

ВОЗМОЖНО ЛИ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОЗЕРНОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ?

Т. И. Моисеенко

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН
(Москва, Российская Федерация)

Д. Б. Денисов

Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра
РАН (Апатиты, Мурманская область, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 8 мая 2019 г.

Интенсивное освоение минерально-сырьевых ресурсов арктических регионов привело к антропогенной нагрузке на природные системы. На примере многолетнего антропогенного загрязнения субарктического озера Имандра стоками горнопромышленного комплекса рассматривается динамика изменений показателей экосистемы за более чем 70-летний период, дается анализ вновь образованной модификации озера, значительно отличающейся от природного состояния. Проанализировано состояние химического состава вод и структурных компонентов экосистемы (фито-, зоопланктона, зообентоса и ихтиофауны) в допромышленный период в природно-фоновом состоянии, в период промышленного освоения месторождений на берегах озера и интенсивного загрязнения, в период значительного снижения антропогенного воздействия и в современном состоянии. Выявлены основные закономерности изменчивости водной экосистемы в условиях антропогенных нагрузок, которые привели к деградации сообществ и массовым заболеваниям рыб. С точки зрения экологической теории дается объяснение траектории модификаций и невозможности возврата экосистемы озера к природному состоянию. Показано, что климатический фактор наряду с поступлением биогенных элементов привели к эвтрофированию водоема и адаптации сообществ к новым условиям, включая появление интродуцентов, повышение роли теплолюбивых и эврибионтных форм в сообществах, утилизацию биогенных элементов в биогеохимических циклах, что соответствует более устойчивой вновь образованной модификации экосистемы.

Ключевые слова: арктический регион, озеро Имандра, многолетнее загрязнение, горнопромышленный комплекс, модификации экосистемы, восстановление экосистемы.

Введение

Рост народонаселения на планете обуславливает необходимость вовлечения минерально-сырьевых ресурсов арктических регионов, поэтому интерес к изучению последствий человеческой деятельности для северных экосистем возрастает во многих странах. Природа Арктики чрезвычайно уязвима к антропогенному вмешательству вследствие низкого уровня масс- и энергообмена в экосистемах холодных широт. Во многих регионах, где осваиваются минерально-сырьевые ресурсы, наблюдается за-

грязнение озер и рек [1]. Ввиду высокой значимости пресных вод в жизнеобеспечении питьевой водой и рыбной продукцией населения арктических регионов, включая коренные народы, особую актуальность приобретает изучение не только последствий загрязнения, но и возможности восстановления водных экосистем после их сильного загрязнения.

Среди всех арктических регионов мира Кольский Север России (Мурманская область) является наиболее индустриально развитым. На берегах его самого крупного озера Имандра (площадь озера — 880 км², площадь водосбора — 12,3 тыс. км²) сосредоточены горно-металлургическая, обогатительная и хими-

