

УДК 551.588.74:551.577

ВЫЯВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПОСТУПЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Л.В. Колотушкина, С.С. Эйрих, Т.С. Папина

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул**E-mail: kolotushkina_l@iwep.ru, stella@iwep.ru, tanya.papina@mail.ru*

Работа посвящена изучению поступления загрязняющих веществ в составе атмосферных выпадений на подстилающую поверхность водосбора Верхней Оби (на примере водосборного участка в пределах г. Барнаула). Мониторинг состава атмосферных осадков (снег, дождь) остается одним из наиболее эффективных методов оценки загрязнения окружающей среды в пределах водосбора и прогноза качества поверхностных вод в период половодья. Для оценки объема поступления загрязняющих веществ из атмосферы на подстилающую поверхность в пробах осадков были определены почвенные (Al, Ca), природно-антропогенные (As, Fe, K, Mn, Na), преимущественно антропогенные (Cd, Si, Ni, Sn, Pb, Zn, V) элементы и ртуть (Hg), как глобальный загрязнитель. На основе рассчитанных средневзвешенных концентраций и потоков поллютантов с атмосферными выпадениями предложен способ, позволивший выявить основные источники поступления загрязняющих веществ на изучаемую территорию с использованием обратных траекторий движения воздушных масс (HYSPLIT).

Ключевые слова: загрязнение атмосферы; атмосферные осадки; источники загрязняющих веществ; HYSPLIT; юг Западной Сибири.

*DOI:10.24412/2410-1192-2025-17902**Дата поступления: 6.11.2025. Принята к печати: 5.12.2025*

Качество атмосферного воздуха формируется под влиянием антропогенных (промышленность, энергетика, транспорт, сжигание отходов, сельское хозяйство) и природных (вулканы, природные пожары, пыльные бури, морские аэрозоли, выветривание и дегазация земной коры) источников эмиссии загрязняющих веществ. Большинство тяжелых металлов имеют природно-антропогенное происхождение, при этом природные источники создают глобальный фоновый уровень, а антропогенная деятельность вносит основной вклад в их поступление в атмосферу, особенно в промышленных регионах. Дальность распространения и уровни загрязнения атмосферы зависят от мощности источника, условий выбросов и метеорологических параметров, а также физико-географического расположения [Селегей, 2005]. Поступающие в атмосферу загрязняющие вещества, сорбированные на крупных частицах, преимущественно выпадают вблизи источников их эмиссии, в то время как микрочастицы аэрозолей, обладающие повышенной сорбционной емкостью, могут переносить поллютанты на значительные расстояния, главным образом за счет об-

щей циркуляции атмосферы, и осаждаться из нее на поверхность земли путем сухого или влажного осаждения [Таловская, 2022; Li et al., 2023]. Основными источниками эмиссии тяжелых металлов в атмосферу являются выбросы металлургического производства: цветной – Cu, Zn, Ni, Cr, Cd, Sb, Pb и черной металлургии – Fe, Mn, Cr, V; сжигание ископаемого топлива, прежде всего угля – Hg, As, Pb, Se, Cd, Ge; сжигание и переработка нефтепродуктов – Ni, V; транспорт и истирание дорожного полотна – Pb, Zn, Sb, Cu, Cd; сельское хозяйство – Cd, Cu, Zn, Hg и др.; сжигание отходов – широкий спектр металлов. Таким образом, тяжелые металлы поступают в атмосферу от разных источников, доля которых сильно варьируется, но для некоторых, например, меди > 80% поступает при ее производстве [Eichler et al., 2025]. Тяжелые металлы могут оказывать значительное вредное воздействие на здоровье человека или окружающую среду. В целях их ограничения был ратифицирован Протокол по тяжелым металлам к Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния [Protocol..., 2024], направленный на три особенно токсичных металла: кадмий, свинец и ртуть. Известно, что некоторые металлы, такие как Na, K, Mg, Ca, Cu, Cr, Co, Fe, Mn, Mo, Zn являются жизненно необходимыми для нормального функционирования живых организмов [Jomova et al., 2022], но их повышенные уровни тоже вредны и требуют контроля. В РФ концентрации металлов в атмосферном воздухе, перечень которых включает алюминий, железо, кадмий, кобальт, магний, марганец, медь, никель,

свинец, хром и цинк, измеряются в 132 городах России. Наблюдения за фоновым загрязнением атмосферного воздуха тяжелыми металлами проводятся на трех станциях фонового мониторинга (СКФМ) в Центральных районах Европейской части России (ЕЧР) [Обзор состояния..., 2025]. Высокоинформативным индикатором загрязнения атмосферы являются атмосферные осадки [Dong et al., 2015; Li et al., 2023]. Для идентификации источников загрязнения тяжелыми металлами по их содержанию в атмосферных осадках широко используется обратный траекторный анализ на базе модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) [Vach et al., 2009; Виноградова, 2014]. Данная модель разработана Лабораторией воздушных ресурсов ARL (The Air Resources Laboratory) Национального управления океанических и атмосферных исследований NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, США) и находится в частично открытом доступе в интернете [Air..., 2024].

Актуальность регионального изучения подтверждается тем, что по данным Алтайского ЦГМС уровень загрязнения атмосферного воздуха города Барнаула в 2019–2023 гг. оценивался как высокий [Государственный доклад..., 2024]. Предприятия и транспорт в Алтайском крае за 2023 год выбросили в атмосферу порядка 458.6 тысяч тонн загрязняющих веществ, которые впоследствии выпадали на поверхность водосбора в составе атмосферных осадков. При этом на предприятия приходилось 42% от этого объема, на транспорт – 58%.

Материалы и методы

Исследование поступления загрязняющих веществ с влажными атмосферными выпадениями проводилось в г. Барнауле на мониторинговой экспериментальной площадке Института водных и экологических проблем СО РАН (ИВЭП СО РАН) (рис. 1).

