

Ш. Абдо, Ю. В. Королева

**ОЦЕНКА АТМОСФЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ ЦИНКА
В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
БОКОПЛОДНЫХ ВИДОВ МХОВ**

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

Поступила в редакцию 26.02.2025 г.

Принята к публикации 10.04.2025 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-2-6

101

Для цитирования: Абдо Ш., Королева Ю. В. Оценка атмосферного осаждения цинка в Калининградской области с использованием бокоплодных видов мхов // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №2. С. 101–116. doi: 10.5922/vestniknat-2025-2-6.

Исследование направлено на изучение атмосферного осаждения цинка на территории Калининградской области с использованием биомониторинга. В качестве биоиндикаторов выбраны мхи видов *Pleurozium schreberi* и *Hylocomium splendens*, собранные в 2020 г. Основной целью работы стала оценка пространственного загрязнения атмосферного воздуха цинком в регионе и выявление источников его поступления. Для анализа содержания металла в образцах мхов применялся метод эпителового нейтронно-активационного анализа. Полученные данные обработаны с использованием статистических методов и моделирования обратных траекторий воздушных масс. Результаты показали, что концентрации цинка во мхах значительно варьировались, достигая максимальных значений в южной и центральной частях региона. Сравнение с данными 2015 г. выявило увеличение уровня накопления цинка на 46 %. Установлено, что основными источниками загрязнения являются как локальные промышленные объекты, так и трансграничный перенос воздушных масс из Европы, особенно в условиях преобладания юго-западных ветров.

Ключевые слова: мхи-биомониторы, нейтронно-активационный анализ, цинк, атмосферное загрязнение, трансграничный перенос, Калининградская область

Введение

Атмосферные загрязнители, в том числе тяжелые металлы (ТМ), остаются глобальной экологической проблемой, требующей комплексного научного анализа. В фокусе современных исследований наряду с изучением аэрозолей и парниковых газов (озон, оксиды азота, диоксид серы) особое внимание уделяется ТМ — свинцу, кадмию и цинку, которые характеризуются высокой устойчивостью в окружающей среде и способностью к биоаккумуляции. Цинк, например, играет двойственную роль: в низких концентрациях он участвует в физиологических процессах растений (повышение устойчивости к абиотическим стрес-



сорам, таким как засуха и гипотермия) и животных (регуляция репродуктивных функций), однако его избыток провоцирует оксидативный стресс, системное воспаление и дисфункцию органов у человека [1].

Тяжелые металлы, включая цинк, поступают в водные экосистемы через речной и подземный сток [2], промышленные сточные воды, а также в результате деятельности портовых сооружений и судоходства. Значительный вклад в загрязнение среды вносят противообрастающие краски, содержащие цинк и используемые для покрытия корпусов судов. Их выщелачивание приводит к высвобождению металла в морскую воду [3; 4]. Дополнительным источником является атмосферное осаждение: металлы, переносимые осадками, вовлекаются в биогеохимические циклы, а затем повторно попадают в воздух прибрежных зон за счет испарения и эрозии [5]. Ключевым аспектом экологической оценки выступает не только наличие цинка в этих процессах, но и его концентрация. Повышенные уровни накопления металла создают кумулятивный эффект, нарушая баланс экосистем и представляя риск для здоровья человека, что подчеркивает необходимость мониторинга и регулирования антропогенных выбросов.

Несмотря на то что на территории Калининградской области отсутствуют крупные промышленные кластеры, локальные антропогенные выбросы цинка (например, от автотранспорта, малых производственных предприятий или объектов энергетики) могут вносить заметный вклад в загрязнение атмосферы. Однако ключевой фактор, определяющий антропогенную нагрузку тяжелыми металлами в регионе, — его уникальное географическое положение. Будучи полуанклавом, окруженным промышленно развитыми территориями Европы (включая горнодобывающие районы Польши, энергетические комплексы Германии и металлургические центры Скандинавии), регион подвержен интенсивному трансграничному переносу загрязнителей. Этот процесс усиливается преобладающими западными и юго-западными воздушными массами, которые переносят частицы ТМ на значительные расстояния.

Роль трансграничного атмосферного переноса как доминирующего источника загрязнения ТМ в юго-восточной части Балтийского моря подтверждается комплексом исследований. Например, работы [6; 7] демонстрируют корреляцию между промышленными выбросами в Центральной Европе и концентрациями металлов в прибрежных экосистемах Калининграда. Более того, моделирование, проведенное В. Ю. Топчей и В. А. Чечко, выявило, что до 60–70 % атмосферных осадений цинка в регионе имеют антропогенное происхождение, что подчеркивает критическую зависимость локальной экологической ситуации от глобальных атмосферных процессов [5].

Для мониторинга атмосферных загрязнений применяются методы прямых измерений, моделирования дисперсии и биоиндикации. Биоиндикация с использованием бриофитов (мхов) представляет собой эффективный инструмент оценки атмосферного осаждения металлов благодаря их морфофизиологическим особенностям: отсутствию кутикулы и корневой системы, способности поглощать элементы непосред-



ственно из воздуха, а также широкому распространению. Концентрации микроэлементов в тканях мхов коррелируют с уровнем атмосферного осаднения мхов, что делает эти организмы надежными биоиндикаторами [8]. В исследованиях часто используются виды бокоплодных мхов (например, *Pleurosium schreberi*, *Hylocomium splendens*, *Hypnum cupressiforme*), характерные для конкретных экосистем [9; 10].

