3777.

Strategy Paper for Future Direction of Dry Deposition Monitoring of EANET (2011-2015) [Second Edition] (2010) Network Center for EANET, October 2010, 15 p.

Sulla-Menashe, D. and Friedl, M.A. (2018) User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product, 18 p.

Williams, R.M. (1982) A model for the dry deposition of particles to natural water surfaces, *Atmospheric Environment*, vol. 16, no. 8, pp. 1933-1938.

Wu, Z., Staebler, R., Vet, R. and Zhang, L. (2016) Dry deposition of O₃ and SO₂ estimated from gradient measurements above a temperate mixed forest, *Environmental Pollution*, pp. 202-210.

Wu, Z., Schwede, D.B., Ve,t R., Walker, J.T., Shaw, M., Staebler, R. and Zhang, L. (2018) Evaluation and intercomparison of five North American dry deposition algorithms at a mixed forest site, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 10, pp. 1571-1586, <https://doi.org/10.1029/2017MS001231>.

Xu, M., Kasahara, K., Sorimachi, A. and Matsuda, K. (2021) *Nitric acid dry deposition associated with equilibrium shift of ammonium nitrate above a forest by long-term measurement using relaxed eddy accumulation*, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.118454>.

Yang, Y., Mou, S., Wang, H., Wang, P., Li, B. and Liao, H. (2024) Global source apportionment of aerosols into major emission regions and sectors over 1850-2017, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 24, pp. 6509-6523.

Zhang, L., Brook, J.R. and Vet, R. (2003) A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models, *Atmos. Chem. Phys.*, no. 3, pp. 2067-2082, www.atmos-chem-phys.org/acp/3/2067/.

Zhang, L., He, Z. (2014) Technical Note. An empirical algorithm estimating dry deposition velocity of fine, coarse and giant particles, *Atmos. Chem. Phys.*, no. 14, pp. 3729-3737.

Zhang, L., Gong, S., Padro, J. and Barrie, L. (2001) A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module, *Atmospheric Environment*, vol. 35, pp. 549-560.

Zhang, L., Moran, M.D., Makar, P.A., Brook, J.R. and Gong, S. (2002) Modelling gaseous dry deposition in AURAMS, a unified regional air-quality modelling system, *Atmospheric Environment*, vol. 36, pp. 537-560.

Zhang, L. and Shao, Y. (2014) A new parameterization of particle dry deposition over rough surfaces, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 14, pp. 12429-12440.

Zhang, L., Vet, R., O'Brien, J.M., Mihele, C., Liang, Z. and Wiebe, A. (2009) Dry deposition of individual nitrogen species at eight Canadian rural sites, *Journal Of Geophysical Research*, vol. 114, D02301, doi:10.1029/2008JD010640.

Zhang, Y., Wang, T. J., Hu, Z. Y. and Xu, C. K. (2004) Temporal variety and spatial distribution of dry deposition velocities of typical air pollutants over different land use types, *Climatic and Environmental Research*, no. 9, pp. 591-604.

Zhao, L., Lun, X., Li, R., Gao, Y., Sun, F. and Xu, X. (2017) Deposition of PM_{2.5} Sulfate in the Spring on Urban Forests in Beijing, China, *Atmosphere*, no. 8, p. 3; doi:10.3390/atmos8010003.

Статья поступила в редакцию (Received): 10.04.2026.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 04.05.2026.

Для цитирования / For citation:

Ильин, И.С., Галушин, Д.А., Громов, С. А., Жигачёва, Е.С. (2026), *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXVII, № 1-2, с. 81-118, doi:10.24412/2782-3237-2026-1-2-81-118.

Ilyin, I.S., Galushin, D.A., Gromov, S.A., Zhigacheva, E.S. (2026) Model estimates of atmospheric deposition of sulfur and nitrogen compounds to Baikal Natural Territory based on observed concentration in air and precipitation, *Ecological monitoring and modeling of ecosystems*, vol. XXXVII, no. 1-2, pp. 81-118, doi:10.24412/2782-3237-2026-1-2-81-118.