Умеренный континентальный климат изучаемой территории определяется географическим положением города на юго-востоке Западной Сибири. Открытость территории города, его расположенность на равнинной части Приобского плато и частая смена воздушных масс, поступающих из Атлантики, Арктики, Восточной Сибири и Средней Азии способствуют контрастности погодных условий [Доклад..., 2024]. Территория Алтайского края открыта с северной (Северного Ледовитого океана) и южной (азиатских пустынь) сторон. Западнее находятся Уральские горы, восточнее – Среднесибирское плоскогорье,

на юго-востоке – горы Алтай. Такое географическое расположение обуславливает существование преимущественно меридиональной циркуляции (зональная практически отсутствует). Таким образом, на территорию Алтайского края воздушные массы поступают с атмосферным переносом с запада (с Атлантики, много влаги), юга, юго-запада и юго-востока (с территории Средней и Центральной Азии, низкая влажность, континентальный воздух), с севера (с Арктики, относительно высокая влажность) [Селегей, 2005].

Отбор проб атмосферных осадков (АО) проводился после каждого единичного их выпадения на мониторинговой площадке, расположенной на крыше ИВЭП СО РАН на высоте 25 метров от поверхности земли, с 27.03.2023 г. по 24.03.2024 г. В зависимости от сезона пробы отбирали в виде дождя или снега с использованием соответствующих пробоотборников.

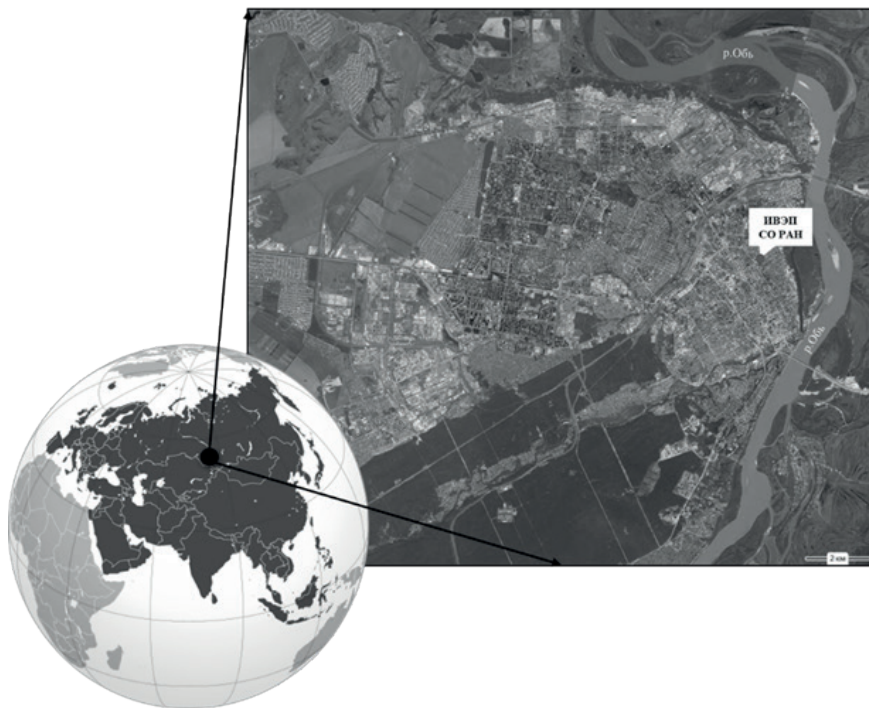


Рис. 1. Расположение мониторинговой точки отбора атмосферных осадков
Fig. 1. Location of the atmospheric precipitation monitoring point

Разделение на теплый и холодный периоды проводили по типу выпадающих осадков: холодный период – твердые осадки (снег), летний – жидкие (дождь) и по температурному режиму, где за начало холодного периода принимали устойчивый переход ниже 0°C, а теплого – выше 0°C.

Для выявления источников поступления загрязняющих веществ на территорию ключевых участков бассейна Оби был выбран следующий набор элементов: Al, Ca (почвенные); As, Fe, K, Mn, Na (природно-антропогенные); Cd, Cu, Ni, Sn, Pb, Zn, V (преимущественно антропогенные, в том числе от металлургических производств, сжигания угля, топлива и др.); Hg (как глобальный загрязнитель). Определение их содержания в пробах атмосферных осадков (АО) проводили с помощью методов ионной хроматографии (Dionex 3000), атомно-флуоресцентной спектроскопии (Mercur DUO Plus) и масс-спектропии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS Thermo Fisher Scientific, iCAP-Qc), используя следующие методики определения:

- 1) М 002-2016 – Ca,
- 2) РД 52.04.333-93 – K, Na,
- 3) US EPA 1631e – Hg,
- 4) ПНД Ф 14.1:2:4.139-98 – Fe, Mn,
- 5) ГОСТ Р 56219-2014 – Al, As, Cd, Cu, Ni, Pb, Sn, Zn, V.

Для оценки сезонного уровня загрязнения атмосферных осадков рассчитаны значения средневзвешенных концентраций (C_{vwc}) за соответствующий период, которые учитывают концентрацию элемента в каждой пробе и ее вклад в общее количество осадков, выпадающих за этот период на

подстилающую поверхность (формула 1):

$$C_{vwc} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \times q_i)}{Q}, \quad (1)$$

где C_{vwc} – средневзвешенная концентрация ртути в АО, мкг/л; C_i – концентрация элемента в i -й пробе (мкг/л); q_i – количество АО в i -й пробе (мм в. э.); n – количество i -тых проб АО; Q – общее количество АО за сезон (мм в.э.).

Для расчета сезонных потоков элементов, выпадающих на подстилающую поверхность с атмосферными осадками, использовали формулу 2:

$$P = C_{vwc} \times Q, \quad (2)$$

где P – поток элемента за сезон (мкг/м²); C_{vwc} – средневзвешенная концентрация элемента в пробе (мкг/л); Q – количество АО за сезон (мм в.э.)

Результаты и обсуждение

За изученный период были определены концентрации макро- и микроэлементов в единичных пробах атмосферных осадков, рассчитаны их средневзвешенные концентрации и потоки поступления загрязняющих веществ с влажным осаждением за теплый и холодный сезоны года (табл.).

