

РТУТЬ И МИГРИРУЮЩИЕ ПТИЦЫ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

П. М. Глазов¹, Ю. Г. Удоденко², Ю. А. Лощагина¹, А. Е. Гнеденко¹, Г. М. Тертицкий¹,
А. А. Тишков¹, Чж. Ван³

¹ Институт географии РАН (Москва, Российская Федерация)

² Институт биологии внутренних вод имени И. Д. Папанина РАН (Москва, Российская Федерация)

³ Исследовательский центр эколого-природоохранных наук Академии наук Китая (Пекин, КНР)

Статья поступила в редакцию 15 июля 2025 г.

Для цитирования

Глазов П. М., Удоденко Ю. Г., Лощагина Ю. А., Гнеденко А. Е., Тертицкий Г. М., Тишков А. А., Ван Чж. Ртуть и мигрирующие птицы в российской Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 3. — С. 334—346. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-3-334-346.

Рассмотрены разные аспекты роли мигрирующих птиц в биогенной миграции ртути в Арктике. Для российской Арктики исследования такого рода единичны. Цель работы — на основании литературных данных показать роль мигрирующих околотовных и водоплавающих птиц российской Арктики в биогенной миграции ртути. В основу обзора положены зарубежные и отечественные исследования источников выбросов ртути в окружающую среду и дальнейшего ее переноса арктическими птицами в границах их пролетных путей. Временной диапазон обзора ограничен последними десятилетиями, так как нынешние закономерности миграции ртути в высоких широтах гипотетически ассоциированы с глобальным изменением климата. Также представлены первые результаты совместного российско-китайского проекта по изучению накопления и переноса ртути мигрирующими птицами Арктики на различных пролетных путях.

Ключевые слова: Арктика, водоплавающие и околотовные птицы, гнездование, миграции и зимовки птиц, ртуть (Hg), метилртуть (MeHg), ртутное загрязнение, пролетные пути.

Введение

С начала эпохи промышленной революции в окружающую среду поступают значительные объемы антропогенных выбросов ртути Hg. Эти выбросы распространяются по экосистемам в результате таких экологических процессов, как перенос в атмосфере на большие расстояния, диффузия на короткие расстояния, а также сухое и влажное осаждение. Особенно интенсивно ртуть накапливается в водно-болотных угодьях, являющихся важными резервуарами ртути [1].

Ртуть и ее неорганические и органические соединения чрезвычайно токсичны для биоты. Она обла-

дает уникальными физико-химическими свойствами, которые обуславливают ее повсеместное нахождение в окружающей среде и более высокую степень биомагнификации и биоаккумуляции по сравнению с другими тяжелыми металлами [2]. Антропогенные выбросы ртути в основном представлены неорганической Hg, но в экосистеме водно-болотных угодий могут подвергаться биологическому метилированию с образованием метилртути MeHg. MeHg представляет собой наиболее опасную форму, обладающую самой сильной нейротоксичностью среди различных соединений Hg. Из-за значительного эффекта биомагнификации MeHg в верхних звеньях пищевой цепи [3] у птиц, в частности у водоплавающих [4], происходит накопление значительных количеств MeHg, что может негативно влиять на их

© Глазов П. М., Удоденко Ю. Г., Лощагина Ю. А., Гнеденко А. Е., Тертицкий Г. М., Тишков А. А., Ван Чж., 2026

физиологию, поведение, репродукцию и выживание [5—7]. Таким образом, загрязнение окружающей среды ртутью представляет собой постоянную угрозу для здоровья и выживания птиц из-за ее устойчивости и накопления в окружающей среде. Фоновая концентрация Hg в компонентах природной среды Арктики сильно варьирует: в атмосфере она составляет 0,0015—0,0017 мкг/м³, в пресных поверхностных водах — 0,004—0,005 мкг/г, в донных отложениях арктических морей — от 0,020—0,032 до 0,040—0,056 мкг/г, в почвах — 0,01—0,1 мкг/г (в вечномёрзлых грунтах — до 0,040 мкг/г) [8]. Современные масштабы циркуляции Hg в арктической среде рассматриваются как реальная угроза из-за атмосферного переноса на значительные расстояния от источника и высокой биофильности ее соединений. Антропогенное поступление ртути в воздух, воду, почву и биоту за последние десятилетия привело к двух-трехкратному росту ее концентрации в наземных и морских экосистемах Арктики [9].

Цель работы — на основании литературных и собственных данных показать роль мигрирующих околоводных и водоплавающих птиц российской Арктики в биогенной миграции ртути.

Материалы и методы

В работе использован большой объем литературных данных (около 60 источников), в основном зарубежных, по проблеме переноса ртути арктическими птицами для выявления угроз ртутного загрязнения в циркумполярном масштабе и для их сравнения с данными первого этапа реализации нашего проекта Российского научного фонда (РНФ) для российской Арктики.

Для пространственного анализа накопления и переноса ртути мигрирующими птицами был применен подход, позволяющий оценивать изменчивость концентрации ртути в органах, крови и перьях птиц в разные периоды годового цикла вдоль пролетных путей — от мест гнездования к местам зимовок и обратно, так как источники ртутного загрязнения (накопления и рассеивания ртути в природе) могут иметь географическую неоднородность и особенности. Сравнительно-географическое сопоставление данных по концентрации ртути у различных популяций птиц, использующих разные пролетные пути и имеющих разные трофические предпочтения, позволит выявить вектор и масштабы переноса ртути мигрирующими птицами российской Арктики.

С этой точки зрения нами была поставлена задача отбора проб одних и тех же видов на разных пролетных путях и в различных частях ареала (местах зимовок, пролетных путях и местах гнездования), чтобы получить картину пространственных и сезонных изменений содержания ртути в организме мигрирующих птиц.

В мире существует восемь основных пролетных путей птиц Арктики, из которых пять проходят по территории России. В первый год реализации проек-

та РНФ нами собран материал для анализа концентрации ртути в 14 точках вдоль основных пролетных путей (рис. 1). Всего отобрано 1818 образцов у 66 видов птиц (табл. 1)

Содержание ртути в биоматериалах определяли методом пиролиза на атомно-адсорбционном спектрометре с зеемановской коррекцией RA915M, оснащенный пиролитической приставкой ПИРО (Люмэкс, Санкт-Петербург). За концентрацию ртути в тканях принимали среднее значение из трех последовательных измерений в случае, если коэффициент вариации не превышал 20%. Точность определения прибора — 0,0005 мкг/г. Градуировку спектрометра делали по стандартной методике по семи градуировочным растворам ртути ГСО. Точность анализа контролировали по сертифицированному международному материалу (CRM) DORM-4 (погрешность 5—8%).

На базе лаборатории Research Center of ECO-Environmental Sciences Академии наук Китая предполагается измерять концентрацию общей ртути THg с помощью анализатора DMA-80 в соответствии с методом 7473 (U.S.EPA 2007), а содержание метилртути MeHg — с использованием стандартного метода 1630 Агентства по охране окружающей среды США (U.S.EPA, 1998). Так будут проанализированы концентрации MeHg/THg в образцах птиц и разных сред с озера Поянху и заповедника Чжалун в Китае и озера Угий в Монголии.

Результаты исследований и их обсуждение

Ниже представлены результаты синтеза литературных данных по проблеме переноса ртути арктическими мигрирующими птицами и первые результаты анализов концентрации ртути в образцах арктических птиц, проведенных в рамках проекта РНФ, и их сопоставления с известными материалами по ртутному загрязнению биоты Арктики.

