

УДК 504: [591.5 + 613.64 + 614.7] (985)

ББК 20.19 (21)

<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-4-6-25>



Скованные одной цепью: формирование экологического подхода к оценке влияния загрязняющих и токсичных веществ на здоровье человека и животных в Арктике при изменении климата

Шилин М.Б.[✉], Абрамова А.Л.¹, Абрамов В.М.²,
Завьялова А.Н.³

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ shilin@rshu.ru

Аннотация. Рассматриваются особенности переноса стойких токсичных веществ (СТВ) по экологическим трофическим цепям в условиях арктической тундры. Обсуждается понятие «грязная дюжина» применительно к наиболее распространенным СТВ. Оценивается опасность накопления СТВ в тканях и органах высших хищников и человека для их здоровья в условиях потепления климата. Предлагается концепция «Единое здоровье», направленная на сохранение всех звеньев трофической сети Арктики и в конечном счете — на улучшение здоровья и благополучие людей.

Ключевые слова: стойкие токсичные вещества, трофические цепи, высшие хищники, здоровье людей и животных в тундре, изменение климата

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Шилин М.Б., Абрамова А.Л., Абрамов В.М., Завьялова А.Н. Скованные одной цепью: формирование экологического подхода к оценке влияния загрязняющих и токсичных веществ на здоровье человека и животных в Арктике при изменении климата. *Арктика и инновации*. 2025;3(4):6–25. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-4-6-25>

Bound by one chain: Forming an ecological approach to assessing the impact of pollutants and toxic substances on human and animal health in the Arctic

Michael B. Shilin¹✉, Alexandra L. Abramova¹,
Valery M. Abramov², Anna N. Zavyalova³

¹ Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

² Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

³ Saint Petersburg State Pediatric Medical University, St. Petersburg, Russia

✉ shilin@rshu.ru

Abstract. Specific features of the transfer of persistent toxic substances (PTS) across ecological trophic chains in the conditions of the Arctic tundra are considered. The concept of “dirty dozen” is discussed in relation to the most common PTS. The danger of PTS accumulation in tissues and organs of higher predators and humans for their health in the context of global warming is assessed. The concept of “health as a single unity” is proposed, aimed at preserving all links of the Arctic food web and, ultimately, improving the health and well-being of people.

Keywords: persistent toxic substances, food chains, top predators, human and animal health in the tundra, climate change

Conflict of interests: there are no conflicts of interests between authors.

For citation: Shilin M.B., Abramova A.L., Abramov V.M., Zavyalova A.N. Bound by one chain: Forming an ecological approach to assessing the impact of pollutants and toxic substances on human and animal health in the Arctic. *Arctic and Innovation*. 2025;3(4):6–25. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-4-6-25>

1. Трофические цепи и сети в биоме тундры

Как известно, биом тундры является самым молодым из современных биомов биосферы; он сформировался только после отступления последнего ледника, то есть около 12 тысяч лет назад [1, 2]. Важнейшими экологическими особенностями тундры являются: наличие многолетней («вечной») мерзлоты; недостаточность солнечного тепла и дефицит ультрафиолетовой радиации; низкие среднегодовые температуры; сильные ветры, а в зимнее время — большие объемы снегопереноса; отсутствие древесной растительности и наличие лишайниково-мохового покрова; высокий уровень сейсмичности.

Низкие температуры обуславливают невысокие скорости протекания биологических реакций с участием бактерий, в частности

реакций разложения мертвого органического вещества. Основными продуцентами органического вещества являются лишайники и мхи.

Занимая огромную площадь, биом тундры играет важную роль в стабилизации условий в биосфере в целом и в северном полушарии в особенности [3]. Вечная мерзлота, покрытая лишь тонким активным почвенным слоем действует как гигантский накопитель парниковых газов. Во всяком случае, так продолжалось до наступившего периода последнего потепления климата.

Как это вообще типично для молодых экосистем, уровень разнообразия биологических сообществ в тундре низкий, а пищевые цепи — короткие. Чарлз Элтон, который по результатам своих работ на Севере и ввел в экологию понятие «пищевая (трофическая) цепь» [4], обратил внимание



Рис. 1. Охота чукчей на кита (Чукотка, Россия, 2023 г.). Фото: [Konkurs.trip2rus.ru](https://konkurs.trip2rus.ru)

Fig. 1. Chukchi whale hunting (Chukotka, Russia, 2023). Photo: [Konkurs.trip2rus.ru](https://konkurs.trip2rus.ru)

на их простоту. Основная пищевая цепь, функционирующая в тундре круглый год — в условиях как полярного дня, так и полярной ночи, — состоит всего из трех звеньев: «олений мох» (ягель) —> северный олень —> волк. По этой цепи осуществляется перенос биомассы на огромных пространствах тундр Евразии, Аляски, Канады и Гренландии.

По мере проникновения в Арктику человек постепенно вливался в местные биологические сообщества и встраивался в пищевые цепочки. Взаимоотношения человека с арктической фауной строились в соответствии с наиболее распространенной моделью взаимодействия видов по типу «хищник — жертва» [2]. Описанная Ч. Элтоном трофическая цепь к настоящему времени оказалась антропогенно трансформированной; сегодня мы все чаще сталкиваемся с ее модификацией в виде: «олений мох» (ягель) —> одомашненный северный олень —> оленевод (человек). В цепи появилось *антропическое звено*; причем оно является конечным.

В летнее время к этой цепи подключаются лемминги и многочисленные водно-болотные птицы (гуси, утки, кулики и др.), привлекающие в тундру для выведения птенцов, а также такие хищники, как песец и заходящий с моря белый медведь. В результате трофическая цепь разрастается в трофиче-

скую сеть, и перенос вещества по ней становится более сложным процессом. Человек собирает свою «дань» с каждого звена цепи, в том числе со звена продуцентов, собирая «олений мох» для использования в лекарственных целях [2]. Вдобавок жители побережья Северного Ледовитого океана — как коренное, так и приезжее население — в качестве пищевого ресурса активно используют рыбу.

Хотя большинство морских млекопитающих (киты, моржи) включены в Красные книги разных уровней, но коренному населению охота на них разрешена (рис. 1, 2), так что обитателей прибрежных вод шельфовых морей Северного Ледовитого океана также можно считать звеньями трофических цепей, содержащих антропическое звено. Таким образом, все обитатели биомы тундры, включая человека, оказываются, по выражению солиста рок-группы «Наутилус» Вячеслава Бутусова, «скованными одной цепью».

Охота и рыболовство всегда были неотъемлемой частью жизни людей в Арктике [5, 6, 7, 8]. Об этом свидетельствуют многочисленные датированные каменным веком находки орудий рыбного лова и звериного промысла, петроглифы на побережьях Белого моря и Онежского озера, сооруженные



Рис. 2. Охота инуитов на нарвалов (Гренландия, 1990 г.). Фото: National Geographic, 1990

Fig. 2. Inuit narwhale hunting (Greenland, 1990). Photo: National Geographic, 1990

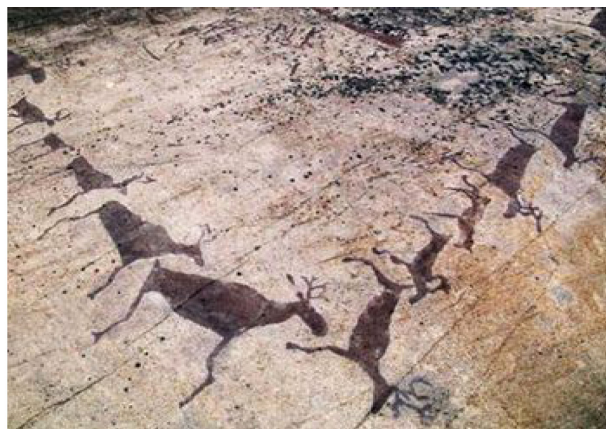


Рис. 3. Лебеди (слева) и лоси (справа) — объекты охоты людей каменного века на петроглифах побережий Онежского озера (слева) и Белого моря (справа) (фото А.Н. Завьяловой и М.Б. Шилина)

Fig. 3. Swans (left) and elks (right) — objects of hunting by Stone Age people on petroglyphs of the shores of Lake Onega (left) and the White Sea (right) (photo by A.N. Zavyalova and M.B. Shilin)

из китовых костей «аллеи китов» в Гренландии и на Чукотке, а также изображения сцен охоты на клыках моржей, широкое использование в быту северных народов шкур оленей и — в меньшей степени — белых медведей и др. (рис. 3).

Антропогенное давление на биологические сообщества возросло с ростом численности населения Арктики (главным образом приезжего), которое вдобавок стало использовать все более эффективные методы промысла биоресурсов, в том числе крупные и быстроходные рыболовецкие суда, а также и лодки, усовершенствованные ружья с увеличенной дальностью боя и мелкочаеистые рыболовные сети. В результате численность многих видов фауны, являвшихся промысловыми (гренландский кит, котик, калан), сократилась до критической, а наиболее удобные объекты охоты — морская корова, евразийский овцебык, бескрылая гагарка — оказались полностью истребленными. В настоящее время приняты меры по охране уязвимых видов зверей и птиц; проведены мероприятия по реинтродукции в таймырскую тундру овцебыка.

Определенные изменения в тундровые пищевые цепи и сети внесли домашние собаки — сторожевые, ездовые и пр. У коренного населения действует правило кормить собак мороженой рыбой, а в летнее время они охотятся в тундре на леммингов и подросших птенцов гусей и уток — так что они «встроены» как в тундровые, так и в прибрежно-морские трофические цепи.