Средневзвешенные концентрации большинства почвенных и антропогенных элементов были ниже в 1.5–2.5 раза в теплый период по сравнению с холодным, еще больше была разница для Na и Sn – в 3 и 4.3 раза, соответственно; примерно на одинаковом уровне оставались концентрации ртути, калия и кальция. При этом максимальные концентрации элементов, напротив, в летний период были выше, чем в зимний в 1.4–3.6 раза (кроме Na, Hg, Pb и Sn).

Таблица

Сезонные средневзвешенные концентрации, диапазон варьирования, потоки макро- и микроэлементов во влажных атмосферных осадках г. Барнаула в 2023–2024 гг. и коэффициенты корреляции концентраций с количеством взвешенного вещества (ВВ)

Table

Seasonal volume weighted concentrations, variation range, and deposition fluxes of macro- and microelements in wet atmospheric precipitation in Barnaul in 2023–2024 and the correlation coefficients of concentrations with the amount of suspended matter

Показатель	Теплый период 2023 г. (27.03.23–26.10.23)		Холодный период 2023–2024 гг. (27.10.23–24.03.24)		Коэффициент корреляции C_i и ВВ _г	
	C_{vwc} / min-max мкг/л	P, мкг/ м ² /т.п.	C_{vwc} / min-max мкг/л	P, мкг/ м ² /х.п.	т.п.	х.п.
Al	137 / 0.35–2989	34017	293 / 75–1282	54379	0.87	0.76
As	0.38 / <0.01–8.34	95.0	0.58 / 0.05–4.2	108	0.55	0.64
Ca	3.1 / 0.94–25.8	776	3.6 / 1.1–16.5	675	0.76	0.88
Cd	0.028 / <0.01–2.11	7.0	0.052 / <0.01–0.58	9.6	0.58	0.45
Cu	1.89 / 0.24–40.3	468	3.54 / 0.87–15.4	657	0.81	0.51
Fe	253 / <40–5154	62547	495 / <40–2604	91693	0.83	0.84
Hg	0.014 / <0.001–0.046	3.44	0.012 / <0.001–0.097	2.3	0.47	н.д.
K	0.22 / 0.052–4.7	53.4	0.21 / 0.05–1.1	38.3	0.58	0.37
Mn	10.8 / <0.01–260	2669	15.9 / 3.0–93.5	2942	0.86	0.88
Na	0.23 / 0.04–4.7	57.9	0.71 / 0.09–6.3	132	0.44	0.46
Ni	0.90 / <0.01–20.6	224	1.29 / 0.05–9.0	240	0.72	0.83
Pb	1.81 / 0.08–27.9	447	4.9 / 1.3–67.5	918	0.88	0.29
Sn	0.066 / <0.06–1.2	16.3	0.28 / <0.06–11.8	52.4	н.д.	н.д.
Zn	13.3 / 0.43–315	3294	34.7 / 5.8–227	6427	0.79	0.41
V	0.50 / <0.01–20.7	123	1.18 / 0.23–7.78	219	0.81	0.75
n	56		41		–	–
Кол-во АО, мм в.э.	248		185		н.д.	н.д.
Кол-во ВВ в АО, мг/л	1952		707		–	–

Примечания: C_{vwc} – средневзвешенные концентрации; C_i – концентрация в i -ой (единичной) пробе; min-max – диапазон варьирования; P – поток элемента в течение холодного или теплого сезона года; ВВ _{i} – взвешенное вещество в i -ой (единичной) пробе; т.п. – теплый период; х.п. – холодный период; н.д. – достоверной корреляции не выявлено; – неприменимо

Максимальные концентрации металлов в осадках (например, события атмосферных выпадений 10.04.23, 10.05.23 и 8.06.23) прежде всего, связаны с интенсивным пылевым переносом, что подтверждается максимальными концентрациями взвешенного вещества в указанных пробах.

Общее количество взвешенного вещества, поступившего с АО в теплый период, было выше в 2.8 раза по сравнению с холодным, что закономерно связано с интенсивным выветриванием почв и пылевым переносом в летнее время. В целом, достоверная сильная положительная корреляция ($r > 0.7$) между

концентрациями металлов и количеством ВВ в пробах АО выявлена для таких элементов как Al, Ca, Fe, Mn, Ni, V как в холодный, так и в теплый периоды, тогда как для Cu, Pb, Zn – только в теплый период, для остальных элементов наблюдалась достоверная средняя положительная корреляция ($0.3 < r < 0.69$), что свидетельствует о том, что значительная часть металлов поступает из атмосферы с АО в составе пыли (теплый период), либо золы (холодный период). Для Hg достоверная средняя положительная корреляция ($r = 0.47$) ее концентрации с количеством ВВ наблюдалась только в теплый период, в холодный же достоверной корреляции не выявлено, что свидетельствует о значительной доле газообразной элементарной (GEM) и реактивной газообразной (RGM) ртути, поступающей вследствие сжигания угля в атмосферу и вымываемой из нее атмосферными осадками.

Следует отметить значительное увеличение концентраций кальция и натрия в холодный период в целом, а не только для единичных событий. Значительный рост может быть связан с использованием в зимний период песко-соляной смеси, а также материала для противогололедной обработки «Бионорд», в составе которого может содержаться: NaCl (45–89%), CaCl₂ (10–30%), KCl ($\leq 10\%$), карбамид (мочевина) ($\leq 10\%$), формиат Na ($\leq 15\%$), формиат K ($\leq 15\%$). Формиаты используются как ингибиторы коррозии, а карбамид в качестве биофильной добавки для улучшения почвы. В Барнауле «Бионорд» начал активно использоваться в холодный период 2023–2024 гг.: для обработки дорог и тротуаров было подготовлено более 50 тыс. т песко-соляной смеси и 170 т противоголо-

ледной смеси «Бионорд» [В преддверии..., 2023]. В составе атмосферных осадков холодного периода 2023–2024 гг. наблюдалось увеличение концентраций по сравнению с холодным периодом 2022–2023 гг.: Na – в 2 раза, Ca и K – в 1.7 раза. В отношении данных элементов локальные источники загрязнения атмосферы в зимний период могут быть определяющими.