Источники ртути в окружающей среде Арктики

Ртуть поступает в атмосферу как из естественных, так и из антропогенных источников. К естественным источникам относятся вулканы и естественная дегазация с поверхности мирового океана и почв. Также большое количество ртути поступает в атмосферу в результате природных пожаров и направленного сжигания биомассы. Антропогенные поступления ртути в окружающую среду в основном связаны с кустарной добычей золота, сжиганием ископаемого топлива, такого как нефть и уголь (например, на угольных электростанциях и в котельных), что составляет 35—45% общего объема антропогенных выбросов ртути. Также источниками ртути служат сжигание отходов, выплавка и производство металлов, а также производство цемента. Суммарно в атмосферу ежегодно поступает порядка 7000—8000 т ртути, из которых объем современных антропогенных поступлений оценивается в среднем около 2000 т/год [10]. Однако дополнительным компонен-

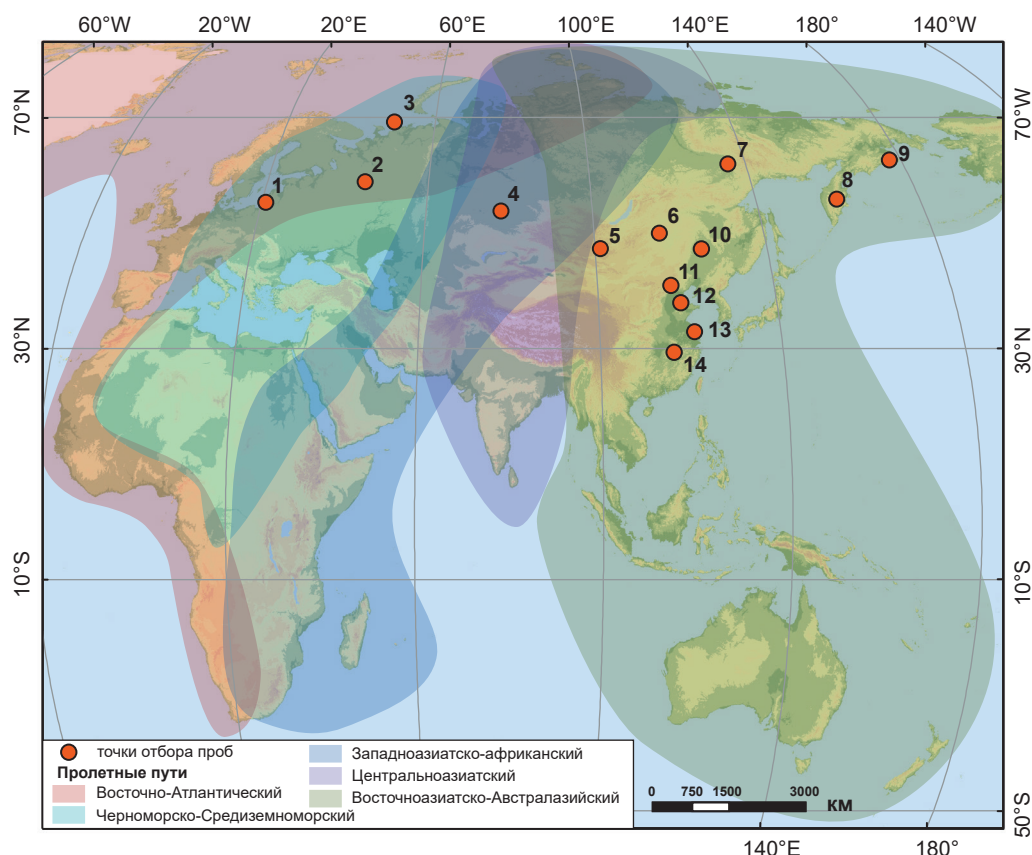


Рис. 1. Основные пролетные пути мигрирующих птиц Арктики и точки отбора проб на содержание в них ртути в рамках проекта РНФ: 1 – Калининградская область, Куршская коса; 2 – Костромская область, город Кологрив; 3 – Ненецкий автономный округ, остров Колгуев; 4 – Новосибирская область; 5 – Монголия, озеро Угий-Нуур; 6 – Забайкальский край, Даурский заповедник; 7 – Республика Саха (Якутия); 8 – полуостров Камчатка; 9 – Чукотский автономный округ, поселок Мейныпильгын; 10 – Китай, водно-болотные угодья Чжалун; 11 – Китай, водохранилище Миюнь; 12 – Китай, дельта реки Хуанхэ; 13 – Китай, парк Тиаозини; 14 – Китай, озеро Поянху

Fig. 1. Main flyways of Arctic migratory birds and sampling locations for mercury contamination as part of the RSF project: 1 – Kaliningrad Region, Curonian Spit; 2 – Kostroma Region, Kologriv; 3 – Nenets Autonomous Area, Kolguev Island; 4 – Novosibirsk Region; 5 – Mongolia, Ugii Lake; 6 – Zabaykalsky Territory, Daursky Nature Reserve; 7 – Republic of Sakha (Yakutia); 8 – Kamchatka Peninsula; 9 – Chukotka Autonomous Area, Meynipilgyno; 10 – China, Zhhalong Wetlands; 11 – China, Miyun Reservoir; 12 – China, Yellow River Delta; 13 – China, Tiaozini Wetlands; 14 – China, Poyang Lake

том антропогенных выбросов ртути, который необходимо учитывать, является повторная эмиссия ранее депонированной ртути («старой ртути»), которая оценивается в 2500—4100 т/год [11]. В результате ее концентрация в атмосфере и на поверхности океана с начала индустриальной эпохи увеличилась втрое [12].

Ртуть — металл, который находится в жидком состоянии при комнатной температуре (температура плавления $-38,8^{\circ}\text{C}$) и может существовать в виде одноатомного газа Hg^0 в природных условиях. Ее соединения, содержащие по крайней мере одну ковалентную связь ртуть-углерод, классифицируются как органические соединения ртути. Среди последних в окружающей среде наиболее широко распространены метилртуть MeHg и диметилртуть DMHg . У ртути есть семь стабильных изотопов с разным содержанием в природе: ^{196}Hg — 0,15%, ^{198}Hg — 10,0%, ^{199}Hg — 16,7%, ^{200}Hg — 23,2%, ^{201}Hg — 16,7%, ^{202}Hg — 29,8% и ^{204}Hg — 6,8%, соотношение кото-

рых в тканях арктических птиц может предоставить дополнительную информацию для исследования как биологических, так и физико-химических процессов переноса ртути в арктических экосистемах. Соотношение $^{199}\text{Hg}/^{201}\text{Hg}$ в водных системах используется как инструмент выяснения фотохимических процессов, которым подвергается ртуть до ее включения в трофическую сеть, например, фотодеметилирования MeHg [13].

Атомарная ртуть Hg^0 в атмосфере окисляется до двухвалентной Hg^{2+} , которая поступает в водные и наземные экосистемы в результате сухого и влажного осаждения. Окисление и осаждение атмосферной ртути усиливаются в Арктике во время полярного дня из-за быстрого фотоокисления тропосферной Hg^0 , катализируемого галогенными радикалами в морских аэрозолях [14]. При определенных условиях осажденная двухвалентная ртуть под воздействием сульфатредуцирующих и железо-редуцирующих бактерий, а также метаногенных ар-

Таблица 1. Число образцов и видов птиц, включенных в анализ для выявления переноса ртути птицами вдоль пролетных путей на территории Северной Евразии в рамках проекта РНФ, 2025

Table 1. Number of samples and bird species included in the analysis to identify mercury transfer by birds along migratory flyways in Northern Eurasia within the framework of the RSF project, 2025

Пункт отбора образцов, номер которого соответствует представленным на рис. 1	Число видов птиц	Число образцов	Период отбора образцов
1. Куршская коса, Калининградская область	12	119	Август-апрель
2. Город Кологрив, Костромская область	3	64	Май
3. Остров Колгуев, Ненецкий автономный округ	8	28	Июнь
4. Карасукский район, Новосибирская область	8	53	Апрель-май
5. Озеро Угий, Монголия	22	192	Август
6. Даурский заповедник, Забайкальский край	5	18	Сентябрь
7. Республика Якутия	36	612	Апрель-сентябрь
8. Полуостров Камчатка	15	67	Август
9. Поселок Мейныпильгыно, Чукотский автономный округ	8	58	Май-июль
10. Водно-болотные угодья Чжалун, Китай	5	54	Сентябрь-ноябрь
11. Водохранилище Миюнь, Китай	3	3	Июнь
12. Дельта реки Хуанхэ, Китай	6	60	Ноябрь-январь
13. Парк Тиаозини, Китай	13	56	Октябрь
14. Озеро Поянху, Китай	43	434	Ноябрь-февраль
Всего	66	1818	