2. Тундра и ее обитатели — поглотители загрязняющих веществ

В дополнение к таким традиционным факторам антропогенного воздействия на арктические экосистемы, как охота, морской промысел и рыболовство, начиная с XIX века проблемой для биота тундры стало загрязнение природной среды химическими веществами [6, 9–13], в том числе радиоактивными [14]. Последнее является следствием проведения Советским Союзом испытаний ядерного оружия в 1955–1990 гг. на Новой Земле.

Загрязнение тундры тяжелыми металлами — прежде всего свинцом и ртутью — началось в период ранней индустриализации в 1850-е годы и продолжается по сей день [6, 13, 15–17]. После окончания Второй мировой войны в мире началось массовое использование промышленных химикатов и пестицидов. Многие из этих веществ оказались стойкими: внести их в природную среду оказалось легче, чем вывести. Эти вещества начиная с 1950-х гг. стали широко использоваться в хозяйстве практически всех стран, не исключая Советский Союз, в качестве пестицидов, инсектицидов, топливных присадок, технических смазок, красок, герметиков, растворителей и др. Подавляющее большинство этих веществ синтезировано человеком искусственно и не имеет аналогов в природе, то есть они являются ксенобиотиками — чуждыми для живых организмов соединениями. При попадании в организм животного (и человека) эти вещества вызывают отравление — и иногда смертельное.

Их важной и опасной экологической особенностью является способность накапливаться в пищевых цепях, передаваясь от звена к звену и достигая максимальных концентраций в конечных звеньях. По совокупности перечисленных особенностей этим веществам присвоено общее название — стойкие токсичные вещества (СТВ). Наиболее распространенными СТВ являются дихлордифенил-трихлорэтаны (ДДТ), полихлорированные дибензодиоксины, полихлорированные бифенилы (ПХБ), хлорданы и др. Изначально особо опасные СТВ называли «грязной дюжиной», но впоследствии их список был значительно расширен.

Коварство СТВ заключается в том, что они не имеют вкуса и запаха, токсичны даже в очень малых концентрациях, устойчивы к термическому разрушению и гидролизу — то есть могут долго сохраняться в той среде, в которую были внесены. Благодаря низкой растворимости в воде и летучести СТВ могут переноситься атмосферными потоками, океаническими и речными течениями. Попадая в ткани рыб, птиц и млекопитающих, СТВ разносятся этими биологическими агентами на десятки тысяч километров, иногда — против воздушных и водных потоков.

Биом тундры является одним из мест концентрации СТВ. Они обычно образуются в результате промышленных и бытовых выбросов в регионах с умеренным климатом и разносятся по всей биосфере глобальными атмосферными и океаническими путями. Токсиканты, переносимые теплыми воздушными потоками, осаждаются при столкновении с холодными арктическими воздушными фронтами, что приводит к их осаждению в природной среде Арктики [13, 16, 18–20].

В 1950–2020-х гг. в биом тундры был внесен целый ряд антропогенных хлорированных, бромированных и фторированных СТВ. Большинство из них встроились в тундровые трофические цепи и в настоящее время обнаруживаются в тканях различных арктических животных, прежде всего в жировых отложениях и в тканях печени.

Арктические рыбы и наземные животные биом тундры используют богатые энергией жировые ткани как основной источник энергии [21–24]. В жировых тканях обычно содержатся различные природные липо-

фильные соединения, такие как специфические витамины (А и D) и эндогенные стероидные гормоны, которые транспортируются в организме через порталную и периферическую кровеносные системы [11, 15, 17, 22, 24, 25]. Однако большинство СТВ и метилртуть $[\text{CH}_3\text{Hg}]^+$ — чрезвычайно токсичное и биодоступное химическое соединение — также обладают высокой липофильностью и поэтому легко накапливаются в жировых тканях, богатых липидами.

Низкий уровень выведения этих соединений из организма приводит к тому, что со временем происходит их накопление в различных органах (прежде всего в печени), называемое биоаккумуляцией. Передаваясь по пищевой цепи от добычи к хищнику, данные вещества накапливаются в конечных звеньях цепи [26, 27].

Коренные северяне и их собаки также являются активными поглотителями СТВ из-за традиционного потребления мяса северных оленей, китов, водоплавающих птиц, а также рыбы [28, 29]. Новые перфторированные соединения (поли- и перфторалкильные вещества), в частности перфтороктансульфонат и другие длинноцепочечные поли- и перфторкарбоновые кислоты, являются белковофильными и также накапливаются в организмах животных из-за высокой устойчивости к биологической деградации [16, 21]. Анализ мяса крупных морских млекопитающих, которыми преимущественно питаются инуиты, показал, что в нем в высоких концентрациях содержатся СТВ, причем среди них продолжают доминировать и представляют наибольшую опасность ПХБ — несмотря на то, что они были запрещены к использованию несколько десятилетий назад. Другие СТВ, в том числе хлорорганические пестициды, бромированные антипирены, поли- и перфторалкильные вещества и ртуть, также могут содержаться в концентрациях, опасных для представителей высших звеньев трофических цепей, в том числе людей [9, 11, 15, 21, 24, 30].

3. Воздействие факторов дикой природы на здоровье человека в Арктике

СТВ и ртуть представляют серьезную угрозу для конечных звеньев пищевых цепей в Арктике (как тундры, так и шельфовых

морей Северного Ледовитого океана), равно как и людей, поскольку эти антропогенные соединения и их метаболиты, попадая в организм, вызывают хронический и комбинированный стресс, проявляющийся в виде ряда последствий для здоровья [21–23, 31, 32].

У белых медведей до 70 % общего количества хлорорганических веществ, поступающих в организм, переносится от матери к детенышу в период лактации, в результате чего концентрация этих веществ в жировой ткани детенышей примерно в три раза выше, чем у их матерей [34–37]. Считается, что первые детеныши белых медведей особенно уязвимы; высокое содержание загрязняющих веществ в молоке впервые кормящей самки может повлиять на их нормальное развитие и рост [22, 23]. Предполагается, что хлорированные и бромированные СТВ, по отдельности или все вместе, являются гораздо лучшими предикторами снижения плотности популяций белого медведя, чем плотность популяции человека и сокращение площади морского льда [38–41].

Хищные и рыбацкие китообразные и ластоногие, а также белые медведи содержат в своем жире очень высокие концентрации СТВ и ртути [10, 11, 21, 26, 41]. Поскольку гренландцы традиционно употребляют в пищу значительное количество жировой ткани этих видов, они являются одним из арктических народов, наиболее подверженных воздействию СТВ [12, 13, 42, 43]. Такое воздействие, вероятно, представляет высокий риск для здоровья [43, 44]. Воздействие загрязняющих веществ на человека в Гренландии оценивалось на основе химических анализов жировой ткани видов-жертв и объемов потребления человеком пищи [12, 45–47]. Охотники в Гренландии особенно подвержены воздействию высоких концентраций СТВ из-за частого употребления в пищу тканей белых медведей, косаток, нарвалов и тюленей [13, 43, 48–52]. Концентрация поли- и перфторалкильных веществ в крови мужчин-инуитов из Восточной Гренландии может быть в два-три раза выше, чем у жителей Фарерских островов, в рационе которых мясо морских млекопитающих отсутствует (за исключением гринд) [51, 50, 53].

Воздействие ртути также представляет большую опасность для человека и призна-

но проблемой нейроэндокринного и иммунного здоровья в обществах Фарерских островов, Западной Гренландии (Авандерсуак, Туле) и Канады [17, 30, 54].

4. Мониторинг здоровья дикой природы

Знаковым событием явилось введение в мировую науку по результатам Конференции ООН по проблемам окружающей среды человека в 1972 г. термина «мониторинг», под которым было предложено понимать систему регулярных многолетних наблюдений за природными объектами, подвергающимися антропогенному воздействию [55].

От СССР в Конференции принял участие директор Института прикладной геофизики АН СССР, первый заместитель начальника Главного управления Гидрометеослужбы при Совете Министров СССР Ю.А. Израэль, предложивший развивать методы контроля за поступлением загрязняющих веществ в природную среду и изучение воздействия поллютантов даже в предельно малых концентрациях на биоту [55, 56]. Этот подход принято называть «антропогенным мониторингом», принципы которого в настоящее время отрабатываются в России при проведении наблюдений в Арктической зоне Российской Федерации.

В 1991 г. стартовала международная Программа арктического мониторинга и оценки — АМАП (англ. AMAP). АМАП разработана министерствами восьми арктических стран. Она направлена на изучение уровня антропогенных поллютантов и на оценку их влияния на все уровни жизни окружающей среды Арктики. Результаты выполнения программы АМАП позволяют получить объективные оценки состояния природной среды, растительного и животного мира Арктики [6, 9–13, 30, 41, 49].

Таким образом, в течение трех десятилетий программа АМАП и связанные с ней подпрограммы отслеживают состояние здоровья диких животных и людей биота тундры [6, 10, 12, 30, 41, 57, 58]. Для изучения концентраций загрязняющих веществ, пространственных и временных тенденций, а также воздействия на человека в рамках этих программ в качестве ключевых видов для мониторинга используются преимущественно кольчатые нерпы и белые медведи [21, 59].

С 1980-х годов в регионе Восточной Гренландии было получено большое количество образцов органов и тканей белых медведей в рамках традиционной охоты коренного населения [17]. Эти исследования предоставили уникальную возможность изучить воздействие СТВ на отдельные органы и ткани медведей [22]. В частности, проведены гистопатологические и анатомо-морфологические исследования их костей [22, 23, 60, 61]. Аналогичным образом в Канаде и на Аляске были собраны образцы жировой ткани и крови кольчатых нерп — объектов охоты коренного населения, что позволило выявить закономерности распространения загрязнения СТВ [21]. Анализ плотности костной ткани и гистопатологические исследования были проведены на популяциях кольчатых нерп в Западной Гренландии [62, 63]. На Аляске аналогичные исследования выполнены на белых медведях, кольчатых нерпах и китах [64–66].