В теплый период количество атмосферных осадков было выше в 1.3 раза по сравнению с холодным, тогда как сравнение сезонных потоков атмосферных выпадений изученных элементов показало, что в теплый период они выше только для Hg и K, на близком уровне – для As, Ca, Mn, Ni, а для остальных элементов (Al, Cd, Cu, Fe, Na, Pb, Sn, Zn, V) их потоки в холодный период выше в 1.4–3 раза, чем в теплый.

Сравнение средневзвешенных годовых концентраций тяжелых металлов (Cd, Cu, Pb, Hg) в атмосферных осадках г. Барнаула со средневзвешенными годовыми фоновыми концентрациями в АО на территории Алтайского биосферного заповедника (БЗ) по данным сети СКФМ [Обзор состояния..., 2025], показало, что концентрации Pb выше по сравнению с фоновой территорией в 3.4 раза, тогда как остальные концентрации, напротив, ниже: Cu – в 1.5, Cd – в 2.5, а Hg – в 8.3 раза. Сравнение годовых потоков продемонстрировало еще большие различия: влажные выпадения свинца на территории г. Барнаула составили 1.4 мг/м², на территории Алтайского БЗ – 1.0 мг/м²; выпадения Cu, Cd и Hg на территории Алтайского БЗ были существенно выше, чем в г. Барнауле – в 3.4, в 5.4 и в 19.2 раза, соответственно. Данные различия могут быть связаны с методикой отбора, пробоподго-

товкой и анализом проб и требуют межлабораторных сличительных испытаний.

На основании полученных результатов для более детального изучения и выявления региональных и трансграничных источников поступления загрязняющих веществ был предложен способ, выделяющий следующие случаи:

1. Высокие концентрации, большие потоки элементов;
2. Высокие концентрации, малые потоки элементов;
3. Низкие концентрации, большие потоки элементов;
4. Высокие концентрации и потоки отдельных загрязняющих веществ при средней или низкой концентрации остальных.

Все пробы были сгруппированы в соответствии с представленным способом и построены модели обратных траекторий движения воздушных масс HYSPLIT на даты этих атмосферных выпадений как в теплый, так и холодный периоды. Используя открытые интернет-ресурсы [Архив погоды..., 2024], для каждого случая выпадения осадков фиксировали необходимую метеоинформацию: начало и продолжительность выпадения АО, количество и вид выпавших осадков, температура, направление и сила ветра, высота нижней границы облачности. Генерацию обратных траекторий проводили непосредственно в интерактивном режиме на веб-сайте [READY..., 2024]. Момент окончания выпадения осадков и место отбора проб (г. Барнаул, экспериментальная площадка ИВЭП СО РАН) считали начальной точкой построения модели. Для построения выбирали обратное направление траектории и использовали метод вертикального движения на осно-

ве метеоданных. Каждая сгенерированная траектория охватывала временной интервал от 72 до 120 часов, с шагом по времени 6 ч. На основе анализа метеоданных для каждого случая атмосферных выпадений были выбраны соответствующие высоты облачности. Стандартный вид сгенерированных траекторий на рисунке представляет проекции траекторий в горизонтальной плоскости на географической карте с координатами (сверху), а также вертикальные проекции траекторий по высоте (снизу).

Анализ сгенерированных моделей обратных траекторий движения воздушных масс (ВМ), показал, что ВМ, внесшие существенный вклад в общее выпадение загрязняющих веществ на изучаемую территорию, брали начало с различных высот (от 1000 до 5000 м над землей) с последующим выпадением осадков в точке отбора большей частью на высотах 300, 600, 1000 и 2500 м. Было установлено, что ВМ преимущественно проходили над территорией Республики Казахстан, примеры таких траекторий приведены на рисунке 2: АО №240 (все три траектории) и АО №249 (траектория красного цвета). В ряде случаев ВМ поступали с территории Сибири: АО №232 (траектория зеленого цвета, большая часть красной и синей траекторий) и АО №249 (траектория зеленого цвета). В единичном случае ВМ поступали с территории Республики Монголии, Китайской Народной Республики и Республики Казахстан (АО №172, все три траектории), при этом состав атмосферных осадков отличался максимальными для теплого периода концентрациями практически всех микроэлементов, как природных, так и антропогенных. Количество ВВ в данной пробе также было максимальным.