хей трансформируется в метилртуть, которая легко вовлекается в пищевые сети. В пресных водоемах Арктики концентрация MeHg является функцией двух разнонаправленных процессов: чистого метилирования Hg^{2+} в донных отложениях озер и фотодеметилирования MeHg в водной толще. Исследование водоемов канадской Арктики показало, что измеренный чистый площадной вынос MeHg в вышележащую толщу воды в отложениях составил от 0,002 до 0,040 мкг/м² в сутки [15]. Hg^{2+} , MeHg и DMHg могут поглощаться и удерживаться организмами низкого трофического уровня, такими как бактерии и водоросли, однако Hg^{2+} и DMHg не биомагнифицируются через пищевые цепи в отличие от MeHg [16]. Большая часть ртути, присутствующей в тканях животных верхних трофических уровней (например, у водоплавающих и околоводных птиц Арктики), находится в форме MeHg [17], а ее поглощение и биомагнификация в пищевых цепях ограничены наличием необходимых условий для метилирования (высокая влажность, анаэробные условия, кислая реакция среды и др.). Поэтому считается, что обширные заболоченные пространства Арктики являются наиболее благоприятным ландшафтом для метилирования ртути и последующего вовлечения ее в пищевые сети.

Альтернативным источником MeHg в Арктике может быть метилирование в снежном покрове во время весеннего снеготаяния. Повышенные концентрации MeHg в снеге измерены в канадской Арктике, Гренландии и на Шпицбергене. Здесь снежные пространства играют более важную роль, чем водно-болотные угодья [18]. Дополнительным источникам ртути может быть продукция водорослей морского льда во время весеннего цветения. Присутствие наземного органического вещества и слоев морского льда, концентрирующих фитопланктон вблизи зоны продукции MeHg, может способствовать микробному метилированию ртути в океане [19].

В условиях потепления климата, таяния многолетнемерзлых грунтов и глобального атмосферного переноса риск ртутного загрязнения стал реальной экологической проблемой. Многие виды арктических морских, водоплавающих и околоводных птиц, будучи высшими консументами в пищевых цепях, накапливают MeHg из окружающей среды, что наносит вред их здоровью и жизнедеятельности. Само глобальное ртутное загрязнение представляет собой сложную проблему и угрожает выживанию и размножению мигрирующих птиц Арктики. Около 150 стран прилагают усилия по сокращению выбросов ртути в окружающую



Рис. 2. Циркумплярная карта содержания ртути в почвах Арктики. Шкала концентрации, мг/га: светлая область — 5–20, светло-розовая — 20–80, розовая — 80–150, красная — более 150. Разноцветные линии демонстрируют границы деградации многолетней мерзлоты при реализации разных сценариев изменений климата. По данным [20]
Fig. 1. Circumpolar map of mercury content in Arctic soils. Concentration scale (mg/ha): light — 5–20, light pink — 20–80, pink — 80–150, red — more than 150. Colored lines show the boundaries of permafrost degradation under different climate change scenarios. Based on [20]

среду и по снижению ее воздействия на экосистемы в рамках Минаматской конвенции о ртути. Загрязнение ртутью стало центральным предметом изучения программы Арктического совета по циркумплярному мониторингу AMAP's long term programme on mercury, которая прогнозирует рост концентрации ртути в почве (рис. 2) и водах Арктики (рис. 3) к 2025 г. на 5% [9].

Ртуть и мигрирующие птицы циркумплярной Арктики

Ртуть поступает в организм животных преимущественно с пищей [22]. Самые высокие концентрации, как правило, наблюдаются у хищников, находящихся на верхних уровнях трофических сетей. Среди птиц Арктики к таковым относятся, например, полярная сова *Bubo scandiacus*, орлан-белохвост

Haliaeetus albicilla, кречет *Falco rusticolus*, сапсан *Falco peregrinus* и др. Однако объектом большинства исследований служат различные виды морских и околоводных птиц, так как водоплавающие птицы в первую очередь подвергаются воздействию повышенных уровней MeHg в местах добычи корма — пелагиалях арктических морей, прибрежных биотопах и водно-болотных угодьях [23].

После попадания в организм метилртуть из пищи быстро всасывается в кровоток, и ее концентрация в крови непосредственно отражает недавнее воздействие в течение нескольких недель [24]. Из кровотока MeHg впоследствии перераспределяется по всему организму, накапливаясь в первую очередь в мышцах, печени и почках. Печень накапливает MeHg и является главным органом, отвечающим за

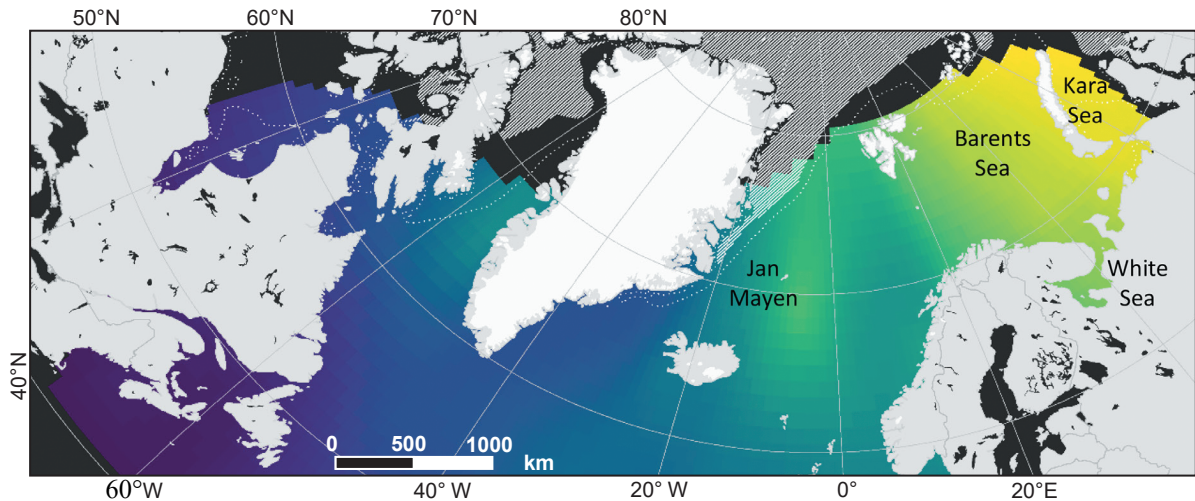


Рис. 3. Прогноз концентрации ртути (расчеты на 2025 г.) для морских птиц в морях Северной Атлантики: от 0,6 мг/г (желтый) до 1,2 мг/г (фиолетовый) [21]

Fig. 2. Mercury concentration forecast (2025 calculations) for seabirds in the North Atlantic: from 0.6 mg/g (yellow) to 1.2 mg/g (purple) [21].

детоксикацию MeHg, в то время как почки в основном содержат общую ртуть THg и служат основным местом детоксикации неорганической ртути [25]. Оба органа отражают уровень воздействия ртути в течение нескольких месяцев [26]. После детоксикации часть Hg выводится с фекалиями, а остаток накапливается в мышцах и других тканях [27] до тех пор, пока не будет мобилизован и включен в растущие перья во время периодов линьки [28]. До 98% Hg в перьях составляет MeHg [29], при этом на перья приходится 65—93% общего содержания MeHg в организме [30—31]. Являясь основным путем выведения метилртути, перья эффективно отражают кумулятивное воздействие метилртути в течение нескольких месяцев [32].

Таким образом, маркером накопления ртути у арктических птиц может быть ее концентрация в крови, тканях, перьях, скорлупе и др. Содержание Hg в перьях широко используется в качестве важнейшего индикатора для выявления ее воздействия на птиц в местах их обитания, поскольку перья можно собирать нелетально и они долго хранятся. Есть примеры анализа перьев музейных экспонатов птиц для выявления фоновое загрязнение районов Арктики ртутью до промышленного освоения [32]. На содержание ртути в перьях влияют ритмы линьки и миграции, рацион питания и метаболизм MeHg в организме. Поэтому концентрация ртути в мягких тканях (в первую очередь в мышцах) является наиболее информативным индикатором, с помощью которого можно установить ртутный статус того или иного вида птиц.