Использование некоторых из СТВ, таких как ПХБ и ртуть, регулируется международными соглашениями (<http://chm.pops.int>, <http://www.mercuryconvention.org>), однако их концентрация в организмах белых медведей, обитающих, например, в Гренландии и заливе Гудзона, практически не изменилась или даже увеличилась [15, 17, 20, 27, 57, 67]. Вероятно, это связано с влиянием изменения климата на пищевые цепочки, передачей СТВ из поколения в поколение, а также продолжающимися вторичными и непреднамеренными выбросами [17, 19, 27, 58]. Что касается ртути, то ее содержание в организме большинства высших хищников в Арктике постоянно увеличивается, достигнув к настоящему времени 20-кратного превышения базового уровня доиндустриальной эпохи [15, 17, 68, 69].

По данным АМАР, на арктической территории России концентрация веществ из списка «грязной дюжины» в целом ниже, чем в Гренландии, Канаде (Гудзонов залив) и на Аляске.

5. Биологические эффекты

5.1. Хронические заболевания

Хронические заболевания, в том числе диабет, инфекции верхних дыхательных путей и рецидивирующие инфекции среднего уха, рак и остеопороз, становятся эпидемиями

в биоме тундры и в Арктике в целом (включая зону шельфа). С высокой вероятностью эти заболевания могут быть вызваны хроническим воздействием СТВ и связанным с этим нарушением работы эндокринной системы [10, 12, 70].

5.2. Изменения минеральной плотности костной ткани

Снижение минеральной плотности костной ткани, связанное с воздействием ПХБ, отмечено не только у водных животных Арктики (белые медведи, моржи, нарвалы) [22, 61], но и по всему миру — например, у ластоногих Балтики и аллигаторов Флориды, США [75–78].

Исследования, проведенные среди жителей Юго-Западной Гренландии и женщин-кри из восточной части залива Джеймс в Канаде, посвященные остеопорозу в связи с воздействием СТВ, показали, что индекс жесткости костной ткани отрицательно коррелирует с концентрацией СТВ в плазме крови [12, 13, 77, 79].

5.3. Эндокринные нарушения и репродуктивные органы

Нарушение работы эндокринной системы из-за воздействия СТВ, вероятно, является серьезной проблемой для дикой природы Арктики [45, 80, 81]. В последние десятилетия особое внимание уделялось белым медведям [45, 81]. Эти исследования были подкреплены контрольными экспериментами на ездовых собаках и песцах [45]. Аналогичным образом у инуитов нарушение эндокринной системы, связанное с СТВ, влияет на физиологические показатели, в том числе на репродуктивную функцию, иммунитет и частоту онкологических заболеваний [43, 82].

Обнаружено, что сезонные гормональные изменения и выработка спермы у песцов зависят от концентрации СТВ в репродуктивных органах [86, 87]. Также есть признаки того, что размер кости пениса, яичек и яичников белых медведей обратно пропорционален концентрации СТВ [61, 85]. Такая информация может быть полезна в медицине, когда имеются подозрения, что СТВ оказывают эндокринное воздействие на человека.

5.4. Иммунные эффекты

Уже в течение многих лет известно, что СТВ влияют на иммунитет, и хотя механизмы подавления ими иммунитета до конца не изучены, но ясно, что они включают в себя как гуморальные, так и клеточные системы [10, 88–92]. Сообщается о влиянии загрязняющих веществ на иммунную систему диких животных Арктики. Это свидетельствует о том, что концентрации СТВ в настоящее время достигают уровня, способного вызывать значительные изменения в иммунной системе млекопитающих, в том числе человека, а это может иметь серьезные последствия для их устойчивости к болезням.

Эксперименты *in vitro*, в ходе которых иммунные клетки подвергались воздействию загрязняющих веществ в лабораторных условиях для определения степени и уровня воздействия, также проводились на представителях дикой природы Арктики. Было обнаружено, что ПХБ, но не ПФАС, вызывают у тюленей значительное подавление пролиферации лимфоцитов при соответствующих концентрациях в окружающей среде [97]. Лейкоциты белухи также использовались для демонстрации того, что воздействие низких уровней ртути может привести к значительному снижению пролиферации лимфоцитов и выработки внутриклеточных тиолов, а также к значительному увеличению выработки металлотионеина [98]. В целом исследования диких животных и эксперименты *in vitro* показывают, что высокая концентрация загрязняющих веществ в Арктике может вызывать у них подавление иммунитета [13, 82, 99–102]. Если СТВ подавляют иммунный ответ организма, то в недалеком будущем это может сказаться на скорости распространения в тундре как среди местного, так и приезжего населения туберкулеза, кишечных заболеваний, гепатитов, зоонозных и паразитарных заболеваний, а также и ВИЧ.

5.5. Неврологические эффекты

Многочисленные загрязняющие вещества в окружающей среде могут проникать через гематоэнцефалический барьер, влиять на функционирование мозга и, соответственно, на поведение животных, в частности на спаривание, мотивацию, коммуникацию, агрессию, доминирование и другие социальные проявления, а также на обучение

и другие когнитивные способности [31, 103]. СТВ могут влиять на функции или развитие мозга множеством способов — например, взаимодействуя с нейромедиаторными системами мозга [109]. Кроме того, способность некоторых СТВ вызывать эпигенетические изменения может представлять собой механистический путь нарушения развития нервной системы [111–113]. У белых медведей были обнаружены связи между нейрохимическими и эпигенетическими биомаркерами и уровнем ртути в тканях мозга [17, 114, 115].

Другой предполагаемый механизм нейротоксического воздействия на развитие связан с нарушением выработки гормонов щитовидной железы, необходимых для правильного развития нервной системы плода и новорожденного [117, 118]. Высокий уровень СТВ, обнаруженный у 4-месячных детенышей белых медведей [37], и связанные с этим нарушения работы щитовидной железы у детенышей [119, 120] вызывают опасения по поводу влияния на развитие нервной системы у белых медведей.

5.6. Множественные стрессоры

Арктические экосистемы подвергаются воздействию не только загрязняющих веществ, но и множеству иных стрессовых факторов. Два основных дополнительных аспекта, которые следует учитывать при изучении здоровья зверей и людей в Арктике, — это изменение климата и инфекционные заболевания. Изменение климата оказывает двойное воздействие: оно изменяет пути распространения загрязняющих веществ в пищевых цепочках [67, 121] и способствует распространению и усилению вирулентности связанных со льдами зоонозных заболеваний, переносимых, например, тюленями [122–124].

Следствием потепления климата может стать проникновение в тундру из регионов с более мягким климатом зоонозных инфекций и паразитарных болезней, возбудители которых передаются человеку от других животных. Здесь следует отметить реальную угрозу внедрения в биом тундры энцефалитного клеща, ареал распространения которого в последние годы постоянно расширяется. Прочими возбудителями зоонозов, по данным АМАР, могут стать вирусы, бактерии, простейшие, грибки и гель-

минты. У инуитов и ездовых собак общий микробиом, что повышает риск зоонозных инфекций [87].

Прогнозируемые потери морского льда могут иметь важные последствия для связанных со льдом таких хищников, как белые медведи [128–132]. Это связано с тем, что они занимают большие территории и нуждаются в большем количестве энергии, а значит в большем количестве пищи, что может привести к повышению концентрации ПХБ в их крови [133, 134]. В некоторых регионах сокращение площади морского льда уже привело к изменениям в распространении тех видов тюленей, на которых охотятся белые медведи, а это привело к повышенному биоаккумуляции некоторых СТВ, поскольку медведями потребляется больше загрязненной добычи [67, 135]. Изменение рациона в сторону питания растениями и ягодами снизит, а мясом карибу и яйцами морских птиц — увеличит воздействие СТВ [136–138]. Кроме того, вызванная потеплением климата миграция в Арктику тепловодных видов рыб [139, 140] может действовать как биопереносчик, повышая уровень загрязняющих веществ в морских арктических экосистемах [141, 142], что в конечном счете приведет к повышенному биоаккумуляции этих соединений в организме человека и других высокотрофных морских животных [81, 121].

Потепление климата и таяние вечной мерзлоты неизбежно приведет к переходу многих веществ и патогенной микрофлоры из замороженного состояния в активное. Из-за возрастающей частоты природных катастрофических явлений в тундровом биоме (штормов, землетрясений, интенсивного дрейфа льда, карста и др.) ускорятся переносы загрязняющих веществ на большие расстояния. Повышение уровня Мирового океана (в нашем случае — Северного Ледовитого) вызовет размыв береговой линии и, как следствие, приведет к попаданию в воду накапливавшихся в береговой зоне веществ, воздействие которых на диких животных и человека непредсказуемо [143].

5.7. Перспективы и рекомендации

Для оптимизации прогнозирования рисков для здоровья, связанных с воздействием загрязняющих веществ на экосистемном

и индивидуальном уровнях, необходимы дальнейшие исследования токсикокинетики и токсикодинамики СТВ и ртути в дикой природе Арктики и в организмах местных жителей в условиях меняющихся условий.

В настоящее время проводятся обширные и глубокие исследования распространения арктических зоонозов и их влияния на здоровье человека, а также их взаимодействия с изменением климата и воздействием загрязняющих веществ. Дополнительные усилия прилагаются в сфере просвещения населения — как коренного, так и приезжего.