В России методы биомониторинга с применением мхов успешно реализуются в различных регионах, включая северо-западные территории (Ленинградская область, Кольский полуостров, Карелия), Южный Урал [11] и Центральную Россию [12; 13]. В Калининградской области мониторинг атмосферного осаднения микроэлементов с использованием мхов проводится с 1994 г. в рамках программы *ICP Vegetation*, с периодичностью раз в пять лет [14]. Данные, полученные в 2020 г., включены в общеевропейский атлас атмосферных осаднений ТМ.

Для идентификации источников и траекторий переноса загрязнителей широко применяется моделирование обратных воздушных траекторий с использованием программы HYSPLIT. Этот метод позволяет реконструировать пути перемещения воздушных масс и определять потенциальные регионы — источники загрязнения, что особенно актуально для оценки трансграничного вклада. Интеграция данных биомониторинга с результатами HYSPLIT-моделирования повышает точность интерпретации пространственного распределения загрязнителей [15].

Цель исследования — оценка атмосферного осаднения и пространственного распределения цинка на территории Калининградской области в 2020 г. на основе данных биомониторинга с использованием бокоплодных мхов. Результаты сопоставляются с показателями 2015 г., а также с данными аналогичных исследований в России и Европе за 2020 г. [16–20].

Объект и методы исследования

Калининградская область Российской Федерации (КО РФ), будучи эксклавом, окруженным территориями Европейского союза, характеризуется сложным сочетанием ландшафтно-топографических особенностей, влияющих на пространственное распределение тяжелых металлов. Регион преимущественно равнинный (0–50 м над уровнем моря), с возвышенностями на юге (Вармийская — 101 м) и юго-востоке (Виштынецкая — 230 м), а также польдерными низменностями на севере. Исследования демонстрируют, что аккумуляция ТМ коррелирует с геоморфологией: холмисто-моренные урочища с фрагментированными лесами и распаханые озерно-ледниковые равнины выступают зонами повышенного осаднения загрязнителей, тогда как крупные сосновые массивы минимизируют их концентрацию [21].

Основными предприятиями, которые осуществляют выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух на территории региона, являются ОАО «Прибалтийский судостроительный завод «Янтарь», ООО «Лукойл — Калининградморнефть», Калининградская ТЭЦ, ОАО «Балт-

кран», ЗАО «ЖБИ-1», «ЖБИ-2», ОФО «Силикатстром», ООО «Томас Бетон», ООО «ВестСтайлПрофи», ОАО «Калининградский тарный комбинат», НПО «Рыбтехцентр», ОАО «Калининградский морской торговый порт», ФГУП «Калининградский морской торговый порт», ООО «Калининградгазавтоматика».

Образцы мхов *Pleurozium schreberi* и *Hylocomium splendens* (трехлетний прирост) были отобраны в августе – октябре 2020 г. на 33 равномерно распределенных площадках Калининградской области (рис. 1) в соответствии с протоколом программы *ICP Vegetation*, регламентирующим плотность сети пробоотбора $\geq 1,5$ образцов/1000 км² (для региона – 33 точки, что превышает минимальный порог в 13 точек). Для минимизации локальных антропогенных воздействий площадки располагались на открытых участках (50×50 м), удаленных от транспортных магистралей (≥ 300 м от автострад, ≥ 100 м от грунтовых дорог) и вне зоны влияния древесного полога. Выбор количества точек учитывал ландшафтную структуру региона: низкую лесистость (16 %), высокую долю сельхозугодий (> 50 %) и урбанизированных территорий, что согласуется с критериями репрезентативности пробоотбора.

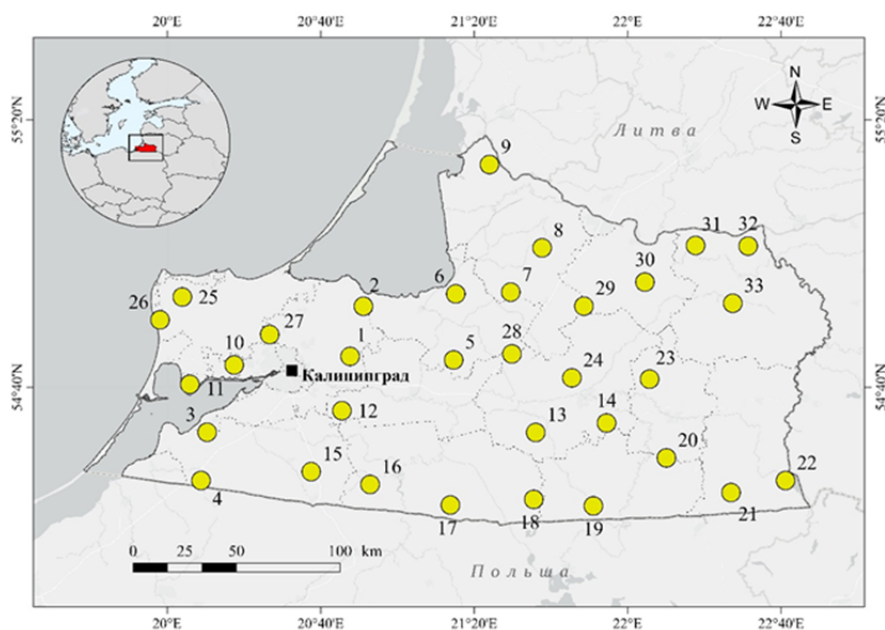


Рис. 1. Схема пробоотбора видов мхов в Калининградской области

После ручного сбора образцы помещались в полиэтиленовые пакеты, очищались от механических примесей, высушивались при 40 °С и упаковывались в бумажные пакеты для дальнейшего анализа в соответствии с руководством *ICP Vegetation* [2020]. Определение содержания тяжелых металлов, включая цинк, проводилось методом эпитеплового нейтронно-активационного анализа (ЭНАА) на реакторе ИБР-2 (ОИЯИ, г. Дубна). Образцы массой ~0,3 г измельчались и разделялись: для ко-