У птиц межвидовые различия в уровне накопления ртути в органах и тканях подчиняются общей закономерности, характерной для позвоночных: у рыбоядных и хищных видов отмечается самая высокая концентрация ртути, в то время как у травоядных

и зерноядных видов концентрация ртути минимальна [34; 35].

В целом, как и у большинства позвоночных разных таксонов, для самцов и самок одного вида птиц не характерны различия по содержанию ртути во внутренних органах. Например, не выявлено межполовых различий по содержанию ртути в органах и перьях у больших бакланов *Phalacrocorax carbo* из Венгрии [36] и северных олуш *Morus bassanus* с побережья Испании [37]. При этом в некоторых исследованиях у птиц выявляются межполовые различия по содержанию ртути в организме. Так, у двух видов поморников (антарктического *Stercorarius antarcticus* и южнополярного *Stercorarius maccormicki*) из Антарктиды и моевок *Rissa tridactyla* с северного побережья Франции концентрация ртути в крови самцов была значимо выше, чем у самок [38; 39]. Так как содержание ртути в печени и мышцах положительно коррелирует с ее концентрацией в крови, у этих видов также следует ожидать аналогичных межполовых различий по содержанию ртути во внутренних органах. Считается, что наиболее значимым фактором, определяющим такие различия, является предпочитаемая диета [40]. Самцы, основу рациона которых составляют рыба и беспозвоночные, содержат больше ртути, чем самки. При этом у растительноядных и всеядных видов межполовых различий по содержанию ртути не отмечается.

Также стоит отметить, что у некоторых видов птиц в период размножения у самок концентрация ртути в организме ниже, чем у самцов. Обычно это объясняется тем, что во время оогенеза некоторое количество ртути выводится из организма самок и поступает в сформировавшееся яйцо. Однако установлено, что в течение нескольких недель после откладки яиц содержание ртути в органах и тканях самок восстанавливается до прежних величин [40].

Для птиц характерна существенная внутривидовая вариабельность концентраций ртути в органах и тканях [35]. Как правило, большой размах между предельными значениями концентраций ртути у представителей одного вида отражает достаточно широкую трофическую нишу этого вида. Это может быть следствием как индивидуальных различий в пищевом поведении отдельных особей, так и различных экологических условий, которые влияют на биодоступность ртути в конкретных местах обитания [41; 42]. К таким условиям относятся плотность атмосферных выпадений ртути, степень заболоченности территории, длина трофических цепей и др. [43].

За последние десятилетия отмечено увеличение концентрации ртути в организме морских птиц из различных районов Арктики [44]. В некоторых популяциях морских птиц средняя концентрация ртути в органах и тканях выше токсикологических пороговых величин [45]. Птицы, как правило, считаются подверженными низкому риску при концентрации ртути в крови 0,2—1,0 мкг/г, умеренному — при 1,0—3,0 мкг/г и серьезному — при концентрации более 3,0—4,0 мкг/г [33]. У птиц канадской Арктики и западной Гренландии наблюдалась более высокая концентрация ртути, чем у птиц российской Арктики [46]. Обнаружено, что концентрации ртути в перьях там в три раза выше, чем в Баренцевом и Карском морях (4,05 мкг/г против 1,55 мкг/г сухого веса). Области, где содержание ртути в перьях околотовдных птиц было самым низким, отмечены западнее Исландии, у Ян-Майена, на севере Норвегии и в Белом море [21].

Специальные комплексные исследования ученых Мурманского морского биологического института РАН и Института биологических проблем Севера РАН совместно с зарубежными коллегами из приарктических государств в 2022 г. оценили риски воздействия ртути на 24 вида арктических морских и околотовдных птиц [47]. Объектом анализа стало содержание ртути в крови, скорлупе яиц, печени и перьях. Общий вывод — у большинства арктических птиц наблюдались низкие концентрации ртути: у 95% морских птиц угрозы отравления ртутью полностью отсутствовали, примерно 45% были отнесены к категории без риска и только 2,5% — к категории высокого риска [47]. Птицы, зимующие в акватории Баренцева моря, менее загрязнены, чем зимующие в северной и северо-западной Атлантике.

Исследования содержания ртути в районе зимовок в организме шести видов морских птиц, гнездящихся в Западной Арктике (толстоклювая *Uria lomvia* и тонноклювая *Uria aalge* кайры, обыкновенная моевка, обыкновенная гага *Somateria mollissima*, люрик *Alle alle* и глупыш *Fulmarus glacialis*), показали, что толстоклювые кайры и моевки имеют самые высокие концентрации [46]. У тонноклювой кайры и глупыша выявлены промежуточные средние концентрации, а у обыкновенной гаги — самые низкие.

Разница варьировала между видами и в зависимости от верности месту зимовки, направления и дальности миграции. Изменение было самым высоким, когда птицы мигрировали в северо-западном направлении, и низким, когда меняли его на юго-восточное [46]. Морские птицы, зимующие в более южных широтах, в целом подвергались более высокому воздействию ртути [48]. Однако у толстоклювых кайр, размножающихся в двух высокоарктических колониях (выше 66°30' с. ш.), концентрации ртути были выше, чем у кайр, размножающихся в трех низкоарктических локациях (южнее 66°30' с. ш.) [48].

Исследования сезонных колебаний концентрации ртути в перьях девяти видов арктических морских птиц (обыкновенного старика *Synthliboramphus antiquus*, толстоклювой кайры, тонноклювой кайры, большой конюги *Aethia cristatella*, конюги-крошки *Aethia pusilla*, люрика, гагарки *Alca torda*, тупика-носорога *Cerorhinca monocerata* и топорка *Fratercula cirrhata*) в 28 точках показали четкие сезонные различия для большинства исследуемых районов. В организм большинства видов наибольшее количество ртути поступало в негнездовой период. При этом у обыкновенного старика, большой конюги, топорка и люрика из Гренландии подобные сезонные колебания не выявлены [49].

Пространственная вариация содержания ртути была изучена в образцах крови двух видов птиц (толстоклювой кайры и моевки) из 17 колоний в арктическом и субарктическом регионах, а также было проведено сравнение концентрации ртути между видами и бассейнами океанов (Тихоокеанско-Арктическим и Атлантико-Арктическим) [50]. Концентрации ртути были одинаковыми у кайры и моевки в Атлантико-Арктическом и Тихоокеанско-Арктическом регионах, однако концентрация ртути увеличивалась с востока на запад от Европейской Арктики до Канадской Арктики, но только в организме кайр. Подобный градиент наблюдается и у других видов чистиковых [46], однако пространственные различия в концентрациях ртути у моевок не были обнаружены [50]. Это различие может быть связано с особенностями питания видов.

Данные о содержании ртути доступны и для другой группы водоплавающих птиц — куликов [51—53]. Они гнездятся и кормятся в водно-болотных угодьях и занимают высокие трофические уровни. В девяти районах Аляски и Канады отбирали пробы крови и перьев куликов. Концентрация ртути в крови варьировала от 0,01 до 3,52 мкг/г сырой массы (от 0,033 до 11,73 мкг/г сухой массы). В перьях куликов средняя концентрация ртути составила 1,14±1,18 мкг/г сухой массы для всех проанализированных образцов и варьировалась от 0,07 до 12,14 мкг/г сухой массы [54].

Комплексное исследование влияния морского льда на биогеохимический цикл ртути и питание морских птиц было проведено на примере обыкновенной гаги. Международная группа исследовате-

лей проанализировала образцы крови, собранные у гаг в четырех арктических регионах с контрастными условиями морского льда (информация не опубликована). В России пробы отбирали на островах Онежского залива Белого моря. Общая концентрация ртути в крови гаг с Белого моря составила $0,87 \pm 0,45$ мкг/г и была ниже, чем в Канаде и Гренландии, но выше, чем на Шпицбергене. Обыкновенные гаги из России выделялись на фоне других участков более высокими значениями изотопа ^{200}Hg ($0,03 \pm 0,04\text{‰}$) и значительно более низкими значениями ^{204}Hg ($-0,07 \pm 0,09\text{‰}$), чем на других участках. В отличие от Гренландии и Шпицбергена гаги в Канаде и России показали более низкие отношения нечетного масс-независимого фракционирования изотопов ($\Delta^{199}\text{Hg}/^{201}\text{Hg}$) — $1,16 \pm 0,24\text{‰}$ и $1,19 \pm 0,32\text{‰}$ соответственно. Низкие значения $\Delta^{199}\text{Hg}$ в биологических образцах могут быть результатом поступления ртути с речным стоком.