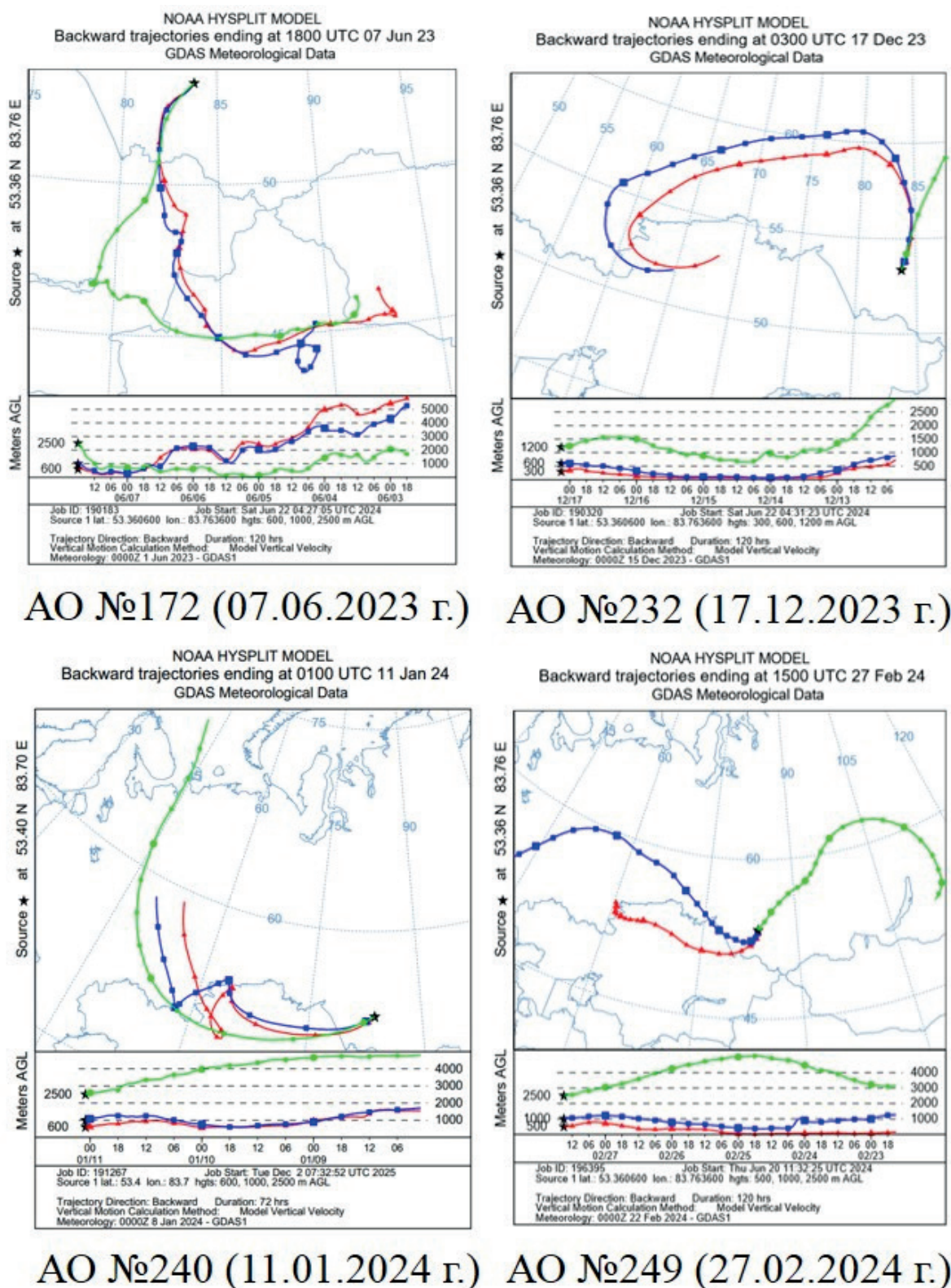


Рис. 2. Обратные траектории движения воздушных масс для АО с высокими концентрациями элементов, вносящих существенный вклад в поступление загрязняющих веществ

Fig. 2. Backward trajectories of air masses for atmospheric deposition with high concentrations of elements that make a significant contribution to the input of pollutants

(до 22.5 мм в.э.), низкие и средние концентрации микроэлементов в них обусловлены разбавлением. Траектории движения ВМ, представленные для данного случая (рис. 4), берут начало преимущественно с высот 1500–2000 м (Юг России, Поволжье, АО №211 – зеленая и синяя траектории; территории Центральной Азии, Республики Казахстан – АО №230, зеленая и красная траектории), с высот более 2000 м (юг Западной Сибири, АО №174), в редких случаях от 500 м (Юг России, АО №211 – красная траектория). Сгенерированные обратные траектории для данных случаев демонстрируют поступление элементов преимущественно с территорий Центральной Азии и юга Западной Сибири.



Fig. 3. Backward trajectories of air masses for atmospheric deposition with high concentrations of elements that do not contribute significantly to the total pollutant input

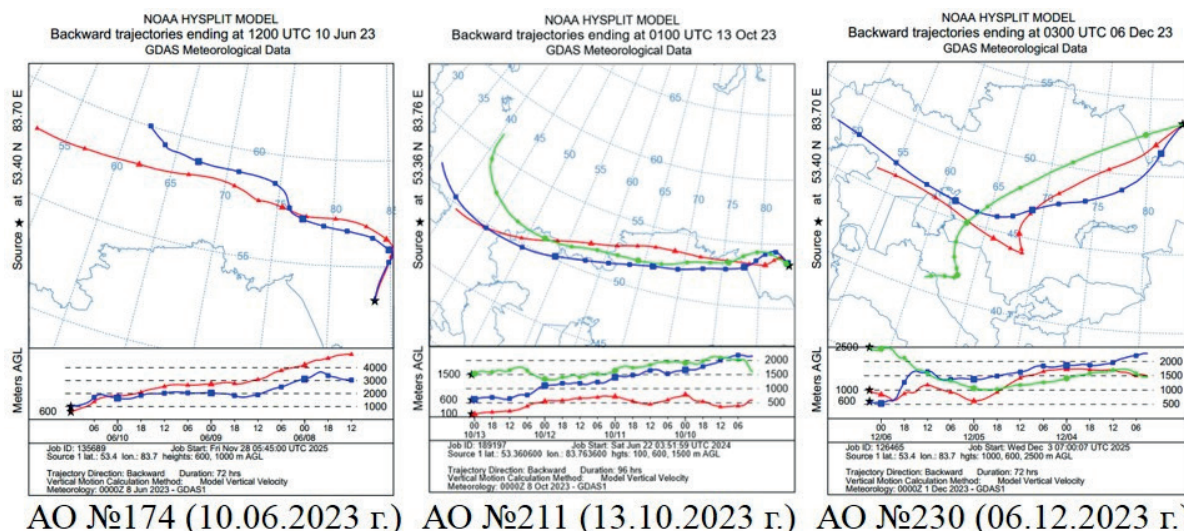


Рис. 4. Обратные траектории движения воздушных масс для АО с низкими и средними содержаниями элементов, вносящих существенный вклад в общее поступление загрязняющих веществ

Fig. 4. Backward air mass trajectories for atmospheric deposition with low and medium concentrations of elements that contribute significantly to the total pollutant input

Отдельно были рассмотрены случаи, когда наблюдались высокие концентрации и потоки отдельных загрязняющих веществ (V, Hg) при средней или низкой концентрации остальных (рис. 5).

Поступление ванадия (V) (АО №160) возможно связано с его эмиссией от нефтедобывающих и перерабатывающих предприятий Западной Сибири. Воздушные массы, принесшие повышенное содержание ртути (Hg) с АО №253, проходили над северной и северо-западной территорией Республики Казахстан, где источником ртути могли быть ТЭЦ и добывающая промышленность (АО №253). Для представленных случаев, высоты облачности на момент выпадения осадков, находились на уровне 600–1000 м от земли. При движении ВМ не поднимались на высоту более 1500 м, тем самым сорбируя на себя загрязняющие вещества от предполагаемых источников эмиссии.