роткоживущих радионуклидов использовалась полиэтиленовая фольга, для долгоживущих — алюминевые контейнеры. После облучения количественный анализ элементов выполнялся методом гамма-спектрометрии с германиевым детектором [22].

Для визуализации пространственного распределения содержания цинка в мхах на территории Калининградской области была построена карта распределения с использованием программного пакета ArcGis Pro 2.8.0. Статистическая обработка результатов, включая вычисление описательных статистик, коэффициента корреляции и проверку нормальности распределения, была проведена с использованием программных продуктов MS Excel и SPSS Statistica 23.0. Обратные траектории воздушных потоков, рассчитанные с использованием гибридной сингл-частицы лагранжевой интегрированной траектории (HYSPLIT) модели, помогли оценить наиболее вероятные пути загрязнителей и выявить их потенциальные источники. Анализ этих траекторий позволяет определить происхождение и направления переноса атмосферных загрязнителей.

Результаты и обсуждение

Массив экспериментальных данных (2020) по содержанию цинка в зеленых частях бokoплодных мхов обработали с помощью инструмента «описательная статистика», определили основные характеристики (табл. 1). Сравнив данные с аналогичными результатами за 2015 г., установили наличие в каждой из выборок значений, которые «выпадают» из совокупности, то есть превышают среднее значение на удвоенную величину стандартного отклонения ($C_{\text{средн}} \pm 2S$) [23]. В дальнейшем из каждой выборки эти значения исключили — 98,8 мг/кг (2015) и 243 мг/кг (2020), полагая, что это аномальные результаты. Содержание цинка во мхах в 2020 г. в среднем выше, чем в 2015-м, различие это значимо, что было подтверждено однофакторным дисперсионным анализом ($p < 0,05$, $F > F_{\text{крит}}$). Без учета аномальных значений разница в накоплении цинка также очевидна, что подтверждается расчетами.

Таблица 1

Статистический анализ содержания цинка (мг/кг сухой массы) в образцах мхов (2015, 2020)

Статистика	2015	2015 без аномальных значений	2020	2020 без аномальных значений
Среднее	35,7	33,73	52,2	46,19
Стандартная ошибка	2,25	1,12	6,32	2,15
Медиана	32,7	32,5	42,0	41,8
Стандартное отклонение	12,9	6,34	36,3	12,17
Дисперсия выборки	167	40,2	1317	148
Минимум	19,5	19,5	31,9	31,9
Максимум	98,8	47	243	81



Окончание табл. 1

Статистика	2015	2015 без аномальных значений	2020	2020 без аномальных значений
Коэффициент вариации, %	36,2	18,8	69,6	26,3
Эксцесс	18,3	0,0008	25,6	1,93
Асимметричность	3,79	0,404	4,82	1,35
Асимптотическая значимость (2-сторонняя) критерий Кол- могорова — Смирнова	0,000	0,200	0,000	0,025
Число проб	33	32	33	32

106

Медианное значение как с учетом аномальных величин, так и без него меньше среднего, следовательно, распределение цинка во мхах на территории Калининградской области характеризуется в основном концентрациями выше 30 мг/кг в 2015 г. и 40 мг/кг в 2020 г. Аномальное содержание цинка, установленное в южной части региона на границе с Республикой Польша, зафиксировано в одном и том же месте в 2015 и 2020 гг. Характер распределения выборочной совокупности проверили с использованием непараметрического критерия Колмогорова — Смирнова.

Расчетная значимость выборочных совокупностей с учетом аномальных значений показала невозможность отнесения выборок за 2015 и 2020 гг. к нормальному распределению. Но при исключении максимального значения из выборок распределение становится нормальным ($p > 0,05$) или близким к нему. Этот вывод подтверждают асимметричность и эксцесс. У нормальной выборочной совокупности эти величины должны быть равны нулю. В нашем случае имеется правосторонняя асимметрия, которая подтверждает преобладание в выборке повышенных концентраций цинка.

Коэффициент вариации составляет 36 % в 2015 г. и 69 % в 2020 г. Исключив аномальные значения, получаем однородную выборку с преобладанием концентраций цинка в пределах средних значений и выше (соответственно 18 и 26 %). Среднее и медианное значение содержания цинка во мхах в 2020 г. выше по сравнению с аналогичными показателями 2015 г. более чем на 40 %. Учитывая суммарное содержание по всем мониторинговым участкам, можно утверждать, что уровень загрязнения Калининградской области увеличился на 46 %, а без учета аномальных значений — на 37 %. Значения остаются в пределах допустимых норм, при этом средняя концентрация цинка составляет 50–55 мг/кг [23].