Повышенные концентрации ртути в организме птиц отрицательно влияют на поведение, физиологию и репродуктивные возможности некоторых видов. Сильное негативное воздействие ртути и ее соединения оказывают на репродуктивную систему птиц, особенно если в объектах питания концентрация ртути больше $0,21$ мкг/г. Считается, что размножение у птиц становится невозможным при концентрации ртути в пище выше $0,4$ мкг/г [55]. Например, среди взрослых самцов моевок, размножающихся на Шпицбергене, особи с высокими концентрациями ртути с большей вероятностью бросали кладки [56]. У представителей гусеобразных птиц с высокой концентрацией ртути в органах и тканях снижался размер кладки. Концентрация ртути в яйцах птиц может достигать высоких уровней и негативно влиять на репродукцию, включая успешность вылупления и размер кладки [45]. Снижение репродуктивной способности в некоторых популяциях малого лебедя *Cygnus columbianus bewickii* в дельте Печоры может быть связано с ростом концентрации ртути в донных отложениях и верхних слоях термокарстовых озер. Было показано, что на озерах, где отмечено постоянное гнездование малого (тундрового) лебедя, концентрация ртути была выше по сравнению с соседними озерами (без орнитогенной нагрузки). Исходя из этого, можно предположить о «био-векторном загрязнении» и переносе ртути в места гнездования и линьки из мест постоянных зимовок и миграций в Западной Европе [57; 58].

Вопросы ртутного загрязнения промысловой фауны, в том числе птиц Севера, более подробно рассмотрены в монографии Э. В. Ивантера и В. Н. Медведева [59]. Содержание ртути в организмах водоплавающих птиц Чукотки как объектов питания коренных народов по данным исследований 2017 г. были представлены в обзоре [9]. Отмечено, что концентрация ртути в тканях птиц в два-три раза превышала «допустимый уровень» для пищи коренного населения.

Новые данные о переносе ртути арктическими птицами (результаты исследования в рамках проекта РНФ)

Анализ литературы по рассматриваемой проблеме показал, что российская Арктика по-прежнему остается «белым пятном» в исследовании накопления и переноса ртути мигрирующими птицами. При этом в большинстве случаев остаются неясными источники и векторы глобального переноса Hg ни до промышленного освоения Арктики, ни в настоящее время.

Несмотря на растущее беспокойство по поводу накопления ртути у арктических птиц, знания об угрозах ртутного загрязнения и участии птиц в его трансграничном распределении фрагментарны. Миграция птиц — регулярное сезонное перемещение по пролетному пути в течение годового цикла от мест гнездования к местам зимовки и обратно.

На начальном этапе реализации проекта нами было определено содержание ртути в печени, мышцах и перьях пяти видов водоплавающих птиц (чернозобой *Gavia arctica* и краснозобой *Gavia stellata* гагар, чомги *Podiceps cristatus*, обыкновенного гоголя *Bucephala clangula* и большого крохала *Mergus merganser*), погибших в рыболовных сетях в Куршском заливе (Калининградская область). Также определено содержание ртути в мышцах, печени и почках четырех видов отряда гусеобразных, собранных в Якутии: гуменника *Anser fabalis* ($n = 10$), кряквы *Anas platyrhynchos* ($n = 7$), чирка-свистунка *Anas crecca* ($n = 16$) и чирка-трескунка *Spatula querquedula* ($n = 7$).

В Куршском заливе наименьшее содержание ртути отмечено в мышцах обыкновенного гоголя и чомги — $0,402 \pm 0,286$ и $0,470 \pm 0,296$ мкг/г соответственно. Наибольшие концентрации отмечены в мышцах большого крохала — $1,605 \pm 0,668$ мкг/г. Выявленные межвидовые отличия статистически значимы:

$$H(4, n = 92) = 44,8; p < 0,001,$$

где H — значение статистики критерия Краскела — Уоллиса; p — статистическая значимость; n — объем выборки.

Содержание ртути в печени у всех исследованных видов было выше, чем в мышцах. Наименьшее содержание ртути в печени выявлено у обыкновенного гоголя и чомги — $1,101 \pm 0,584$ и $1,485 \pm 0,968$ мкг/г соответственно. Максимальная средняя концентрация в печени также была отмечена у большого крохала — $10,534 \pm 5,177$ мкг/г. Содержание ртути в печени исследованных видов гагар имеет промежуточные значения и составляет $2,977 \pm 2,240$ мкг/г у краснозобой гагары и $3,449 \pm 3,432$ мкг/г у чернозобой гагары. Наблюдаемые межвидовые различия по содержанию ртути в печени статистически значимы:

$$H(4, n = 92) = 47,4; p < 0,001.$$

У чернозобой гагары отмечен наибольший размах между предельными концентрациями ртути как в мышцах, так и в печени. Коэффициент вариации составил 98,0% и 99,5% соответственно, в то время как у других исследованных видов коэффициент вариации варьировал от 41,6% в мышцах большого крохала до 71,1% в мышцах обыкновенного гоголя.

Минимальные средние концентрации ртути в перьях отмечены у чернозобой и краснозобой гагар — $2,845 \pm 1,650$ и $2,860 \pm 1,998$ мкг/г соответственно; у обыкновенного гоголя и чомги она была выше и составила $3,536 \pm 3,085$ и $5,211 \pm 2,661$ мкг/г соответственно. Максимальные величины отмечены для большого крохала — $6,600 \pm 5,152$ мкг/г. При этом статистически значимых различий концентраций ртути в перьях между видами не выявлено:

$$H(4, n = 58) = 12,4; p = 0,015.$$

Содержание ртути в печени и мышцах у всех видов положительно коррелировали:

$$rS = 0,58 - 0,90; p < 0,05,$$

где rS — коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Полученные данные говорят о положительной корреляции: чем выше концентрация ртути в одном органе, тем выше она и в другом. При этом диапазон от 0,58 до 0,90 означает, что связь варьируется от умеренно сильной до очень сильной в разных случаях. Причем самая слабая корреляция выявлена у большого крохала.

Среднее содержание ртути в мышцах и печени гусеобразных из Якутии увеличивалось в ряду гуменник ($0,158 \pm 0,142$ и $0,478 \pm 0,346$ мкг/г соответственно) — чирок-трескунок ($0,281 \pm 0,264$ и $0,839 \pm 0,832$ мкг/г) — чирок-свистунок ($0,399 \pm 0,403$ и $1,188 \pm 1,152$ мкг/г) — кряква ($0,398 \pm 0,258$ и $1,334 \pm 1,111$ мкг/г). Наименьшие концентрации ртути в почках также отмечаются у гуменника ($0,447 \pm 0,306$ мкг/г) и чирка-трескунка ($0,642 \pm 0,570$ мкг/г), в то время как максимальные значения выявлены у чирка-свистунка ($1,215 \pm 1,371$ мкг/г). Не установлено статистически значимых отличий в концентрации ртути в органах между самцами и самками у всех исследованных видов гусеобразных. Также не выявлено значимых межвидовых различий. Отметим, что у птиц из Якутии отмечено значительное внутривидовое варьирование концентраций ртути в органах. Коэффициент вариации у чирков-свистунков составлял 88,7—112,8%, у кряквы — 64,7—83,2%, у гуменника — 68,6—90,2%. У всех видов отмечены сильные положительные корреляции содержания ртути в разных органах:

$$rS = 0,82 - 0,93; p < 0,05.$$

Заключение

В рамках российско-китайского двустороннего соглашения об охране перелетных птиц и среды

их обитания (от 22 марта 2013 г.) наши страны приняли обязательства по изучению угроз, которые могут оказать негативное влияние на популяции мигрирующих птиц Арктики. Спустя 13 лет по-прежнему мало внимания уделяется проблеме накопления и трансфера MeHg перелетными арктическими птицами в местах гнездования, на пролетных путях и зимовках. Старт российско-китайского проекта РНФ «Замкнутое расследование ртутной угрозы перелетным птицам между Россией и Китаем» позволит частично устранить эти пробелы в исследованиях.