Выполненный обзор исследований, проведенных в арктической тундре и прилегающих шельфовых морях, убедительно показывает, что концентрация природоохранных усилий на каком-либо одном звене трофических цепей и трофической сети в целом не будет эффективным решением задачи борьбы с загрязнением. Растения, дикие животные Арктики и человек поистине, по словам Вячеслава Бутусова, «скованы одной цепью» — трофической.

Перспективной представляется концепция «Единое здоровье», направленная на сохранение всех звеньев трофической сети Арктики и в конечном счете — на улучшение здоровья и благополучия людей за счет предотвращения рисков и смягчения последствий кризисов, возникающих на стыке между людьми, животными и окружающей средой (<http://www.onehealthglobal.net>). Учитывая тесную связь между дикой природой, ездовыми собаками и людьми в Северной Атлантике, а также долгосрочные программы биомониторинга с использованием различных ветеринарных инструментов на протяжении последних трех десятилетий, подход «Единое здоровье» в Арктике требует сосредоточения внимания на всех ключевых видах и областях исследований, которые связывают здоровье дикой природы, людей и экосистем в целом [87].

Результаты исследований обладают высокой научной новизной и могут быть использованы при разработке методов управления развитием арктических регионов [150–152].

Исследования выполнены в рамках государственного задания, проект FSZU-2023-0002 (РГГМУ).

Литература

1. Одум Ю. Основы экологии. Москва: Мир; 1975. [Odum Yu. Fundamentals of ecology. Moscow: Mir Publ.; 1975. (In Russ.).]
2. Федоров М.П., Шилин М.Б., Блинов Л.Н., Бобылев Н.Г., Молодкина Л.М., Романов М.В. Экологические основы управления природно-техническими системами. СПб.: изд-во Политехнического ун-та; 2007. [Fedorov M.P., Shilin M.B., Blinov L.N., Bobylev N.G., Molodkina L.M., Romanov M.V. Ecological foundations of natural and technical systems management. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University; 2007. (In Russ.).]
3. Odum E. Ecology — A Bridge Between Science and Society. Sinauer Ass.; 1997.
4. Элтон Ч. Экология животных. Москва — Ленинград: Гос. изд-во биол. и мед. лит-ры; 1934. [Elton Ch. Animal ecology. Moscow — Leningrad: Гос. изд-во биол. и мед. лит-ры; 1934. (In Russ.).]
5. Крупник И.И. Арктическая этноэкология: модели традиционного природопользования морских охотников и оленеводов Северной Евразии. Москва: Наука; 1989. [Krupnik I.I. Arctic Ethnoecology: models of traditional nature management of marine hunters and reindeer herders of Northern Eurasia. Moscow: Nauka Publ.; 1989. (In Russ.).]
6. АМАР. Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) [internet]. Oslo, Norway; 1998. Available at: https://gridarendal-web-site-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s_document/821/original/AMAP_1.pdf?1629126805
7. Малори Ж. Аллея китов. Москва: Нота бене; 2007. [Malori Zh. Whale Alley. Moscow: Nota bene; 2007. (In Russ.).]
8. Айтматов Ч.Т. Пегий пес, бегущий краем моря. Москва: Азбука; 2024. [Aitmatov Ch.T. A piebald dog running along the edge of the sea. Moscow: Azbuka Publ.; 2024. (In Russ.).]
9. АМАР. AMAP assessment 2002 — Human Health in the Arctic 2003 [internet]. Oslo, Norway; 2003. Available at: <https://www.amap.no/documents/doc/amap-assessment-2002-human-health-in-the-arctic/95>
10. АМАР. AMAP Assessment 2002: Persistent Organic Pollutants in the Arctic [internet]. Oslo, Norway; 2004. Available at: <https://www.amap.no/documents/doc/amap-assessment-2002-persistent-organic-pollutants-in-the-arctic/96>
11. АМАР. AMAP Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic [internet]. Oslo, Norway; 2005. Available at: <https://www.amap.no/documents/doc/amap-assessment-2002-heavy-metals-in-the-arctic/97>.
12. АМАР. AMAP Assessment 2009: Human Health in the Arctic [internet]. Oslo, Norway; 2009. Available at: <https://www.amap.no/documents/doc/amap-assessment-2009-human-health-in-the-arctic/98>
13. АМАР. AMAP Assessment 2015: Human Health in the Arctic [internet]. Oslo, Norway; 2009. Available at: <https://www.amap.no/documents/doc/Amapassessment-2015-Human-health-in-the-Arctic/1346>
14. Shilin M. Radioactive contamination of Russia's Northern Seas: how to evaluate a real treat. The Monitor. 1998;4(4):52–53.
15. Dietz R., Outridge P.M., Hobson K.A. Anthropogenic contribution to mercury levels in present-day Arctic animals — a review. Sci. Total Environ. 2009;407(24):6120–6131. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.08.036>
16. Muir D.C.G., de Wit C.A. Trends of legacy and new persistent organic pollutants in the circumpolar Arctic: overview, conclusions, and recommendations. Sci. Total Environ. 2010;408(15):3044–3051. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.032>
17. Dietz R., Basu N., Braune B., O'Hara T., Letcher R., Scheuhammer T., et al. What are the toxicological effects of mercury in Arctic biota? Sci. Total Environ. 2013;443:775–790. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.046>
18. Butt C.M., Berger U., Bossi R., Tomy G.T. Levels and trends of poly- and perfluorinated compounds in the Arctic environment. Sci. Total Environ. 2010;408(15):2936–2965. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.03.015>
19. Houde M., De Silva A.O., Muir D.C.G., Letcher R.J. Monitoring of perfluorinated compounds in aquatic biota: an updated review. Environ. Sci. Technol. 2011;45(19):7962–7973. <https://doi.org/10.1021/es104326w>

20. Rigét F., Vorkamp K., Bossi R., Sonne C., Letcher R.J., Dietz R. Twenty years of monitoring of persistent organic pollutants in Greenland biota. A review. *Environ. Pollut.* 2016;217:114–123. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.11.006>
21. Letcher R.J., Bustnes J.O., Dietz R., Jenssen B.M., Jørgensen E.H., Sonne C. et al. Exposure and effects assessment of persistent organohalogen contaminants in arctic wildlife and fish. *Sci. Total Environ.* 2010;408(15):2995–3043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.038>
22. Sonne C. Health effects from long-range transported contaminants in Arctic top predators: an integrated review based on studies of polar bears and relevant model species. *Environ. Int.* 2010;36(5):461–491. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.03.002>
23. Sonne C., Letcher R.J., Bechshøft T.Ø., Rigét F.F., Muir D.C.G., Leifsson P.S. et al. Two decades of biomonitoring polar bear health in Greenland: a review. *Acta Vet. Scan.* 2012;54:S15. <https://doi.org/10.1186/1751-0147-54-s1-s15>
24. Brown T.M., Macdonald R.W., Muir D.C.G., Letcher R.J. The distribution and trends of persistent organic pollutants and mercury in marine mammals from Canada's Eastern Arctic. *Sci. Total Environ.* 2017;618:500–517. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.052>
25. Tartu S., Bourgeon S., Aars J., Andersen M., Polder A., Thiemann G.W., Welker J.M., Routti H. Sea ice-associated decline in body condition leads to increased concentrations of lipophilic pollutants in polar bears (*Ursus maritimus*) from Svalbard, Norway. *Sci. Total Environ.* 2017;576:409–419. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.132>
26. Pedro S., Boba C., Dietz R., Sonne C., Rosing-Asvid A., Hansen M., Provatas A., McKinney M.A. Blubber-depth distribution and bioaccumulation of PCBs and organochlorine pesticides in Arctic-invading killer whales. *Sci. Total Environ.* 2017;601–602:237–246. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.193>
27. Letcher R.J., Morris A.D., Dyck M., Sverko E., Reiner E., Blair D.A.D., Chu S. G., Shen L. Legacy and (re)emerging halogenated persistent organic pollutants in polar bears from a contamination hotspot in the Arctic, Hudson Bay Canada. *Sci. Total Environ.* 2018;610–611:121–136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.035>
28. Kirkegaard M., Sonne C., Dietz R., Jenssen B.M., Leifsson P.S., Jensen J.E.B., Letcher R. J. Testosterone concentrations and male genital organ morphology in Greenland sled dogs (*Canis familiaris*) dietary exposed to organohalogen contaminants. *Toxicol. Environ. Chem.* 2010;92(5):955–967. <https://doi.org/10.1080/02772240903143836>
29. Sonne C., Kirkegaard M., Jacobsen J., Jenssen B.M., Letcher R.J., Dietz R. Altered 25-hydroxyvitamin D₃ in liver tissue from Greenland sledge dogs (*Canis familiaris*) dietary exposed to organohalogen polluted minke whale (*Balaenoptera acuterostrata*) blubber. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2014;104:403–408. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.11.017>
30. AMAP. AMAP Assessment 2013: Arctic Ocean Acidification [internet]. Oslo, Norway; 2013. Available at: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1258544/m2/1/high_res_d/AOA-science-sec.pdf.pdf
31. Grandjean P., Landrigan P.J. Developmental neurotoxicity of industrial chemicals. *Lancet.* 2006;368(9553):2167–2178. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(06\)69665-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(06)69665-7)
32. Jenssen B.M., Dehli Villanger G., Gabrielsen K.M., Byringsvik J., Ciesielski T.M., Sonne C., Dietz R. Anthropogenic flank attack on polar bears: interacting consequences of climate warming and pollutant exposure. *Front. Ecol.* 2015;(3):1–7. <https://doi.org/10.3389/fevo.2015.00016>
33. Polischuk S.C., Norstrom R.J., Ramsay M.A. Body burdens and tissue concentrations of organochlorines in polar bears (*Ursus maritimus*) vary during seasonal fasts. *Environ. Pollut.* 2002;118(1):29–39. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00278-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00278-0)
34. Dietz R., Rigét F.F., Sonne C., Letcher R.J., Born E.W., Muir D.C.G. Seasonal and temporal trends in polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in East Greenland polar bears (*Ursus maritimus*), 1990–2001 // *Sci Total Environ.* 2004;331(1-3):107–124. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.03.025>
35. Muir D.C.G., Backus S., Derocher A.E., Dietz R., Evans T.J., Gabrielsen G.W. et al. Brominated flame retardants in polar bears (*Ursus maritimus*) from Alaska, the Canadian Arctic, East Greenland, and Svalbard. *Environ. Sci. Technol.* 2006;40(2):449–455. <https://doi.org/10.1021/es051707u>
36. Dietz R., Rigét F.F., Sonne C., Muir D.C.G., Backus S., Born E.W., Kirkegaard M., Muir D.C.G. Age and seasonal variability of polybrominated diphenyl ethers in free-ranging East Greenland polar bears (*Ursus maritimus*). *Environ. Pollut.*, 2007;146(1):177–184. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.05.040>