Максимальная концентрация цинка 98,8 мг/кг установлена в 2015 г. в Правдинском районе, в лесном массиве, расположенном на Вармийской возвышенности, вблизи государственной границы с Польшей. На этом же участке в 2020 г. также было зафиксировано максимальное значение — 243 мг/кг, что практически в 2,5 раза выше предыдущего уровня. Максимумы цинка на этом участке подтверждаются предыдущими исследованиями, который показывают тенденцию к увеличению



уровня цинка за 25-летний период начиная с 1994 г. Повышенный уровень цинка был выявлен и на других участках: к северо-западу от областного центра, к северо-востоку от Черняховска, а также на побережье Калининградского залива (южнее Калининграда) с содержаниями соответственно 79, 81 и 62 мг/кг.

Калининградская область входит в 10 регионов с высоким показателем количества автомобилей на душу населения. Автотранспорт вносит преимущественный вклад в валовый выброс загрязняющих веществ в атмосферу, удельный вес которого оценивается в 83 % [24]. Область представляет собой регион с развитым сельским хозяйством. На сегодняшний день земли сельскохозяйственного назначения занимают больше половины территории (52,9 %).

По соотношению промышленности и сельского хозяйства в 2020 г. на территории Калининградской области выделяются сельскохозяйственные районы: Гвардейский МО, Краснознаменский МО, Неманский МО, Нестеровский МО, Озерский МО, Полесский МО, Правдинский МО; промышленные районы: Балтийский ГО, Мамоновский ГО, Советский ГО, Черняховский МО; смешанные районы: Багратионовский МО, Гурьевский МО, Гусевский ГО, Зеленоградский МО, Ладушкинский ГО, Пионерский ГО, Светлогорский ГО, Славский МО, Янтарный ГО. Смешанные районы выделяются в связи с наличием в них промышленности, развитой рекреации, а также сельского хозяйства (рис. 2). Большая часть выбросов от промышленных предприятий и агрокомплексов приходится на центральную часть региона и Самбийский (Калининградский) полуостров [24].



Рис. 2. Ранжирование территории Калининградской области по типу хозяйственной деятельности

В соответствии с пространственной картой распределения (рис. 3) цинк интенсивнее накапливается мхами в западной части Калининградской области, вблизи промышленных центров региона. Это объясняется не только более высоким уровнем урбанизации, но и климатическими и ландшафтными особенностями региона. Пятна с повышенным содержанием цинка в районе областного центра и второго по значимости опорного транспортного узла региона — г. Черняховска свидетельствуют о влиянии локальных источников загрязнения, таких как промышленные предприятия и транспорт. Для прибрежной зоны высокое содержание цинка обусловлено характером производств, расположенных в акватории Калининградского и Куршского заливов, Балтийского моря.

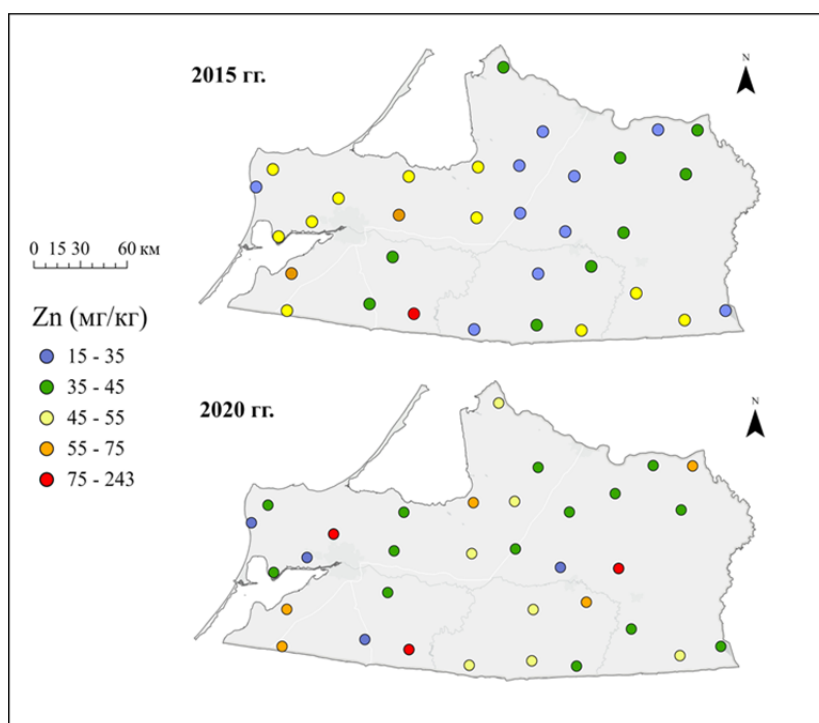


Рис. 3. Содержание цинка в мхах на территории Калининградской области в 2015 и 2020 гг.

Аккумуляция цинка мхами зависит от ряда факторов: естественно-го фона, трансграничного переноса, локальных источников загрязнения, выщелачивания растительности и океанического аэрозоля, который имеет большое значение для Балтийского региона. Содержащиеся в океанических аэрозолях ионы (Na^+ , K^+ , Cl^-) влияют на поглощающую и удерживающую способность мхов, поэтому необходимо учитывать этот факт при оценке содержания микроэлементов во мхах и оценки степени загрязнения территории прибрежной зоны [25].