Сопоставление средних величин концентрации ртути в перьях водоплавающих и околоводных птиц из включенных в обзор публикаций показало, что они близки к данным, полученным на первом этапе реализации проекта РНФ. Анализ литературы и наши данные показывают, что накопление ртути в организме птиц носит сложный характер и зависит от рациона, среды обитания и климата на протяжении всего годового цикла. Показаны общие для всех регионов Арктики закономерности биоаккумуляции ртути птицами. При этом концентрация ртути в мягких тканях является наиболее информативным индикатором для установления ртутного статуса того или иного вида птиц, а перья — удобным его неинвазивным сезонным индикатором, позволяющим более корректно определять вектор переноса ртути.

В заключение отметим, что анализ литературных данных выявил рост ртутного загрязнения в Арктике, его усиление в последние десятилетия в связи с ростом антропогенного влияния на арктические экосистемы и с глобальными изменениями климата [9]. Существенные сдвиги в увеличении роли арктических птиц в переносе ртути могут происходить за счет биотически значимых изменений климата Арктики [60] и перестроек в функционировании экосистем на путях миграции и зимовок, где меняются условия биоаккумуляции ртути птицами в результате роста ее концентрации в среде и в кормах. Результаты первого этапа реализации проекта РНФ подтвердили это и представили более детально географию накопления и трансфера MeHg перелетными арктическими птицами.

Следующим этапом исследований пространственных закономерностей и роли перелетных арктических птиц в миграции ртути должно стать более детальное изучение вектора ее переноса, источников и мест аккумуляции в границах ареала — от мест гнездования до областей зимовок.

Финансирование

Статья подготовлена в рамках российско-китайского проекта 25-47-00074 РНФ «Замкнутое расследование ртутной угрозы перелетным птицам между Россией и Китаем» и темы госзадания FMWS-2026-0002 «Биогеографические оценки состояния окружающей среды как основа ее территориальной охраны и рационального использования биоресурсов».

Благодарность

Авторы искренне признательны ведущему российскому эксперту по Минаматской конвенции, кандидату технических наук Ю. Г. Тацию (лаборатория эволюционной биогеохимии и геоэкологии Института геохимии РАН) за ценные консультации и Е. В. Шемякину (Институт биологических проблем криолитозоны Сибирского отделения РАН), оказавшему помощь в сборе материала в Республике Саха (Якутия).

Литература/References

1. Luo H. W., Cheng Q. Q., He D. Q. et al. Recent Advances in Microbial Mercury Methylation: A Review on Methylation Habitat, Methylator, Mechanism, and Influencing Factor. *Process Saf. Environ.*, 2023, vol. 170, pp. 286—296. DOI: 10.1016/j.psep.2022.12.007.
2. Arctic Pollution: Persistent Organic Pollutants, Heavy Metals, Radioactivity, Human Health, Changing Pathways. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway, 2002, xii+112 p.
3. Xu Z. D., Lu Q. H., Jia D. Y. et al. Significant Biomagnification of Methylmercury in Songbird Nestlings through a Rice-based Food Web: Insights from Stable Mercury Isotopes. *J. Hazard. Mater.*, 2024, vol. 468, p. 133783. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133783.
4. Liu X., Wang Z. W., Wang C. J. et al. Mercury Distribution, Exposure and Risk in Poyang Lake and Vicinity, China. *Environ. Pollut.*, 2024, vol. 344, p. 123409. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123409.
5. Seewagen C. L. The Threat of Global Mercury Pollution to Bird Migration: Potential Mechanisms and Current Evidence. *Ecotoxicology*, 2020, vol. 29, pp. 1254—1267. DOI: 10.1007/s10646-018-1971-z.
6. Yang Y., Yanai R. D., Schoch N. et al. Determining Optimal Sampling Strategies for Monitoring Mercury and Reproductive Success in Common Loons in the Adirondacks of New York. *Ecotoxicology*, 2020., vol. 29, pp. 1786—1793. DOI: 10.1007/s10646-019-02122-1.
7. Ackerman J. T., Peterson S. H., Herzog M. P., Yee J. L. Methylmercury Effects on Birds: a Review, Meta-Analysis, and Development of Toxicity Reference Values for Injury Assessment Based on Tissue Residues and Diet. *Environ. Toxicol. Chem.*, 2024, vol. 43, pp. 1195—1141. DOI: 10.1002/etc.5858.
8. Environmental chemistry and toxicology of mercury. Ed. by Liu G., Cai Y., O'Driscoll N. John Wiley & Sons, Inc., 2012, 596 p.
9. AMAP Mercury Assessment. Summary for Policy-makers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Tromsø, Norway, 2021, 16 p.
10. Pirrone N., Cinnirella S., Feng X. et al. Global Mercury Emissions to the Atmosphere from Anthropogenic and Natural Sources. *Atmos. Chem. Phys.*, 2010, vol. 10, pp. 5951—5964. DOI: 10.5194/acpd-10-4719-2010.
11. Selin N. E., Jacob D. J., Yantosca R. M. et al. Global 3-D Land-Ocean-Atmosphere Model for Mercury: Present-Day Versus Preindustrial Cycles and Anthropogenic Enrichment Factors for Deposition. *Global Biogeochem. Cycles*, 2008, vol. 22, GB2011. DOI: 10.1029/2007GB003040.
12. Mason R. P., Choi A. L., Fitzgerald W. F. et al. Mercury Biogeochemical Cycling in the Ocean and Policy Implications. *Environ. Res.*, 2012, vol. 119, pp. 101—117. DOI: 10.1016/j.envres.2012.03.013.
13. Lauretta D. S., Klaue B., Blum J. D. et al. Mercury Abundances and Isotopic Compositions in the Murchison (CM) and Allende (CV) Carbonaceous Chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2001, vol. 65, pp. 2807—2818. DOI: 10.1016/S0016-7037(01)00630-5.
14. Lehnherr I., Louis V. L. St., Emmerton C. A. Methylmercury Cycling in High Arctic Wetland Ponds: Sources and Sinks. *Environ. Sci. Technol.*, 2012, vol. 46, pp. 10514—10522. DOI: 10.1021/es300576p.
15. Lehnherr I., Louis V. L. St., Kirk J. L. Methylmercury Cycling in High Arctic Wetland Ponds: Controls on Sedimentary Production. *Environ. Sci. Technol.*, 2012, vol. 46, pp. 10523—10531. DOI: 10.1021/es300577e.
16. Fisher J. A., Jacob D. J., Soerensen A. L. et al. Riverine Source of Arctic Ocean Mercury Inferred from Atmospheric Observations. *Nat. Geosci.*, 2012, vol. 5, pp. 499—504. DOI: 10.1038/ngeo1478.
17. Morel F. M. M., Krepiel A. M. L., Amyot M. The Chemical Cycle and Bioaccumulation of Mercury. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 1998, vol. 29, pp. 543—566.
18. Larose C., Dommergue A., De Angelis M. Springtime Changes in Snow Chemistry Lead to New Insights into Mercury Methylation in the Arctic. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2010, vol. 74, pp. 6263—6275. DOI: 10.1016/j.gca.2010.08.043.
19. Kohler S. G., Heimbürger-Boavida L.-E., Assmy P. et al. Biotic Transformation of Methylmercury at the Onset of the Arctic Spring Bloom. *Progress in Oceanography*, 2024, vol. 222, p. 103224. DOI: 10.1016/j.pcean.2024.103224.
20. Pachauri R. K., Allen M. R., Barros V. R. et al. Climate change 2014 synthesis report. Contribution of working groups I, II, and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. [S. l.], 2014, 151 p.
21. Albert C., Moe B., Strøm H. et al. Seabirds Reveal Mercury Distribution across the North Atlantic. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024, vol. 121. DOI: 10.1073/pnas.2315513121.
22. Li M. L., Kwon S. Y., Poulin B. A. et al. Internal Dynamics and Metabolism of Mercury in Biota: A Review of Insights from Mercury Stable Isotopes. *Environ. Sci. Technol.*, 2022, vol. 56, pp. 9182—9195. DOI: 10.1021/acs.est.1c08631.
23. Albert C., Renedo M., Bustamante P., Fort J. Using Blood and Feathers to Investigate Large-Scale Hg Contamination in Arctic Seabirds: A Review. *Environ. Res.*, 2019, vol. 177, p. 108588. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108588.
24. Sauer A. K., Driscoll C. T., Evers D. C. et al. Mercury Exposure in Songbird Communities along an Elevational Gradient on Whiteface Mountain, Adirondack