37. Bytingsvik J., Lie E., Aars J., Derocher A.E., Wiig Ø., Jenssen B.M. PCBs and OH-PCBs in polar bear mother-cub pairs: a comparative plasma levels in 1998 and 2008. *Sci. Total Environ.* 2012;417-418:117–128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.12.033>
38. Nuijten R.J.M., Hendriks A.J., Jenssen B.M., Schipper A.M. Circumpolar contaminant concentrations in polar bears (*Ursus maritimus*) and potential population-level effects. *Environ. Res.* 2016;151:50–57. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.07.021>
39. Dietz R., Gustavson K., Sonne C., Desforges J.P., Rigét F.F., McKinney M.A., Letcher R.J. Physiologically-based pharmacokinetic modelling of immune, reproductive and carcinogenic effects from contaminant exposure in polar bears (*Ursus maritimus*). *Environ. Res.* 2015;140:45–55. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.03.011>
40. Pavlova V., Grimm V., Dietz R., Sonne C., Vorkamp K., Rigét F.F. et al. Modelling population level effects of PCB contamination in East Greenland polar bears. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2016;70:143–154. <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0203-2>
41. AMAP. AMAP Assessment 2018: Biological Effects of Contaminants on Arctic Wildlife and Fish. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) [internet]. Oslo, Norway; 2018. Available at: <https://www.amap.no/documents/doc/amap-assessment-2018-biological-effects-of-contaminants-on-arctic-wildlife-and-fish/1663>.
42. Lindh C.H., Rylander L., Toft G., Axmon A., Rignell-Hydbom A., Giwercman A. et al. Blood serum concentrations of perfluorinated compounds in men from Greenlandic Inuit and European populations. *Chemosphere*, 2012;88(11):1269–1275. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.03.049>
43. Sonne C., Dietz R., Letcher R.J. Chemical cocktail party in East Greenland: a first time evaluation of human organohalogen exposure from consumption of ringed seal and polar bear tissues and possible health implications. *Toxicol. Environ. Chem.* 2013;95(5):853–859. <https://doi.org/10.1080/02772248.2013.809917>
44. Wielsoe M., Kern P., Bonefeld-Jørgensen E.C. Serum levels of environmental pollutants is a risk factor for breast cancer in Inuit: a case control study. *Environ. Health*, 2017;16:56. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0269-6>
45. Deutch B., Dyerberg J., Pedersen H.S., Asmund G., Møller P., Hansen J.C. Dietary composition and contaminants in north Greenland, in the 1970s and 2004. *Sci. Total Environ.* 2006;370:372–381. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.07.015>
46. Johansen P., Muir D.C.G., Asmund G., Rigét F.F. Human exposure to contaminants in the traditional Greenland diet. *Sci. Total Environ.* 2004;331(1-3):189–206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.03.029>
47. Nielsen E., Larsen J.C., Ladefoged O. Risk assessment of contaminant intake from traditional Greenland food items [internet]. Danish Veterinary and Food Administration; 2006. Available at: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/3563700/Risk_assessment_traditional_Greenland_food_items.pdf.
48. Bonefeld-Jørgensen E. Biomonitoring in Greenland: human biomarkers of exposure and effects—a short review. *Rural Remote Health.* 2010;10:1362. <https://doi.org/10.22605/rrh1362>
49. AMAP. AMAP Assessment 2011: Mercury in the Arctic [internet]. Oslo, Norway; 2011. Available at: <https://www.amap.no/documents/doc/amap-assessment-2011-mercury-in-the-arctic/90>.
50. Grandjean P., Satoh H., Murata K., Eto K. Adverse effects of methylmercury: environmental health research implications. *Environ. Health Perspect.* 2010;118(8):1137–1145. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901757>
51. Long M., Bossi R., Bonefeld-Jørgensen E.C. Level and temporal trend of perfluoroalkyl acids in Greenlandic Inuit. *Int. J. Circumpolar health.* 2012;71(1):17998. <https://doi.org/10.3402/ijch.v71i0.17998>
52. Sonne C., Gustavson K., Rigét F.F., Dietz R., Krüger T., Bonefeld-Jørgensen E.C. Physiologically based pharmacokinetic modeling of POPs in Greenlanders *Environ. Int.* 2014;64:91–97. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.12.006>
53. Bonefeld-Jørgensen E., Long M., Bossi R., Ayotte P., Asmund G., Krüger T. et al. Perfluorinated compounds are related to breast cancer risk in Greenlandic Inuit: a case control study. *Environ. Health*, 2011;10:88. <https://doi.org/10.1186/1476-069x-10-88>
54. Grandjean P., Landrigan P.J. Neurobehavioural effects of development toxicity. *The Lancet Neurology.* 2014;13(3):330–338. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(13\)70278-3](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(13)70278-3)
55. Погребов В.Б., Шилин М.Б. Экологический мониторинг прибрежной зоны арктических морей. СПб.: Гидрометеиздат; 2001. [Pogrebov V.B., Shilin M.B. Environmental monitoring of the coastal zone of the Arctic seas. St. Petersburg: Gidrometeizdat Publ.; 2001. (In Russ.).]

56. Снытко В.А., Собисевич А.В. Система экологического мониторинга в научном наследии академиков И. П. Герасимова и Ю. А. Израэля. Архивная копия от 4 апреля 2022 на Wayback Machine. В: Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование: тр. пятой междунар. науч.-практ. конф., 30 нояб. – 3 дек. 2017 г.: сб. ст. Москва; 2017, с. 393–398. [Snytko V.A., Sobisevich A.V. System of environmental monitoring in the scientific heritage of academicians I. P. Gerasimov and Yu. A. Israel. Archived copy dated April 4, 2022 on the Wayback Machine. In: Environmental status indication: theory, practice, education: proceedings of the Fifth International Scientific and Practical Conference, Nov 30 — Dec 3. 2017: sat. art. Moscow; 2017, pp. 393–398. (In Russ.)].
57. Dietz R., Born E.W., Rigét F.F., Aubail A., Sonne C., Drimmet R.C., Basu N. Temporal trends and future predictions of mercury concentrations in Northwest Greenland polar bear (*Ursus maritimus*) hair. Environ. Sci. Technol. 2011;45(4):1458–1465. <https://doi.org/10.1021/es1028734>
58. Innovative Digital Technologies Development for Projects Management within Northern Sea Route Area / V. M. Abramov, E. P. Istomin, N. N. Popov [et al.] // Vision 2025: Education Excellence and Management of Innovations through Sustainable Economic Competitive Advantage: Proceedings of the 34th International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019, Madrid, 13–14 November 2019. — Madrid: International Business Information Management Association, 2019. — P. 10132–10141. EDN ARNAIR.
59. Rigét F.F., Bossi R., Sonne C., Vorkamp K., Dietz R. Trends of perfluorochemicals in Greenland ringed seals and polar bears: indications of decreasing trends. Chemosphere. 2013;93(8):1607–1614. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.08.015>
60. Pertoldi C., Sonne C., Wiig Ø., Baagøe H.J., Loeschke V., Bechshøft T.Ø. East Greenland and Barents Sea polar bears (*Ursus maritimus*): adaptive variation between two populations using skull morphometrics as an indicator of environmental and genetic differences. Hereditas. 2012;149(3):99–107. <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.2012.02259.x>
61. Sonne C., Dyck M., Rigét F.F., Bech-Jensen J.E., Hyldstrup L., Letcher R.J. et al. Penile density and globally used chemicals in Canadian and Greenland polar bears. Environ. Res. 2015;137:287–291. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.12.026>
62. Andersen-Ranberg A. Metals and flukes in West Greenland ringed seals (*Pusa hispida*)—a histopathological, toxicological, parasitological and molecular study [M.Sc. thesis]. University of Copenhagen; 2014.
63. Sonne-Hansen C., Dietz R., Leifsson P.S., Hyldstrup L., Rigét F.F. Cadmium toxicity to ringed seals (*Phoca hispida*)—an epidemiological study of possible cadmium induced nephropathy and osteodystrophy in ringed seals (*Phoca hispida*) from Qaanaaq in Northwest Greenland. Sci. Total Environ. 2002;295(1–3):167–181. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00092-X)
64. Woshner V.M. Concentrations and interactions of selected elements in tissues of four marine mammal species harvested by Inuit hunters in arctic Alaska, with an intensive histologic assessment, emphasizing the beluga whale [Ph.D. Dissertation]. University of Illinois at Urbana—Champaign; 2000.
65. Woshner V.M., O'Hara T.M., Bratton G.R., Suydam R.S., Beasley V.R. Concentrations and interactions of selected essential and non-essential elements in bowhead and beluga whales of Arctic Alaska. J. Wildl. Dis. 2001;37(4):693–710. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-37.4.693>
66. Woshner V.M., Knott K., Wells R., Willetto C., Swor R., O'Hara T. Mercury and selenium in blood and epidermis of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) from Sarasota Bay, FL: interaction and relevance to life history and hematologic parameters. EcoHealth. 2008;5:360–370. <https://doi.org/10.1007/s10393-008-0164-2>
67. McKinney M.A., Iverson S.J., Fisk A.T., Sonne C., Rigét F.F., Letcher R.J. et al. Global change effects on the long-term feeding ecology and contaminant exposures of East Greenland polar bears. Glob. Change Biol. 2013;19(8):2360–2372. <https://doi.org/10.1111/gcb.12241>
68. Rigét F.F., Braune B., Bignert A., Wilson S., Aars J., Born E., et al. Temporal trends of Hg in Arctic biota, an update. Sci. Total Environ. 2011;409(18):3520–3526. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.002>
69. Woshner V.M., O'Hara T.M., Bratton G.R., Beasley V.R. Concentrations and interactions of selected essential and non-essential elements in ringed seals and polar bears of Arctic Alaska. J. Wildl. Dis. 2001;37(4):711–721. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-37.4.711>