Концентрация цинка во мхах западного побережья (пос. Янтарный) составила 32 мг/кг, увеличиваясь в северо-восточном (пос. Красноторовка) и юго-восточном (г. Светлый) направлениях на 30 %. Основной вклад в распределение атмосферных выпадений загрязняющих веществ вносят юго-западные и южные ветры, на долю которых приходится свыше 50 % повторяемости. Основные тренды и характерные особенности содержания цинка, как и других загрязняющих веществ, соответствуют этим переносам [26; 27].

Наиболее высокие значения цинка установлены в южной части региона, вдоль польской граница с запада на восток, они чередуются с низкими концентрациями. Южная граница РФ проходит по Вармийской и Вишневецкой возвышенностям, максимальные концентрации цинка наблюдаются на повышенных элементах рельефа 57, 243, 53, 52 мг/кг, на меньших высотах уровень накопления металла снижается до 32–35 мг/кг. Таким образом, можно говорить о своеобразных «ветровых коридорах», которые способствуют дальнейшему перемещению потока загрязняющих веществ без концентрирования их на наветренных склонах даже небольших возвышенностей [14]. В направлении от южной границы формируется тренд в северо-восточном направлении до Вислинского залива с постепенным понижением уровня цинка до 50 мг/кг.

К ландшафтным факторам добавляется влияние трансграничного атмосферного переноса. Осаждение ТМ на территории Калининградской области может быть обусловлено преобладающими ветрами, которые переносят загрязняющие вещества на большие расстояния от промышленных и сельскохозяйственных предприятий Европы.

Локализация загрязнения внутри территории вне «ветрового коридора», скорее всего, связана с влиянием местных источников. В центральной части региона, в Черняховском районе (второй по значимости промышленный район), наблюдается высокий уровень цинка во мхах (81 мг/кг) в юго-восточном направлении от города, что с учетом преобладающих направлений ветра обусловлено деятельностью промышленно-индустриального комплекса города. Примечательно, что в северо-западном направлении уровень накопления цинка мхами составляет всего 34 мг/кг.

На северо-востоке региона в Краснознаменском районе также отмечается высокий уровень цинка — 56 мг/кг. В Краснознаменском районе развито сельское хозяйство, и источником загрязнения может быть как ветровой перенос пылевых частиц с пашен, так и трансграничный перенос с территории соседнего государства.

Повышенное содержание цинка на Самбийском (Калининградском) полуострове связано с воздействием местных источников: машино-, судостроение, судоремонт, производство строительных материалов, высокий трафик. Очевидно, что одна из причин, приведших к увеличению загрязнения, — это рост уровня промышленности региона в последнее десятилетие.



Сравнение массива данных по содержанию цинка во мхах в 2015 и 2020 гг. выявило существенные отличия в уровне накопления этого металла. Средняя и медианная концентрации цинка в образцах мха за 2015 г. соответственно составили 35,7 и 32,7 мг/кг, что ниже средней концентрации этого элемента в 2020 г. (52,2 и 42,0 мг/кг), в процентном отношении повышение составило 46 и 28 %. На площадках пробоотбора в среднем произошло статистически значимое увеличение концентрации. Коэффициент корреляции (по Пирсону) между накоплением цинка в мхах за 2015 и 2020 гг. составил $r^2=0,87$ ($p=0,01$). Это указывает на относительно однородное увеличение загрязнения по всей территории региона, вызванное внешними факторами. Количество атмосферных осадков за трехлетний период увеличилось на 10 % в 2020 г. по сравнению с 2015 г. [28]. Содержание цинка в аномальной точке (образец №16) в районе границы с Польшей увеличилось с 98 мг/кг в 2015 г. до 243 мг/кг в 2020 г., что составляет рост в 2,5 раза. В зоне влияния областного центра концентрация цинка выросла в 1,8 раза, в центральной части региона, к северо-востоку от г. Черняховска — в 2,5 раза, на северо-востоке области, в приграничной с Литвой зоне — в 1,7 раза.

Сравнение медианных значений содержания цинка в образцах мха Калининградской области с результатами аналогичных исследований, проведенных в других регионах России и за рубежом в 2020 г., установило, что уровень накопления цинка в Калининградской области на 26 % ниже по сравнению с Московской областью, при этом в 1,5 раза выше, чем в Республике Крым, и в 1,35 раза выше накопления этого элемента мхами на территории Косово и Метохии (табл. 2). Данные по аналогичному исследованию в Молдове сопоставимы с результатами по Калининградской области: без учета аномальной пробы установлено, что диапазон варьирования концентрации цинка во мхах и медианные значения находятся примерно на одном уровне.

Таблица 2

Сравнение значений содержания цинка (мг/кг)
с результатами аналогичных исследований в России и других странах в 2020 г.