Заключение

Химический анализ единичных выпадений дождя или снега позволяет качественно и количественно оценить уровень

загрязнения и сезонную и годовую динамику поступления загрязняющих веществ на подстилающую поверхность водосбора на основе мониторинговых наблюдений. Обратные траектории движения воздушных масс, сгенерированные по программе HYSPLIT, позволяют оценить возможность переноса загрязняющих веществ на большие расстояния и идентифицировать вероятные источники загрязнения. Для наиболее характерных дат выпадения осадков в различные сезоны 2023–2024 гг., траекторный анализ продемонстрировал, что для юга Западной Сибири вклад дальнего трансграничного переноса поллютантов с территории Центральной Азии был значителен как для теплого, так и для холодного периода, а вклад их поступления с территории Западной Сибири выше в теплый. В холодный период важную роль играют региональные источники поступления загрязняющих веществ вследствие сжигания угля, а также локальные, связанные с активным использованием в зимний период противогололёдных средств.

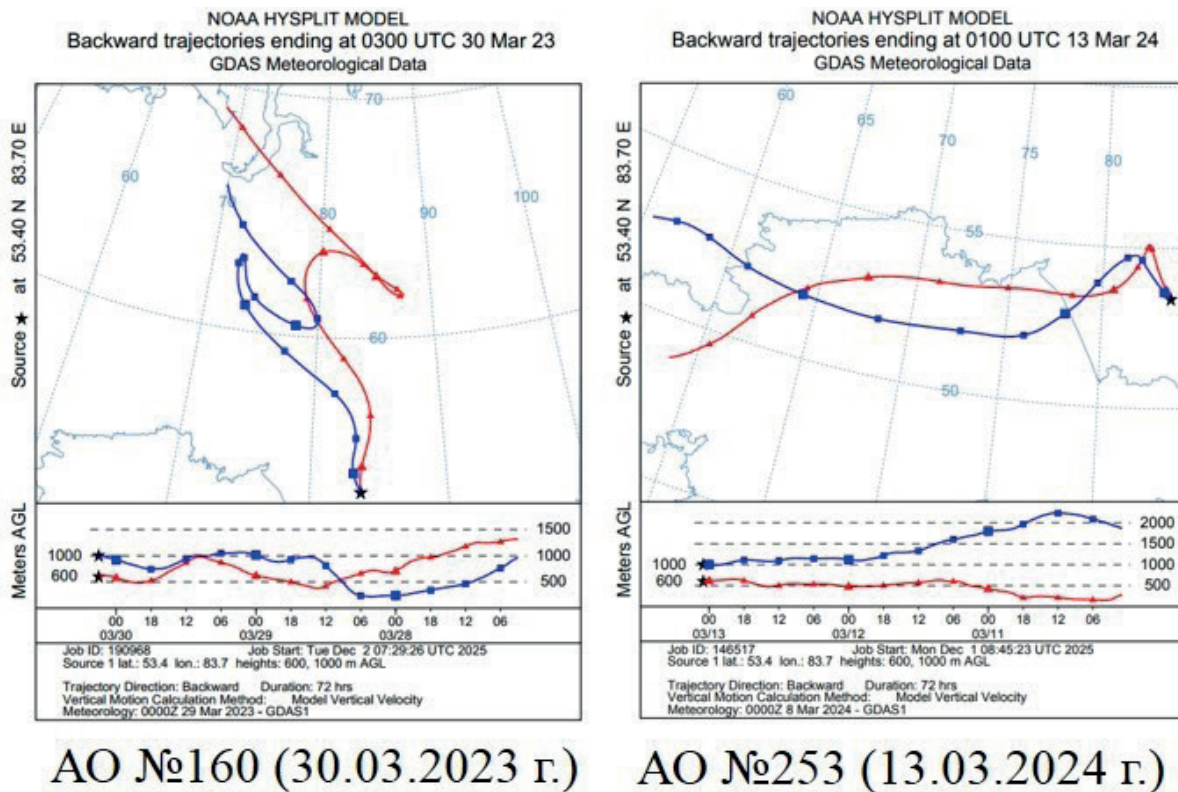


Рис. 5. Обратные траектории движения воздушных для АО с высокими концентрациями V и Hg
 Fig. 5. Backward air mass trajectories for atmospheric deposition with high V and Hg concentrations

В целом, в теплый период года концентрации загрязняющих веществ в атмосферных осадках ниже и формируются в основном региональными и локальными источниками природного и антропогенного происхождения (почвенная пыль, транспорт), хотя дальний трансграничный перенос с терри-

тории Центральной Азии также возможен. Максимальные концентрации металлов в осадках связаны, прежде всего, с интенсивным пылевым переносом (антропогенные пылеаэрозоли), что подтверждается корреляцией между концентрациями металлов и количеством взвешенного вещества в пробах.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interests

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН РАН.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ХАЦ ИВЭП СО РАН за участие в отборе и анализе проб атмосферных осадков и обсуждение результатов.

Список литературы

Архив погоды в г. Барнаул (аэропорт). [Электронный ресурс]. URL: [https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Барнауле_\(аэропорт\)](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Барнауле_(аэропорт)) (дата обращения: 21.06.2024).

Виноградова А.А. Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13, № 4. С. 5–20.

В преддверии непогоды. 24 октября 2023 г. Вторник. № 158 (5831). Первая городская газета «Вечерний Барнаул». [Электронный ресурс]. URL: <https://barnaul.press/upload/>

iblock/dd4/bqkogchn52fd02zrx1utzhbqkyrj6zs5/158_A.pdf (дата обращения: 22.12.2024).

ГОСТ Р56219-2014. (ИСО 17294-2:2003). Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Введен в действие Приказом Росстандарта № 1536-ст от 11.11.2014 г. ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ». 32 с.

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды в Алтайском крае в 2023 году». Барнаул, 2024. 192 с.

Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды городского округа - города Барнаула Алтайского края в 2023 году». Барнаул, 2024. 195 с.