70. Donaldson S.G., Van Oostdam J., Tikhonov C., Feeley M., Armstrong B., Ayotte P. et al. Environmental contaminants and human health in the Canadian Arctic. *Sci. Total Environ.* 2010;408(22):5165–5234. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.04.059>
71. Gebbink W.A., Sonne C., Dietz R., Kirkegaard M., Rigét F.F., Born E.W., Muir D.C.G., Letcher R.J. Tissue-specific congener composition of organohalogen and metabolite contaminants in East Greenland polar bears (*Ursus maritimus*). *Environ. Pollut.* 2008;152(3):621–629. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.07.001>
72. Lagueur J., Pereg D., Ayotte P., Dewailly E., Poirier G.G. Cytochrome P450 CYP1A1 enzyme activity and DNA adducts in placenta of women environmentally exposed to organochlorines. *Environ. Res.* 1999;80(4):369–382. <https://doi.org/10.1006/enrs.1998.3920>
73. Medehouenou T.C., Larochelle C., Dumas P., Dewailly E., Ayotte P. Determinants of AhR-mediated transcriptional activity induced by plasma extracts from Nunavik Inuit adults. *Chemosphere.* 2010;80(2):75–82. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.04.017>
74. Sandau C.D., Ayotte P., Dewailly E., Duffé J., Norstrom R.J. Pentachlorophenol and hydroxylated polychlorinated biphenyl metabolites in umbilical cord plasma of neonates from coastal populations in Québec. *Environ. Health Perspect.* 2002;110(4):411–417. <https://doi.org/10.1289/ehp.02110411>
75. Lind P.M., Bergman A., Olsson M., Orberg J. Bone mineral density in male Baltic grey seal (*Halichoerus grypus*). *Ambio.* 2003;32(6):385–388.
76. Lind P.M., Milnes M.R., Lundberg R., Bermudez D., Örborg J., Guillette L.J. Abnormal bone composition in female juvenile American alligators from a pesticide-polluted lake (Lake Apopka, Florida). *Environ Health Perspect.* 2004;112(3):359–362. <https://doi.org/10.1289/ehp.6524>
77. Côté S., Ayotte P., Dodin S., Blanchet C., Mulvad G., Petersen H.S., Gingras S., Dewailly É. Plasma organochlorine concentrations and bone ultrasound measurements: a cross-sectional study in peri- and postmenopausal Inuit women from Greenland. *Environ. Health.* 2006;5(1):33. <https://doi.org/10.1186/1476-069x-5-33>
78. Herlin M., Kalantari F., Stern N., Sand S., Larsson S., Viluksela M. et al. Quantitative characterization of changes in bone geometry, mineral density and bio-mechanical properties in two rat strains with different Ah-receptor structures after long-term exposure to 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin. *Toxicology.* 2010;29(1-3):1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2010.04.006>
79. Paunescu A.C., Dewailly E., Dodin S., Nieboer E., Ayotte P. Dioxin-like compounds and bone quality in Cree women of Eastern James Bay (Canada): a cross-sectional study. *Environ. Health.* 2013;12:54. <https://doi.org/10.1186/1476-069x-12-54>
80. Jenssen B.M. Endocrine-disrupting chemicals and climate change: a worst-case combination for Arctic marine mammals and seabirds? *Environ. Health Perspect.* 2006;114(1):76–80. <https://doi.org/10.1289/ehp.8057>
81. Dallaire R., Dewailly E., Ayotte P., Forget-Dubois N., Jacobson S.W., Jacobson J.L., Muckle G. Growth in Inuit children exposed to polychlorinated biphenyls and lead during fetal development and childhood. *Environ. Res.* 2014;134:17–23. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.06.023>
82. Dallaire R., Dewailly E., Ayotte P., Muckle G., Laliberte C., Bruneau S. Effects of prenatal exposure to organochlorines on thyroid hormone status in newborns from two remote coastal regions in Quebec, Canada. *Environ. Res.* 2008;108(3):387–392. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.08.004>
83. Gustavson L., Ciesielski T.M., Bytingsvik J., Styrisshave B., Hansen M., Lie E., Aars J., Jenssen B.M. Hydroxylated polychlorinated biphenyls decrease circulating steroids in female polar bears (*Ursus maritimus*). *Environ. Res.* 2015;138:191–201. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.02.011>
84. Ciesielski T.M., Hansen I.T., Bytingsvik J., Hansen M., Lie E., Aars J., Jenssen B.M., Styrisshave B. Relationships between POPs, biometrics and circulating steroids in male polar bears (*Ursus maritimus*) from Svalbard. *Environ. Pollut.* 2017;230:598–608. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.095>
85. Sonne C., Leifsson P.S., Dietz R., Born E.W., Letcher R.J., Hyldstrup L. et al. Xenoendocrine pollutants may reduce size of sexual organs in East Greenland polar bears (*Ursus maritimus*). *Environ. Sci. Technol.* 2006;40(18):5668–5674. <https://doi.org/10.1021/es060836n>
86. Desforges J.P.W., Sonne C., Levin M., Siebert U., De Guise S., Dietz R. Immunotoxic effects of environmental pollutants in marine mammals. *Environ. Int.* 2016;86:126–139. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.10.007>

87. Sonne C., Letcher R. J., Jenssen B. M., Desforjes J. P., Eulaers I., Andersen-Ranberg E., Dietz R. A veterinary perspective on One Health in the Arctic. *Acta Veterinaria Scandinavica*. 2017;59:84. <https://doi.org/10.1186/s13028-017-0353-5>
88. Vos J.G., Luster M.I. Immune alterations. In: Kimbrough R.D., Jensen A.D., eds. Halogenated biphenyls, terphenyls, naphthalenes, dibenzodioxins, and related products. Amsterdam: Elsevier; 1989, pp. 295–322. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-81029-8.50014-x>
89. Janeway C.A., Travers P., Walport M., Shlomchik M. Immune biology — the immune system in health and disease. 5th ed. New York: Garland Publishing, Taylor and Francis; 2001.
90. Tryphonas H. Immunotoxicity of Genaro polychlorinated-biphenyls—present status and future considerations. In: Esser C., Gleichmann E., Karger S., eds. Dioxins and the Immune System: Mechanisms and Consequences of Interference. Karger; 1994, pp. 149–162. <https://doi.org/10.1159/000424206>
91. Hertz-Picciotto I., Park H.Y., Dostal M., Kocan A., Trnovec T., Sram R. Prenatal exposures to persistent and non-persistent organic compounds and effects on immune system development // *Basic Clin. Pharmacol. Toxicol.* 2008;102(2):146–154. <https://doi.org/10.1111/j.1742-7843.2007.00190.x>
92. Klecha A.J., Barreiro Arcos M.L., Frick L., A.M., Cremaschi G. Immune-endocrine interactions in autoimmune thyroid diseases. *Neuroimmunomodulation*. 2008;15:68–75. <https://doi.org/10.1159/000135626>
93. Lie E., Larsen H.J.S., Larsen S., Johansen G.M., Derocher A.E., Lunn N.J., et al. Does high organochlorine (OC) exposure impair the resistance to infection in polar bears (*Ursus maritimus*)? Part I: effect of OCs on the humoral immunity. *J. Toxicol. Environ. Health A*. 2004;67(7):555–582. <https://doi.org/10.1080/15287390490425597>
94. Lie E., Larsen H.J.S., Larsen S., Johansen G.M., Derocher A.E., Lunn N.J., et al. Does high organochlorine (OC) exposure impair the resistance to infection in polar bears (*Ursus maritimus*)? Part II: possible effect of OCs on mitogen- and antigen-induced lymphocyte proliferation. *J. Toxicol. Environ. Health A*. 2005;68(6):457–484. <https://doi.org/10.1080/15287390590903685>
95. Routti H., Arukwe A., Jenssen B.M., Letcher R.J., Nyman M., Bäckman C., Gabrielsen G.W. Comparative endocrine disruptive effects of contaminants in ringed seals (*Phoca hispida*) from Svalbard and the Baltic Sea. *Comp. Biochem. Physiol. Toxicol. Pharmacol.* 2010;152(3):306–312. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2010.05.006>
96. Brown T.M., Ross P.S., Reimer K.J., Veldhoen N., Danger N.J., Fisk A.T., Helbing C.C.. PCB related effects thresholds as derived through gene transcript profiles in locally contaminated ringed seals (*Pusa hispida*). *Environ. Sci. Technol.* 2014;48(21):12952–12961. <https://doi.org/10.1021/es5032294>
97. Levin M., Gebhard E., Jasperse L., Desforjes J.P., Dietz R., Sonne C., et al. Immunomodulatory effects of exposure to polychlorinated biphenyls and perfluoroalkyl acids in East Greenland ringed seals (*Pusa hispida*). *Environ. Res.* 2016;151:244–250. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.07.013>
98. Frouin H., Loseto L.L., Stern G., Haulena M., Ross P.S. Mercury toxicity in beluga whale lymphocytes: limited effects of selenium protection. *Aquat. Toxicol.* 2012;109:185–193. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2011.09.021>
99. Weisglas-Kuperus N. Neurodevelopmental, immunological and endocrinological indices of perinatal human exposure to PCBs and dioxins. *Chemosphere*. 1998;37(9–12):1845–1853. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(98\)00250-1](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(98)00250-1)
100. Dewailly É., Ayotte P., Bruneau S., Laliberté C., Gingras S., Belles-Isles M., Roy R.. Susceptibility to infections and immune status in Inuit infants exposed to organochlorines. *Environ. Health Perspect.* 2000;108(3):205–211. <https://doi.org/10.2307/3454435>
101. Dallaire F., Dewailly É., Vézina C., Muckle G., Weber J.-P., Bruneau S., Ayotte P.m Effect of prenatal exposure to polychlorinated biphenyls on incidence of acute respiratory infections in preschool Inuit children. *Environ. Health Perspect.* 2006;114(8):1301–1305. <https://doi.org/10.1289/ehp.8683>
102. Parkinson A.J. The Arctic human health initiative: a legacy of the international polar year 2007–2009. *Int. J. Circumpolar Health*. 2013;72:10. <https://doi.org/10.3402/ijch.v72i0.21655>
103. Grandjean P., Landrigan P.J. Neurobehavioural effects of developmental toxicity The Lancet Neurology, 2014;13:330–338. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(13\)70278-3](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(13)70278-3)