Регион	Количество образцов	Медиана	Диапазон	Ссылка
Калининградская область, 2020	33	42	31,9–243	Текущее исследование
Калининградская область, 2015	33	32,7	19,5–98,8	[21; 26]
Московская область, 2020	156	57	1,3–145	[16]
Горный Крым, 2020	26	27,3	14,5–52,3	[17]
Латвия, 2020	103	30,6	19,6–50,1	[18]
Автономный край Косово и Метохия, 2020	45	31	20–150	[19]
Молдова, 2020	41	39	25–86	[20]



Для Юго-Восточной Балтики, где расположена Калининградская область, характерны юго-западный перенос воздушных масс, сильная циклональная активность [29], высокая влажность и большое количество осадков. Это приводит к тому, что трансграничные потоки атмосферного воздуха «разряжаются» над территорией региона, вымывая загрязняющие вещества из приземного воздуха. Далее действие юго-западных потоков ослабевает и уровень загрязнения в регионах, расположенных севернее Калининградской области, уже зависит от наличия местных источников загрязнения. Эту версию подтверждает мониторинг накопления тяжелых металлов в Латвии: медианное значение цинка в бокоплодных видах мхов на 27 % ниже, чем в Калининградской области, диапазон варьирования составляет от 30,5 до 50,1 мг/кг. В Калининградской области максимальный уровень накопления значительно выше, причем на концентрацию более 50 мг/кг приходится 36 % всех проб.

111

Наблюдаемое большее содержание цинка в юго-западной части Калининградской области, в частности в точках 3, 4 и 16, позволило выдвинуть гипотезу о возможном влиянии на загрязнение региона трансграничного переноса с территории Польши. Для дальнейшего подтверждения этой гипотезы был проведен всесторонний анализ обратных траекторий воздушных масс, достигающих точки отбора с максимальным содержанием цинка в приграничной с Польшей зоне. Этот анализ охватывал трехлетний период с 2018 по 2020 г. (соответствующий трехлетнему периоду роста мха). Целью расчета обратных траекторий воздушных масс было выявление возможных источников и путей загрязняющих веществ в аномальной точке. Выбор этого конкретного места для исследования был основан на нескольких ключевых факторах, прежде всего на выявлении высоких концентраций цинка на южной границе, что указывает на его потенциальную загрязненность. Географическая близость к границе с Польшей делает это место удобным для изучения влияния трансграничного переноса загрязняющих веществ.

Обратные траектории воздушных масс, достигающих места отбора проб, были рассчитаны с использованием модели HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) от NOAA (Национальное управление океанических и атмосферных исследований США) с помощью TrajStat в Meteoinfo [32]. В модели HYSPLIT использовались сеточные метеорологические данные NOAA из Глобальной системы ассимиляции данных (GDAS-1) с 23 вертикальными уровнями от 1000 до 20 гПа и горизонтальным разрешением 1° по широте $\times 1^\circ$ по долготе в глобальном домене.

Воздушные массы рассчитывались для каждого года с 2018 по 2020 г., общее время пробега для каждой обратной траектории в HYSPLIT составляло 72 ч с прибытием воздушной массы на точку каждые 3 ч, чего обычно достаточно для исследования влияния дальнего и трансграничного переноса загрязняющих веществ из соседних стран. В данном исследовании для расчетов HYSPLIT была выбрана высота прибытия

воздушной массы 500 м над уровнем земли, так как крупномасштабное движение атмосферных аэрозольных масс в основном происходит в пограничном слое атмосферы.

Анализ атмосферной циркуляции выявил доминирующую роль западных и юго-западных воздушных масс (58 % траекторий, рис. 4, кластеры 1 и 4), переносящих загрязнители из промышленных центров Германии (металлургия) и Польши (угольные ТЭЦ). В Польша уголь обеспечивает 78 % электроэнергии [33]. При сжигании угля металлы, в том числе цинк, адсорбируются на частицах PM_{2.5}/PM₁₀ и транспортируются на сотни километров. Взаимодействие с SO₂ и NO_x усиливает кислотное осаждение и биодоступность металлов, а устойчивые аэрозоли обеспечивают дальний перенос [23].

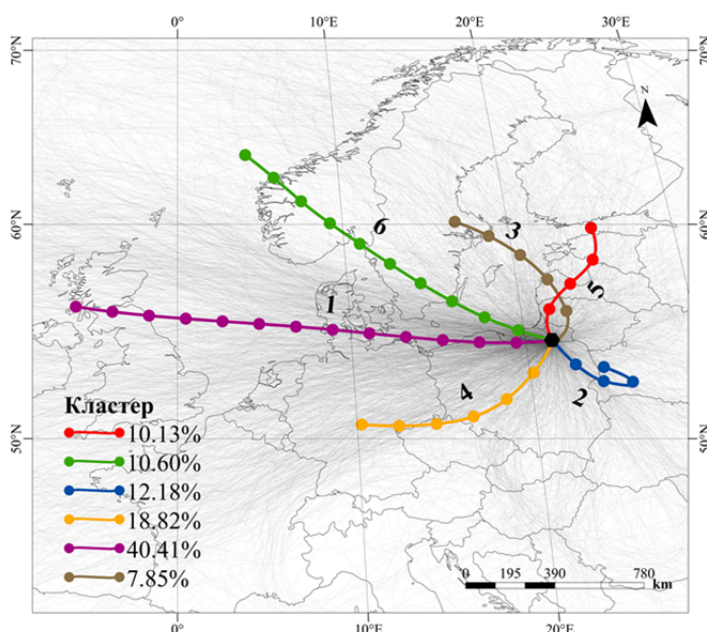


Рис. 4. Кластеризация 72-часовых обратных траекторий в Калининградской области (2018–2020)

Восточные и северные ветра (42 % траекторий, рис. 4, кластеры 2–3), приносящие воздух из менее промышленных регионов (Беларусь, Прибалтика), вносят меньший вклад. Однако в периоды инверсий они способствуют накоплению локальных выбросов, повышая риски в урбанизированных зонах.