- Park (New York, USA). *Ecotoxicology*, 2020, vol. 29, pp. 1830—1842. DOI: 10.1007/s10646-020-02175-7.
25. Hanafi K. El, Pedrero Z., Ouerdane L. et al. First Time Identification of Selenoneine in Seabirds and its Potential Role in Mercury Detoxification. *Environ. Sci. Technol.*, 2022, vol. 56, pp. 3288—3298. DOI: 10.1021/acs.est.1c04966.
26. Schutten K., Morrill A., Chandrashekar A. et al. Plastic Ingestion, Accumulated Heavy Metals, and Health Metrics of Four *Larus* Gull Species Feeding at a Coastal Landfill in Eastern Canada. *J. Hazard Mater.*, 2024, vol. 476, p. 135107. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.135107.
27. Kalisinska E., Gorecki J., Okonska A. et al. Mercury and Selenium in the Muscle of Piscivorous Common Mergansers (*Mergus merganser*) from a Selenium-Deficient European Country. *Ecotox. Environ. Safe.*, 2014, vol. 101, pp. 107—115. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2013.12.019.
28. Manceau A., Bourdineaud J. P., Oliveira R. B. et al. Demethylation of Methylmercury in Bird, Fish, and Earthworm. *Environ. Sci. Technol.*, 2021, vol. 55, pp. 1527—1534. DOI: 10.1021/acs.est.0c04948.
29. Furness R. W., Muirhead S. J., Woodburn M. Using Bird Feathers to Measure Mercury in the Environment — Relationships between Mercury Content and Molt. *Mar. Pollut. Bull.*, 1986, vol. 17, pp. 27—30.
30. Honda K., Nasu T., Tatsukawa R. Seasonal Changes in Mercury Accumulation in the Black-eared Kite, *Milvus migrans lineatus*. *Environ. Pollut. A.*, 1986, vol. 42, pp. 325—334. DOI: 10.1016/0143-1471(86)90016-4.
31. Braune B. M., Gaskin D. E. A Mercury Budget for the Bonaparte's Gull during Autumn Molt. *Ornis Scandinavica*, 1987, vol. 18, pp. 244—250. DOI: 10.2307/3676891.
32. Zhang F. D., Xu Z. D., Xu X. H. et al. Terrestrial Mercury and Methylmercury Bioaccumulation and Trophic Transfer in Subtropical Urban Forest Food Webs. *Chemosphere*, 2022, vol. 299, p. 134424. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134424.
33. Head J. A., DeBofsky A., Hinshaw J. et al. Retrospective Analysis of Mercury Content in Feathers of Birds Collected from the State of Michigan (1895—2007). *Ecotoxicology*, 2011, vol. 20 (7), pp. 1636—1643. DOI: 10.1007/s10646-011-0738-6.
34. Ackerman J. T., Eagles-Smith C. A., Herzog M. P. et al. Avian Mercury Exposure and Toxicological Risk across Western North America: A Synthesis. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 568, pp. 749—769. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.071.
35. Kitowski I., Łopucki R., Wiącek D. et al. Concentration of Metals and Metalloids in Livers of Birds of Various Foraging Guilds Collected during the Autumn Migration Period in Poland. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2024, vol. 31, pp. 21913—21934. DOI: 10.1007/s11356-024-32502-y.
36. Lehel J., Grúz A., Barthá A. et al. Potentially Toxic Elements in Different Tissues of Great Cormorant (*Phalacrocorax carbo*) at a Wetland Area. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2023, vol. 30, pp. 120540—120551. DOI: 10.1007/s11356-023-30791-3.
37. Nardiello V., Fidalgo L. E., López-Beceiro A. et al. Metal Content in the Liver, Kidney, and Feathers of Northern Gannets, *Morus bassanus*, Sampled on the Spanish Coast. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2019, vol. 26, pp. 19646—19654. DOI: 10.1007/s11356-019-05356-y.
38. Lemesle P., Jouanneau W., Cherel Y. et al. Mercury Exposure and Trophic Ecology of Urban Nesting Black-legged Kittiwakes from France. *Chemosphere*, 2024, vol. 363, p. 142813. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.142813.
39. Mills W. F., Ibañez A. E., Bustamante P. et al. Mercury Contamination of Sympatric Seabirds and Associated Health Risks in an Antarctic Ecosystem. *Environmental Research*, 2025, vol. 281, p. 121990. DOI: 10.1016/j.envres.2025.121990.
40. Robinson S. A., Lajeunesse M. J., Forbes M. R. Sex Differences in Mercury Contamination of Birds: Testing Multiple Hypotheses with Meta-Analysis. *Environ. Sci. Technol.*, 2012, vol. 46, pp. 7094—7101. DOI: 10.1021/es204032m.
41. Ceia F. R., Ramos J. A. Individual Specialization in the Foraging and Feeding Strategies of Seabirds: A Review. *Mar. Biol.*, 2015, vol. 162, pp. 1923—1938. DOI: 10.1007/s00227-015-2735-4.
42. Phillips R. A., Lewis S., González-Solís J., Daunt F. Causes and Consequences of Individual Variability and Specialization in Foraging and Migration Strategies of Seabirds. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 2015, vol. 578, pp. 117—150. DOI: 10.3354/meps12217.
43. Chételat J., Ackerman J. T., Eagles-Smith C. A., Herbert C. E. Methylmercury Exposure in Wildlife: a Review of the Ecological and Physiological Processes Affecting Contaminant Concentrations and Their Interpretation. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 711, p. 135117. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135117.
44. Braune B. M. Temporal Trends of Organochlorines and Mercury in Seabird Eggs from the Canadian Arctic, 1975—2003. *Environ. Pollut.*, 2007, vol. 148, pp. 599—613. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.11.024.
45. Dietz R., Sonne C., Basu N. et al. What Are the Toxicological Effects of Mercury in Arctic Biota? *Sci. Total Environ.*, 2013, vol. 443, pp. 775—790. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.11.046.
46. Albert C., Bråthen V., Descamps S. et al. Inter-Annual Variation in Winter Distribution Affects Individual Seabird Contamination with Mercury. *Mar. Ecol. Prog.*, 2021, vol. 676, pp. 243—254. DOI: 10.3354/meps13793.
47. Chastel O., Fort J., Ackerman J. T. et al. Mercury Contamination and Potential Health Risks to Arctic Seabirds and Shorebirds. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 844, p. 156944. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156944.
48. Fleishman A. B., Orben R. A., Kokubun N. Wintering in the Western Subarctic Pacific Increases Mercury Contamination of Red-legged Kittiwakes. *Environ.*