104. Greaves A.K., Letcher R.J., Sonne C., Dietz R., Born E.W. Tissue-specific concentrations and patterns of perfluoroalkyl carboxylates and sulfonates in East Greenland polar bears. *Environ. Sci. Technol.* 2012;46(21):11575–11583. <https://doi.org/10.1021/es303400f>
105. Krey A., Kwan M., Chan H.M. Mercury speciation in brain tissue of polar bears (*Ursus maritimus*) from the Canadian Arctic. *Environ. Res.* 2012;114:24–30. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.01.006>
106. Greaves A.K., Letcher R.J., Sonne C., Dietz R. Brain region distribution and patterns of bioaccumulative perfluoroalkyl carboxylates and sulfonates in East Greenland polar bears (*Ursus maritimus*). *Environ. Toxicol. Chem.* 2013;32(3):713–722. <https://doi.org/10.1002/etc.2107>
107. Pedersen K.E., Basu N., Letcher R.J., Greaves A.K., Sonne C., Dietz R., Styrisshave B. Brain region-specific perfluoroalkylated sulfonate (PFSA) and carboxylic acid (PFCA) accumulation and neurochemical biomarker responses in East Greenland polar bears (*Ursus maritimus*). *Environ. Res.* 2015;138:22–31. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.01.015>
108. Pedersen K.E., Basu N., Letcher R.J., Sonne C., Dietz R., Styrisshave B. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) —new endocrine disruptors in polar bears (*Ursus maritimus*). *Environ. Int.* 2016;138:22–31. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.01.015>
109. Fonnum F., Mariussen E. Mechanisms involved in the neurotoxic effects of environmental toxicants such as polychlorinated biphenyls and brominated flame retardants. *J. Neurochem.* 2009;111(6):1327–1347. <https://doi.org/10.1111/j.1471-4159.2009.06427.x>
110. Mariussen E. Neurotoxic effects of perfluoroalkylated compounds: mechanisms of action and environmental relevance. *Arch. Toxicol.* 2012;86:1349–1367. <https://doi.org/10.1007/s00204-012-0822-6>
111. Polder A., Gabrielsen G.W., Odland J.O., Savinova T.N., Tkachev A., Løken K.B., Skaare J.U. Spatial and temporal changes of chlorinated pesticides, PCBs, dioxins (PCDDs/PCDFs) and brominated flame retardants in human breast milk from northern Russia. *Sci. Total Environ.* 2008;391(1):41–54. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.045>
112. Bollati V., Baccarelli A. Environmental epigenetics. *Heredity.* 2010;105:105–112. <https://doi.org/10.1038/hdy.2010.2>
113. Crews D. Epigenetic modifications of brain and behavior: theory and practice. *Horm. Behav.* 2011;59(3):393–398. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2010.07.001>
114. Basu N., Scheuhammer A.M., Sonne C., Letcher R.J., Born E.W., Dietz R. Is mercury in the environment of neurotoxic concern to polar bears? *Environ. Toxicol. Chem.* 2009;28(1):133–140. <https://doi.org/10.1897/08-251.1>
115. Pilsner J.R., Lazarus A.L., Nam D., Letcher R.J., Sonne C., Dietz R., Basu N. Mercury-associated DNA hypomethylation in polar bear brains via the Luminometric Methylation Assay (LUMA): a sensitive method to study epigenetics in wildlife. *Mol. Ecol.* 2010;19(2):307–314. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2009.04452.x>
116. Siegel G.J., Albers R.W., Brady S.T., Price D.L. Basic neurochemistry. Molecular, cellular and medical aspects. 7th ed. — Burlington: Elsevier Academic; 2006.
117. Ahmed E.I., Zehr J.L., Schulz K.M., Lorenz B.H., Don Carlos L.L., Sisk C.L. Pubertal hormones modulate the addition of new cells to sexually dimorphic brain regions. *Nat. Neurosci.* 2008;11:995–997. <https://doi.org/10.1038/nn.2178>
118. Zoeller R.T., Crofton K.M. Mode of action: developmental thyroid hormone insufficiency—neurological abnormalities resulting from exposure to propylthiouracil. *Crit. Rev. Toxicol.* 2005;35(8–9):771–781. <https://doi.org/10.1080/10408440591007313>
119. Bytingsvik J., Simon E., Leonards P.E.G., Lamoree M., Lie E., Aars J., et al. Transthyretin-binding activity of contaminants in blood from polar bear (*Ursus maritimus*) cubs. *Environ. Sci. Technol.* 2013;47(9):4778–4786. <https://doi.org/10.1021/es305160v>
120. Simon E., van Velzen M., Brandsma S.H., Lie E., Løken K., de Boer J., et al. Effect-directed analysis to explore the polar bear exposome: identification of thyroid hormone disrupting compounds in plasma. *Environ. Sci. Technol.* 2013;47(15):8902–8912. <https://doi.org/10.1021/es401696u>
121. McKinney M.A., Pedro S., Dietz R., Sonne C., Fisk A.T., Roy D., Jenssen B.M., Letcher R.J. A review of ecological impacts of global climate change on persistent organic pollutant and mercury pathways and exposures in arctic marine ecosystems. *Curr. Zool.* 2015;61(4):617–628. <https://doi.org/10.1093/czoolo/61.4.617>