Выводы

По данным мониторинга 2020 г., аккумуляция цинка бокоплодными мхами (*P. schreberi* и *H. splendens*) увеличилась на 46 % по сравнению с 2015 г. Средняя и медианная концентрации цинка составили 52,2 и



42,0 мг/кг соответственно. Рост загрязнения отмечался во всех исследуемых районах региона, что подтверждается сравнением с предыдущими исследованиями: концентрация цинка во мхах статистически значимо увеличилась на всей территории Калининградской области. Наиболее выраженный рост наблюдается в зоне влияния областного центра и г. Черняховска и на северо-востоке области, в приграничных с Литвой районах. Промышленные объекты региона наряду с трансграничным переносом загрязняющих веществ являются ключевыми источниками цинка в атмосферном воздухе.

Максимальные уровни накопления цинка зафиксированы в юго-западной части региона вблизи Калининградского залива. Повышенные концентрации также выявлены в Багратионовском районе, на участке, расположенном в 14 км от границы с Польшей.

Преобладание юго-западных и южных ветров (58 % воздушных масс) способствует переносу цинка в регион. Многочисленные исследования подтверждают, что трансграничный атмосферный перенос тяжелых металлов остается значимым фактором загрязнения окружающей среды в Калининградской области.

Список литературы

1. Vučković I., Špirić Z., Stafilov T., Kušan V. Biomonitoring of air pollution with zinc in Croatia studied by moss samples and ICP-AES // Contributions, Section of Natural, Mathematical and Biotechnical Sciences. 2017. Vol. 33 (1-2). doi: 10.20903/CSNMBS.MASA.2012.33.1-2.34.
2. Михневич Г.С., Кречик В.А., Крек А.В., Данченков А.Р. Транспорт тяжелых металлов с подземным стоком в Балтийское море // Балтийский морской форум : матер. VIII Международного Балтийского морского форума : в 6 т. Калининград, 2020. Т. 3. С. 157–163. EDN: SIAAQP.
3. Siudek P. Chemical composition and source apportionment of ambient PM_{2.5} in a coastal urban area // Northern Poland Chemosphere. 2024. Vol. 356. 141850. doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.141850.
4. Maljuštenko I., Hassellöv I.-M., Eriksson M. et al. Modelling spatial dispersion of contaminants from shipping lanes in the Baltic Sea // Marine Pollution Bulletin. 2021. Vol. 173. Part A. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112985.
5. Топчая В.Ю., Чечко В.А. Формирование потоков гетерогенных атмосферных выпадений в береговой зоне юго-восточной части Балтийского моря // Успехи современного естествознания. 2023. №2. С. 65–75. doi: 10.17513/use.38000. EDN: QRYWAD.
6. Ruoho-Airola T., Eilola K., Savchuk O. P. et al. Atmospheric nutrient input to the baltic sea from 1850 to 2006: A reconstruction from modeling results and historical data // Ambio. 2012. Vol. 41(6). P. 549–557. doi: 10.1007/S13280-012-0319-9/FIGURES/3.
7. Siudek P., Falkowska L., Brodecka A. et al. Mercury in precipitation over the coastal zone of the southern Baltic Sea, Poland // Environmental Science and Pollution Research. 2015. Vol. 22, №4. P. 2546–2557. doi: 10.1007/S11356-014-3537-9/TABLES/4.
8. Rühling Å. Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe: estimation based on moss analysis. Nordic Council of Ministers, 1994.
9. Berg T., Royset O., Steinnes E. Moss (*Hylocomium splendens*) used as biomonitor of atmospheric trace element deposition: estimation of uptake efficiencies // Atmospheric Environment. 1995. Vol. 29, №3. P. 353–360.