М 002-2016. Методика измерений массовых концентраций ионов лития, натрия, аммония, калия, магния, кальция, стронция и бария в воде методом ионной хроматографии. М: ООО «Спектроника», 2016. 27 с.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2024 год / Ред. Г.М. Черногаева. М: Росгидромет, 2025. 222 с. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?year=2024&ID=90> (дата обращения: 10.10.2025).

ПНД Ф 14.1:2.4.139-98. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций кобальта, никеля, меди, цинка, хрома, марганца, железа, серебра, кадмия и свинца в пробах питьевых, природных и сточных вод методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды. М., 1998 г. (изд. 2010 года). 24 с.

РД 52.04.333-93. Методические указания. Хроматографический метод определения содержания хлоридов, нитратов, сульфатов, лития, натрия, аммония и калия в атмосферных осадках. / Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М., 1993. 21 с.

Селегей Т.С. Формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах Сибири. Наука. 2005. 347 с.

Таловская А.В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири (по данным изучения состава нерастворимого осадка снегового покрова): Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Томск. 2022. 373 с.

Air Resources Laboratory / HYSPLIT [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/> (дата обращения: 22.06.2024).

Dong Z.W., Kang S.C., Qin X., Li X.F., Qin D.H., Ren J.W. New insights into trace elements deposition in the snow packs at remote alpine glaciers in the northern Tibetan plateau, China // Sci. Total Environ. 2015. Vol. 529. P. 101–113. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.065

Eichler A., Nalivaika P., Kakareka S., Kukharchyk T., Jenk T. M. et al. Recent heavy metal pollution from the territory of the former Soviet Union (FSU): Ice core records and emission estimates // Science of The Total Environment. 2025. Vol. 983. P. 179632. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.179632

Jomova K., Makova M., Alomar S., Alwasel S., Nepovimova E. et al. Essential metals in health and disease // Chemico-biological interactions. 2022. Vol. 367. P. 110173. doi: 10.1016/j.cbi.2022.110173

Li D., Zheng J., Yang M., Meng Y., Yu X. et al. Atmospheric wet deposition of trace metal elements: Monitoring and modelling // Sci. Total Environ. 2023. Vol. 893. P. 164880. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164880

Protocol on Heavy Metals // UNECE. [Электронный ресурс]. URL: <https://unece.org/environmental-policy/air/protocol-heavy-metals> (дата обращения: 25.09.2024).

READY NOAA HYSPLIT. URL: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php> (дата обращения: 22.06.2024).

US EPA Method 1631, Revision E. 2002. Mercury in Water by Oxidation, Purge and Trap, and Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry. In U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology, Engineering and Analysis Division (4303). Washington, D.C. 46 p.

Vach M., Skřivan P., Rohovec J. et al. Inorganic Pollutants in Wet Atmospheric Deposition and the Trajectories of Their Possible Transport // Water Air Soil Poll. 2009. V. 196, P. 369–383. doi: 10.1007/s11270-008-9784-y

References

Arhiv pogody v g. Barnaul (ajeroport) [Archive of weather in Barnaul (airport)]. URL: [https://rp5.ru/Arhiv_pogody_v_Barnaule_\(ajeroport\)](https://rp5.ru/Arhiv_pogody_v_Barnaule_(ajeroport)) (accessed: 21.06.2024).

Vinogradova A.A. Distancionnaja ocenka vlijaniya zagriznenija atmosfery na udalennye territorii [Remote assessment of the impact of atmospheric pollution on remote territories] // Geofizicheskie processy i biosfera [Geophysical processes and biosphere]. 2014. Vol. 13, no. 4. P. 5–20. (in Russian).

V preddverii nepogody. 24 oktjabrja 2023 g. Vtornik. № 158 (5831). Pervaya gorodskaya gazeta «Vechernij Barnaul» [On the eve of bad weather. Tuesday, October 24, 2023. № 158 (5831). The first city newspaper «Evening Barnaul»]. URL: https://barnaul.press/upload/iblock/dd4/bqkogchn52fd02zrx1utzhbqkyrj6zs5/158_A.pdf (accessed: 22.12.2024).

GOST R56219-2014. (ISO 17294-2:2003). Voda. Opredelenie sodержaniya 62 jelementov metodom mass-spektrometrii s induktivno-svjazannoj plazmoj. Vveden v dejstvie Priказom Rosstandarta № 1536-st ot 11.11.2014 g. [Water. Determination of the content of 62 elements by inductively coupled plasma mass spectrometry. It was put into effect by Order of Rosstandart No. 1536-st dated 11.11.2014]. FGUP «STANDARTINFORM». 32 p. (in Russian).

Gosudarstvennyj doklad «O sostojanii i ob ohrane okruzhajushhej sredy v Altajskom krae v 2023 godu» [The State report «On the state and protection of the environment in the Altai Territory in 2023»]. Barnaul, 2024. 192 p. (in Russian).

Doklad «O sostojanii i ob ohrane okruzhajushhej sredy gorodskogo okruga – goroda Barnaula Altajskogo kraja v 2023 godu» [The report “On the state and environmental protection of the urban district of Barnaul, Altai Territory in 2023”]. Barnaul, 2024. 195 p. (in Russian).

M 002-2016. Metodika izmerenij massovyh koncentracij ionov litija, natrija, ammonija, kalija, magnija, kal’cija, stroncija i barija v vode metodom ionnoj hromatografii [The method

of measuring the mass concentrations of lithium, sodium, ammonium, potassium, magnesium, calcium, strontium and barium ions in water by ion chromatography]. Moscow: LLC «Spectronica», 2016. 27 p. (in Russian).

Obzor sostojanija i zagrijaznenija okruzhajushhej sredy v Rossijskoj Federacii za 2024 god [Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2024] / Ed. G.M. Chernogaeva. M: Rosgidromet, 2025. 222 p. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?year=2024&ID=90> (accessed: 10.10.2025). (in Russian).