122. Harvell C.D., Mitchell C.E., Ward J.R., Altizer S., Dobson A.P., Ostfeld R.S., Samuel M.D. Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science*. 2002;296(5576):2158–2162. <https://doi.org/10.1126/science.1063699>
123. Burek K.A., Gulland F.M.D., O'Hara T.M. Effects of climate change on Arctic marine mammal health. *Ecol. Appl.* 2008;18(sp2):126–134. <https://doi.org/10.1890/06-0553.1>
124. Dudley J.P., Hoberg E.P., Jenkins E.J., Parkinson A.J. Climate change in the North American Arctic: a One Health perspective. *EcoHealth*. 2015;12:713–725. <https://doi.org/10.1007/s10393-015-1036-1>
125. Bradley M., Kutz S.J., Jenkins E., O'Hara T.M. The potential impact of climate change on infectious diseases of Arctic fauna. *Int. J. Circumpolar Health*. 2005;64(5):468–477. <https://doi.org/10.3402/ijch.v64i5.18028>
126. Greer A., Ng V., Fisman D. Climate change and infectious diseases in North America: the road ahead. *CMAJ*. 2008;178(6):715–722. <https://doi.org/10.1503/cmaj.081325>
127. Rand A.A., Mabury S.A. Is there a human health risk associated with indirect exposure to perfluoroalkyl carboxylates? *Toxicology*. 2017;375:28–36. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2016.11.011>
128. Durner G.M., Douglas D.C., Nielson R.M., Amstrup S.C., McDonald T.L., Stirling I. et al. Predicting 21st-century polar bear habitat distribution from global climate models. *Ecol. Monogr.* 2009;79(1):25–58. <https://doi.org/10.1890/07-2089.1>
129. Molnár P.K., Derocher A.E., Klanjscek T., Lewis M.A. Predicting climate change impacts on polar bear litter size. *Nat. Commun.* 2011;2:186. <https://doi.org/10.1038/ncomms1183>
130. Derocher A.E., Aars J., Amstrup S.C., Cutting A., Lunn N.J., Molnár P.K. et al. Rapid ecosystem change and polar bear conservation. *Conserv. Lett.* 2013;6(5):368–375. <https://doi.org/10.1111/conl.12009>
131. Hamilton S.G., de la Guardia L.C., Derocher A.E., Sahanatien V., Tremblay B., Huard D. Projected polar bear sea ice habitat in the Canadian Arctic Archipelago. *PLoS ONE* 2014;9(11):e113746. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113746>
132. Amstrup S.C., Marcot B.G., Douglas D.C. A Bayesian network modeling approach to forecasting the 21st century worldwide status of polar bears. In: DeWeaver E.T., Bitz C.M., Tremblay L.-B., (eds.). *Arctic sea ice decline: observations, projections, mechanisms, and implications*, vol. 180. Washington, DC: American Geophysical Union; 2018, p. 213–268. <https://doi.org/10.1029/180gm14>
133. Olsen G.H., Mauritzen M., Derocher A.E., Sørmo E.G., Skaare J.U., Wiig O., Jenssen B.M. Space-use strategy is an important determinant of PCB concentrations in female polar bears in the Barents Sea. *Environ. Sci. Technol.* 2003;37(21):4919–4924. <https://doi.org/10.1021/es034380a>
134. van Beest F.M., Aars J., Routti H., Lie E., Andersen M., Pavlova V., Sonne C., Nabe-Nielsen J., Dietz R. Spatiotemporal variation in home range size of female polar bears and correlations with individual contaminant load. *Polar. Biol.* 2016;39(8):1479–1489. <https://doi.org/10.1007/s00300-015-1876-8>
135. McKinney M.A., Peacock E., Letcher R.J. Sea ice-associated diet change increases the levels of chlorinated and brominated contaminants in polar bears. *Environ. Sci. Technol.* 2009;43(12):4334–4339. <https://doi.org/10.1021/es900471g>
136. Gormezano L.J., Rockwell R.F. What to eat now? Shifts in polar bear diet during the ice-free season in western Hudson Bay. *Ecol. Evol.* 2013;3(10):3509–3523. <https://doi.org/10.1002/ece3.740>
137. Iles D.T., Petersen S.L., Gormezano L.J., Koons D.N., Rockwell R.F. Terrestrial predation by polar bears: not just a wild goose chase. *Polar Biol.* 2013;36:1373–1379. <https://doi.org/10.1007/s00300-013-1341-5>
138. Iverson S.A., Gilchrist H.G., Smith P.A., Gaston A.J., Forbes M.R. Longer ice-free seasons increase the risk of nest depredation by polar bears for colonial breeding birds in the Canadian Arctic. *Proc. R. Soc. B.* 2014;281(1779):20133128. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.3128>
139. Valdimarsson H., Astthorsson O.S., Palsson J. Hydrographic variability in Icelandic waters during recent decades and related changes in distribution of some fish species. *ICES J. Mar. Sci.* 2012;69(5):816–825. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsso27>
140. MacKenzie B.R., Payne M.R., Boje J., Hoyer J.L., Siegstad H. A cascade of warming impacts brings bluefin tuna to Greenland waters. *Glob. Chang. Biol.* 2014;20(8):2484–2491. <https://doi.org/10.1111/gcb.12597>
141. Macdonald R.W., Harner T., Fyfe J. Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data. *Sci. Total. Environ.* 2005;342(1-3):5–86. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.12.059>

142. Carrie J., Wang F., Sanei H., Macdonald R.W., Outridge P.M., Stern G.A. Increasing contaminant burdens in an arctic fish, burbot (*Lota lota*), in a warming climate. *Environ. Sci. Technol.* 2010;44(1):316–322. <https://doi.org/10.1021/es902582y>
143. Чусов А.Н., Шилин М.Б., Абрамов В.М., Жигульский В.А. Управление природными рисками. СПб.: Политех-Пресс; 2024. [Chusov A.N., Shilin M.B., Abramov V.M., Zhigul'skii V.A. Natural risk management. St. Petersburg: Polytech-Press; 2024. (In Russ.).]
144. Parkinson A.J., Butler J.C. Potential impacts of climate change on infectious diseases in the Arctic. *Int. J. Circumpolar Health.* 2005;64(5):478–486. <https://doi.org/10.3402/ijch.v64i5.18029>
145. Tryland M., Nesbakken T., Robertson L., Grahek-Ogden D., Lunestad B.T. Human pathogens in marine mammal meat — a northern perspective. *Zoonoses Publ. Health.* 2013;61(6):377–394. <https://doi.org/10.1111/zph.12080>
146. Wilkinson J. L., Hooda P.S., Barker J., Barton S., Swinden J. Ecotoxic pharmaceuticals, personal care products, and other emerging contaminants: a review of environmental, receptor-mediated, developmental, and epigenetic toxicity with discussion of proposed toxicity to humans. *Crit. Review Environ. Sci Technol.* 2016;46(4):336–381. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1096876>
147. Jenssen B.M. Marine pollution: the future challenge is to link human and wildlife studies. *Environ. Health Perspect.* 2003;111(4):A198–199. <https://doi.org/10.1289/ehp.111-a198>
148. Parkinson A.J. The Arctic human health initiative: a legacy of the international polar year 2007–2009. *Int. J. Circumpolar Health.* 2013;72(1):10. <https://doi.org/10.3402/ijch.v72i0.21655>
149. Weihe P., Debes F., Halling J., Petersen M.S., Muckle G., Odland J.O., et al. Health effects associated with measured levels of contaminants in the Arctic. *Int. J. Circumpolar Health.* 2016;75(1):33805. <https://doi.org/10.3402/ijch.v75.33805>
150. Карлин Л.Н., Абрамов В.М., Гогоберидзе Г.Г., Леднова Ю.А. Анализ социально-экономической ситуации в арктических приморских субъектах Российской Федерации на основе индикаторной оценки морского потенциала. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2013;(30):181–188. [Karlin L.N., Abramov V.M., Gogoberidze G.G., Lednova Yu.A. Analysis of the socio-economic situation in the Arctic coastal regions of the Russian Federation on the basis of indicator assessment of the marine economic potential. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University.* 2013;(30):181–188. (In Russ.).]
151. Abramov V.M., Sokolov A.G., Baikov E.A., Lukyanov S.V., Tatarenko Yu.A., Vekshina T.V., Isaev D.I., Trunin S.V. Geo-information Tools Develop for Integrated Coastal Zone Management in Arctic and Subarctic. In: *Proceedings of the 34th International Business Information Management Association Conference (IBIMA), Madrid, Spain, 13–14 November, 2019*, pp. 10763–10771.
152. Shilin M.B., Abramov V.M., Andreeva E.S., Andreev S.S., Yaily E.A. Innovative technologies for geo-ecological support while artificial coastal territories development. In: *19th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2019: Conference proceedings. Vol. 19.* Sophia; 2019, pp. 399–406. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/5.1/S20.050>

Сведения об авторах

Шилин Михаил Борисович — доктор географических наук, профессор Института информационных систем и геотехнологий Российского государственного гидрометеорологического университета (ФГБОУ ВО РГТУ).

Россия, 192007, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79
E-mail: shilin@rshu.ru

Абрамова Александра Леонидовна — аспирант, Российский государственный гидрометеорологический университет (ФГБОУ ВО РГТУ)

Россия, 192007, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79
E-mail: alexandria567@mail.ru

Information about the authors

Mikhail B. Shilin — Dr. Sci. (Geography), Prof., Institute of Information Systems and Geotechnologies, Russian State Hydrometeorological University Russia, 192007, Saint Petersburg, Voronezhskaya str., 79
E-mail: shilin@rshu.ru

Alexandra L. Abramova — Postgraduate Researcher, Russian State Hydrometeorological University Russia, 192007, Saint Petersburg, Voronezhskaya str., 79
E-mail: alexandria567@mail.ru

Абрамов Валерий Михайлович — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент Института «Морская академия» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»)
Россия, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
E-mail: val.aramov@mail.ru

Завьялова Анна Никитична — доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры пропедевтики детских болезней с курсом общего ухода за детьми ФГБОУ ВО СПбГПМУ
194100, Россия, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2
E-mail: anzavjalova@mail.ru

Valery M. Abramov — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Marine Academy Institute of the Admiral S.O. Makarov State University of the Marine and River Fleet (Admiral S.O. Makarov GUMRF)
198035, Russia, Saint Petersburg, Dvinskaya str., 5/7
E-mail: val.aramov@mail.ru

Anna N. Zavyalova — Dr. Sci. (Med.), Assoc. Prof., Professor of the Department of Propaedeutics of Childhood Diseases with a Course in General Child Care, St. Petersburg State Medical University
Russia, 194100, Saint Petersburg, Litovskaya str., 2
E-mail: anzavjalova@mail.ru

Вклад авторов

Шилин Михаил Борисович — разработка общей концепции статьи, работа с источниками, подготовка экологической компоненты, обобщение материала.
Абрамова Александра Леонидовна — работа с источниками, подготовка рукописи к изданию.
Абрамов Валерий Михайлович — работа с источниками, подготовка рукописи к изданию.
Завьялова Анна Никитична — разработка общей концепции статьи, работа с источниками, подготовка медико-токсикологической компоненты, обобщение материала.

Author contribution statement

Mikhail B. Shilin — general concept development, literature review, preparation of the ecological component, generalization of the material.
Alexandra L. Abramova — literature review, preparing the manuscript for publication.
Valery M. Abramov — literature review, preparing the manuscript for publication.
Anna N. Zavyalova — general concept development, literature review, preparation of the medical and toxicological component, generalization of the material.