10. Onianwa P.C. Monitoring atmospheric metal pollution: a review of the use of mosses as indicators // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2001. Vol. 71. P. 13–50.
11. Смирнов Л.И., Фронтасьева М.В., Стейннес Э. и др. Многомерный статистический анализ концентрации тяжелых металлов и радионуклидов во мхах и почве Южного Урала // *Атомная энергия*. 2004. №97 (1). С. 68–74.
12. Ermakova E.V., Frontasyeva M.V., Pavlov S.S. et al. Air pollution studies in Central Russia (Tver and Yaroslavl Regions) using the moss biomonitoring technique and neutron activation analysis // *Journal of Atmospheric Chemistry*. 2004. Vol. 49 (1-3). P. 549–561. doi: 10.1007/S10874-004-1265-0.
13. Вергель К.Н., Фронтасьева М.В., Каманина И.З., Павлов С.С. Биомониторинг атмосферных выпадений тяжелых металлов на северо-востоке Московской области с помощью метода мхов-биомониторов // *Экология урбанизированных территорий*. 2009. №3. С. 88–95. EDN: KYFGGX.
14. Королева Ю.В. Биоиндикация атмосферных выпадений тяжелых металлов на территории Калининградской области // *Вестник Российского государственного университета им. И. Канта*. 2010. №7. С. 39–44. EDN: MSYOOH.
15. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories // *Australian meteorological magazine*. 1988. Vol. 47, №4. P. 295–308.
16. Vergel K., Zinicovscaia I., Yushin N. et al. Moss Biomonitoring of Atmospheric Pollution with Trace Elements in the Moscow Region, Russia // *Toxics*. 2022. Vol. 10, №2. doi: 10.3390/TOXICS10020066/S1.
17. Nekhoroshkov P., Peshkova A., Zinicovscaia I. et al. Assessment of the Atmospheric Deposition of Heavy Metals and Other Elements in the Mountain Crimea Using Moss Biomonitoring Technique // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, №4. P. 573. doi: 10.3390/ATMOS13040573.
18. Tabors G., Brūmelis G., Nikodemus O. et al. Decreased atmospheric deposition of heavy metals in Latvia shown by long-term monitoring using the moss *Pleurozium schreberi* // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30, №41. P. 94361–94370. doi: 10.1007/S11356-023-28922-X.
19. Paçarizi M., Stafilov T., Šajn R. et al. Estimation of Elements' Concentration in Air in Kosovo through Mosses as Biomonitoring // *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, №4. P. 415. doi: 10.3390/ATMOS12040415.
20. Zinicovscaia I., Chaligava O., Yushin N. et al. Moss Biomonitoring of Atmospheric Trace Element Pollution in the Republic of Moldova // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2022. Vol. 82, №3. P. 355–366. doi: 10.1007/S00244-022-00918-7.
21. Королева Ю.В., Пухлова И.А. Новые данные о биоконцентрировании тяжелых металлов на территории Балтийского региона // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки*. 2012. №1. С. 99–106. EDN: OPMULH.
22. Frontasyeva M.V. Neutron activation analysis in the life sciences // *Physics of Particles and Nuclei*. 2011. Vol. 42, №2. P. 332–378. doi: 10.1134/S1063779611020043.
23. Беус А.А. Геохимия окружающей среды. М., 1976.
24. Alloway B.J. Heavy metals and metalloids as micronutrients for plants and animals. Heavy metals in soils. Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Springer, 2013. P. 195–209. doi: 10.1007/978-94-007-4470-7_7.
25. Об экологической обстановке в Калининградской области в 2020 году : государственный доклад. Разд. 2. Атмосферный воздух. Калининград, 2021.
26. Berg T., Royset O., Steinnes E. Moss (*Hylocomium splendens*) used as biomonitor of atmospheric trace element deposition: estimation of uptake efficiencies // *Atmospheric Environment*. 1995. Vol. 29, №3. P. 353–360.



27. Reizer M., G. Orza J. Identification of PM10 air pollution origins at a rural background site // E3S Web Conf. 2018. Vol. 28. P. 1031.

28. Abdo S., Koroleva Y. Seasonal Characteristics of Long-Range Transport and Potential Associated Sources of Particulate Matter (PM10) Pollution at the Station Elk, Poland, on 2021–2022 Data // Geography, Environment, Sustainability. 2023. Vol. 16, №3. P. 92–101.

29. Анамян А.С., Королева Ю.В., Алексеёнок Ю.В. Биомониторинг тяжелых металлов на территории Калининградской области // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. №12–2 (102). С. 25–31. doi: 10.23670/IRJ.2020.102.12.038. EDN: QGQQDE.

30. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Специализированные массивы данных для климатических исследований // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. 2014. Вып. 177. С. 136–148. EDN: GTIUSM.

31. Баранова Г.М. Калининградская область. Климат. Калининград, 2002.

32. Wang Y.Q. MeteorInfo: GIS software for meteorological data visualization and analysis // Meteorological Applications. 2014. Vol. 21, №2. P. 360–368.

33. Eurostat Coal production and consumption statistics // Eurostat. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Coal_production_and_consumption_statistics (дата обращения: 15.01.2025).

Об авторах

Шияр Абдо – аспирант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: abdosheyar@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4343-7689

Юлия Владимировна Королева – канд. геогр. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: yu.koroleff@yandex.ru

SPIN-код: 6276-7017

ORCID: 0000-0001-7612-4454

Sh. Abdo, Yu. V. Koroleva

ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC ZINC DEPOSITION IN THE KALININGRAD REGION USING AMPHIPOD MOSS SPECIES

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Received 26 February 2025

Accepted 10 April 2025

doi: 10.5922/vestniknat-2025-2-6

To cite this article: Abdo Sh., Koroleva Yu.V., 2025, Assessment of atmospheric zinc deposition in the Kaliningrad Region using amphipod moss species, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №2. P. 101–116. doi: 10.5922/vestniknat-2025-2-6.

This study focuses on investigating atmospheric zinc deposition in the Kaliningrad Region using biomonitoring methods. The moss species Pleurozium schreberi and Hylocomium splendens, collected in 2020, were selected as bioindicators. The primary aim of the study was



to assess the spatial distribution of atmospheric air pollution by zinc in the region and to identify its sources. Epithermal neutron activation analysis was used to determine the metal content in the moss samples. The obtained data were processed using statistical methods and backward air mass trajectory modeling. The results indicated that zinc concentrations in the mosses varied significantly, reaching maximum values in the southern and central parts of the region. A comparison with 2015 data revealed a 46% increase in zinc accumulation levels. The study established that the main sources of pollution include both local industrial facilities and transboundary transport of air masses from Europe, particularly under prevailing southwesterly winds.

Keywords: moss biomonitors, epithermal neutron activation analysis, zinc, atmospheric pollution, transboundary transport, Kaliningrad Region

The authors

Sheyar Abdo, Baltic Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: abdosheyar@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4343-7689

Dr Yulia V. Koroleva, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: yu.koroleff@yandex.ru
SPIN-код: 6276-7017
ORCID: 0000-0001-7612-4454