- Sci. Technol., 2019, vol. 53, pp. 13398—13407. DOI: 10.1021/acs.est.9b03421.
49. Albert C., Helgason H. H., Brault-Favrou M. Seasonal Variation of Mercury Contamination in Arctic Seabirds: a Pan-Arctic Assessment. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 750, p. 142201. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142201.
50. Cruz-Flores M., Lemaire J., Brault-Favrou M. et al. Spatial Distribution of Selenium-Mercury in Arctic Seabirds. *Environ. Pollut.*, 2024, vol. 343, p. 123110. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.123110.
51. Selin N. E., Jacob D. J., Park R. J. et al. Chemical Cycling and Deposition of Atmospheric Mercury: Global Constraints from Observations, *J. Geophys. Res.*, 2007, vol. 112. D02308. DOI: 10.1029/2006JD007450.
52. Pratte I., Noble D. G., Mallory M. L. The Influence of Migration Patterns on Exposure to Contaminants in Nearctic Shorebirds: a Historical Study. *Environ. Monit. Assess.*, 2020, vol. 192, p. 256. DOI: 10.1007/s10661-020-8218-1.
53. Perkins M. Exposure Science to Investigate Factors Influencing Mercury Concentrations in Non-piscivorous Birds. McGill University, Montreal, Canada, 2018. DOI: 10.1007/s10646-023-02708-w.
54. Perkins M., Ferguson L., Lanctot R. B. et al. Mercury Exposure and Risk in Breeding and Staging Alaskan Shorebirds. *Condor*, 2016, vol. 118, P. 571—582. DOI: 10.1650/CONDOR-16-36.1.
55. Bergquist B. A., Blum J. D. Mass-Dependent and -Independent Fractionation of Hg Isotopes by Photoreduction in Aquatic Systems. *Science*, 2007, vol. 318, pp. 417—420. DOI: 10.1126/science.1148050.
56. Tartu S., Goutte A., Bustamante P. et al. To breed or not to breed: endocrine response to mercury contamination by an Arctic seabird. *Biology Letters*, 2013, vol. 9 (4), 20130317. DOI: 10.1098/rsbl.2013.0317.
57. Тацкий Ю. Г., Баранов Д. Ю. Особенности накопления ртути в донных отложениях двух арктических озер Западной Сибири // *Геохимия*. — 2022. — Т. 67, № 2. — С. 182—190. — DOI: 10.31857/S0016752522020091.
- Tatsiy Yu. G., Baranov D. Yu. Features of Mercury Accumulation in Bottom Sediments of Two Arctic Lakes in Western Siberia. *Geochemistry*, 2022, vol. 67, no. 2, pp. 182—190. (In Russian).
58. Тацкий Ю. Г. Особенности распределения ртути в термокарстовых озерах Ненецкого заповедника: техногенное или биовекторное загрязнение? // *Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты. Ртуть в экосистемах: глобальные вызовы и региональные решения* / Отв. ред. Е. С. Иванова. — Череповец; Ярославль: Канцлер, 2025. — С. 113—115.
- Tatsiy Yu. G. Features of mercury distribution in thermokarst lakes of the Nenetsky Nature Reserve: technogenic or biovector pollution? *Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects. Mercury in ecosystems: global challenges and regional solutions*. Ed. by E. S. Ivanova. Cherepovets; Yaroslavl, Chancellor, 2025, pp. 113—115. (In Russian).
59. Ивантер Э. В., Медведев Н. В. Экологическая токсикология природных популяций птиц и млекопитающих Севера. — М.: Наука, 2008. — 228 с.
- Ivanter E. V., Medvedev N. V. Ecological Toxicology of Natural Populations of Birds and Mammals in the North. Moscow, Nauka, 2008, 228 p. (In Russian).
60. Тишков А. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М. и др. Биотически значимые тренды климата и динамика биоты российской Арктики // *Арктика: экология и экономика*. — 2019. — № 1 (33). — С. 71—87.
- Tishkov A. A., Vaisfeld M. A., Glazov P. M. et al. Biotic significant climate trends and biota dynamics of the Russian Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 1 (33), pp. 71—87. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-71-87. (In Russian).

Сведения об авторах

Глазов Петр Михайлович, научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: glazpech@mail.ru.

Удоденко Юрий Геннадиевич, старший научный сотрудник, Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН (152742, Россия, Ярославская область, Некоузский район, поселок Борок), e-mail: udu@ibiw.ru.

Лощагина Юлия Александровна, научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: julia.loschagina@gmail.com.

Гнеденко Ангелина Евгеньевна, младший научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: gnedenko.a.e@igras.ru.

Тертицкий Григорий Маркович, старший научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: tertitski@mail.ru.

Тишков Аркадий Александрович, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Институт географии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 29), e-mail: tishkov@igras.ru.

Ван Чжанвэй, доктор наук, специалист Исследовательского центра экологических и природоохранных наук Академии наук Китая (100085, Китай, Хайдань, Пекин, Shuangqing Road, д. 18), e-mail: wangzhw@rcees.ac.cn.

MERCURY AND MIGRATORY BIRDS IN THE RUSSIAN ARCTIC

Glazov, P. M.¹, Udodenko, Yu. G.², Loshchagina, Yu. A.¹, Gnedenko, A. E.¹, Tertitsky, G. M.¹, Tishkov, A. A.¹, Wang, Zh.³

¹ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

² Papanin Institute for Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences (Borok, Russian Federation)

³ Research Center for ECO-environmental Sciences of the Chinese Academy of Sciences (Beijing, China)

The article was received on July 15, 2025

For citation

Glazov P. M., Udodenko Yu. G., Loshchagina Yu. A., Gnedenko A. E., Tertitsky G. M., Tishkov A. A., Wang Zh. Mercury and migratory birds in the Russian Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 3, pp. 334–346. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-3-334-346.

Abstract

This article examines various aspects of the role of migratory birds in the biogenic transport of mercury in the Arctic. Such studies are scarce for the Russian Arctic. The aim of this study is to demonstrate, based on published literature, the role of migratory shorebirds and waterfowl of the Russian Arctic in the biogenic transport of mercury. The review is based on both international and domestic studies addressing sources of mercury emissions to the environment and its subsequent transport by Arctic birds along their migration routes. The temporal scope of the review is limited to recent decades, as current patterns of mercury transport in high latitudes are hypothesized to be associated with global climate change. The paper also presents the first results of a joint Russian-Chinese project investigating mercury accumulation and transport by Arctic migratory birds along various flyways.

Keywords: Arctic, waterfowl and shorebirds, breeding, bird migration and wintering, mercury (Hg), methylmercury (MeHg), mercury pollution, bird flyways.

Funding

The work was conducted within the framework of the Russian-Chinese project of the Russian Science Foundation (RSF) 25-47-00074 “A comprehensive study of the mercury threat to migratory birds between Russia and China” and the state-funded research project FMWS-2026-0002 “Biogeographical assessments of the state of the environment as a basis for its territorial protection and the rational use of biological resources”.

Acknowledgments

The authors are sincerely grateful to the leading Russian expert of the Minamata Conference, PhD Yu. G. Tat'sia (Laboratory of Evolutionary Biogeochemistry and Geoecology, Institute of Geochemistry, Russian Academy of Sciences) and E. V. Shemyakin (Institute of Biological Problems of the Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences) for his assistance in collecting samples in Yakutia.

Information about the authors

Glazov, Petr Mikhailovich, Research Scientist, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (29, Staromonetny Lane, Moscow, Russia, 119017), e-mail: glazpech@mail.ru.

Udodenko, Yuri Gennadievich, Senior Research Scientist, Papanin Institute for Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences (Borok, Yaroslavl region, Russia, 152742), e-mail: udu@ibiw.ru.

Loshchagina, Yulia Alexandrovna, Research Scientist, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (29, Staromonetny Lane, Moscow, Russia, 119017), e-mail: julia.loshchagina@gmail.com.

Gnedenko, Angelina Evgenievna, Junior Research Scientist, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (29, Staromonetny Lane, Moscow, Russia, 119017), e-mail: gnedenko.a.e@igras.ru.

Tertitsky, Grigory Markovich, Senior Research Scientist, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (29, Staromonetny Lane, Moscow, Russia, 119017), e-mail: tertitski@mail.ru.

Tishkov, Arkady Aleksandrovich, Doctor of Geography, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (29, Staromonetny Lane, Moscow, Russia, 119017), e-mail: tishkov@igras.ru.

Wang, Zhangwei, Doctor of Geography, Professor, Senior Research Scientist, Research Center of Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences (18, Shuangqing Road, Haidan, Beijing, China, 100085), e-mail: wangzhw@rcees.ac.cn.