PND F 14.1:2:4.139-98. Kolichestvennyj himicheskij analiz vod. Metodika izmerenij massovyh koncentracij kobal'ta, nikelja, medi, cinka, hroma, marganca, zheleza, serebra, kadmija i svinca v probah pit'evykh, prirodnykh i stochnykh vod metodom atomno-absorbcionnoj spektrometrii. Gosudarstvennyj komitet Rossijskoj Federacii po ohrane okruzhajushhej sredy. M., 1998 god (izdanie 2010 goda) [Quantitative chemical analysis of waters. Method of measuring mass concentrations of cobalt, nickel, copper, zinc, chromium, manganese, iron, silver, cadmium and lead in samples of drinking, natural and waste waters by atomic absorption spectrometry. State Committee of the Russian Federation for Environmental Protection, Moscow, 1998 (ed. 2010)]. 24 p. (in Russian).

RD 52.04.333-93. Metodicheskie ukazaniya. Hromatograficheskij metod opredelenija sodержaniya hloridov, nitratov, sul'fatov, litija, natrija, ammonija i kalija v atmosferykh osadkah. Federal'naja sluzhba Rossii po gidrometologii i monitoringu okruzhajushhej sredy [Methodological guidelines. Chromatographic method for determining the content of chlorides, nitrates, sulfates, lithium, sodium, ammonium and potassium in atmospheric precipitation. Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environmental Monitoring]. Moscow, 1993. 21 p. (in Russian).

Selegej T.S. Formirovanie urovnja zagrijaznenija atmosfernogo vozduha v gorodakh Sibiri [Formation of the level of atmospheric air pollution in the cities of Siberia]. Nauka. 2005. 347 p. (in Russian).

Talovskaja A.V. Jekogeohimija atmosferykh ajerozolej na urbanizirovannykh territorijah juga Sibiri (po dannym izuchenija sostava nerastvorimogo osadka snegovogo pokrova) [Ecogeochemistry of atmospheric aerosols in urbanized areas of southern Siberia (based on the study of the composition of insoluble snow cover sediment)]: DSc (Dr. of Geol.-min.) thesis. Tomsk. 2022. 373 p. (in Russian).

Air Resources Laboratory. HYSPLIT. URL: <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/> (accessed: 22.06.2024).

Dong Z.W., Kang S.C., Qin X., Li X.F., Qin D.H., Ren J.W. New insights into trace elements deposition in the snow packs at remote alpine glaciers in the northern Tibetan plateau, China // Sci. Total Environ. 2015. Vol. 529. P. 101–113. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.065

Eichler A., Nalivaika P., Kakareka S., Kukharchyk T., Jenk T. M. et al. Recent heavy metal pollution from the territory of the former Soviet Union (FSU): Ice core records and emission estimates // Science of The Total Environment. 2025. Vol. 983. P. 179632. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.179632

Jomova K., Makova M., Alomar S., Alwasel S., Nepovimova E. et al. Essential metals in health and disease // Chemico-biological interactions. 2022. Vol. 367. P. 110173. doi: 10.1016/j.cbi.2022.110173

Protocol on Heavy Metals // UNECE. URL: <https://unece.org/environmental-policy/air/protocol-heavy-metals> (accessed: 09/25/2024)

Li D., Zheng J., Yang M., Meng Y., Yu X. et al. Atmospheric wet deposition of trace metal elements: Monitoring and modelling // Sci. Total Environ. 2023. Vol. 893. P. 164880. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164880

READY NOAA HYSPLIT. URL: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php> (accessed: 22.06.2024).

US EPA Method 1631, Revision E. 2002. Mercury in Water by Oxidation, Purge and Trap, and Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry. In U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology, Engineering and Analysis Division (4303). Washington, D.C. 46 p.

Vach M., Skřivan P., Rohovec J. et al. Inorganic Pollutants in Wet Atmospheric Deposition and the Trajectories of Their Possible Transport // Water Air Soil Poll. 2009. V. 196, P. 369–383. doi: 10.1007/s11270-008-9784-y

IDENTIFICATION OF SOURCES OF EMISSIONS OF POLLUTANTS WITH ATMOSPHERIC DEPOSITION IN THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA

L.V. Kolotushkina, S.S. Eyrikh, T.S. Papina

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul,

E-mail: kolotushkina_l@iwep.ru, stella@iwep.ru, tanya.papina@mail.ru

This article focuses on the study of atmospheric pollutant input via wet precipitation to the south of Western Siberia (Barnaul as a case study). Monitoring the composition of precipitation (snow, rain) remains one of the most effective methods for assessing environmental pollution. To assess the level of atmospheric pollution, precipitation samples were analyzed for soil (Al, Ca), natural-anthropogenic (As, Fe, K, Mn, Na), predominantly anthropogenic elements (Cd, Cu, Ni, Sn, Pb, Zn, V), and mercury (Hg) as a global pollutant. Based on the calculated volume weighted concentrations and fluxes of pollutants via wet precipitation, a way for identifying the main sources of pollutant input to the study area using backward air mass trajectories (HYSPLIT) was proposed.

Keywords: atmospheric pollution; wet precipitation; sources of pollutants; HYSPLIT; south of Western Siberia.

Received November 6, 2025. Accepted: December 5, 2025

Сведения об авторах

Колотушкина Лилия Вячеславовна – младший научный сотрудник Химико-аналитического центра Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0003-2594-0659. E-mail: kolotushkina_l@iwep.ru.

Эйрих Стелла Сергеевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Химико-аналитического центра Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0001-9346-2068. E-mail: stella@iwep.ru.

Папина Татьяна Савельевна – доктор химических наук, начальник Химико-аналитического центра Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0002-8388-7289. E-mail: tanya.papina@mail.ru.

Information about authors

Kolotushkina Liliya Vyacheslavovna – Junior researcher at the Chemical Analytical Center of the Institute for Water and Environmental Problems for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya Str., 656038, Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0003-2594-0659. E-mail: kolotushkina_l@iwep.ru.

Eyrikh Stella Sergeevna – PhD in Chemistry, senior researcher at the Chemical Analytical Center of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0001-9346-2068. E-mail: stella@iwep.ru.

Papina Tatyana Savelyevna – Dr Sc. in Chemistry, Head of the Chemical Analytical Center of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0002-8388-7289. E-mail: tanya.papina@mail.ru.