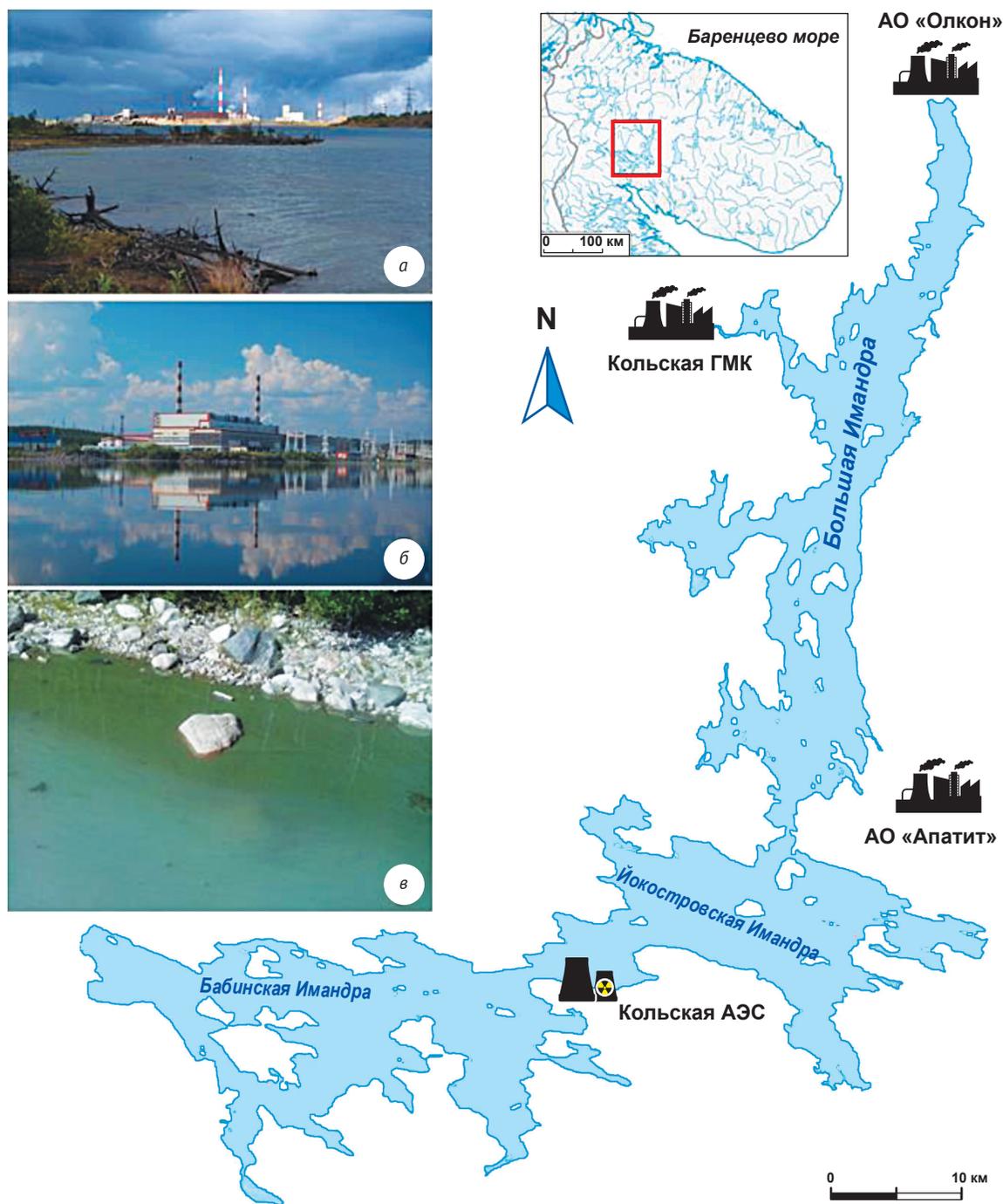


Рис. 1. Карта-схема расположения озера Имандра и основных источников загрязнения: а – Мончегорская площадка Кольской ГМК, б – Кольская АЭС, в – цианопрокарриотическое «цветение» воды
 Fig. 1. The location map of Lake Imandra and main emitters (sources of pollution): а – the Monchegorsk site of the Kolsky MC (mining complex), б – the Kolskaya NPP, в – cyano-prokaryotic “bloom” of water

ческая индустрия, атомная энергетика, построены города и поселки, там проживают свыше 300 тыс. человек, что составляет почти 35% общего числа жителей Мурманской области (рис. 1). Географически озеро Имандра лежит за полярным кругом на водоразделе между собственно полуостровом и материковой частью Скандинавского щита. Индустриальное освоение месторождений на берегах озера

началось в 1930—1940-х годах. Много лет озеро загрязнялось различными видами сточных вод, среди которых наибольшую опасность представляли токсичные стоки медно-никелевого и апатит-нефелинового производств. Одновременно озеро используется как источник технического и питьевого водоснабжения, в интересах рекреации и туризма, рыбного промысла.

Первая информация о качестве вод и состоянии элементов экосистемы водоема была получена в период комплексных экспедиций А. Е. Ферсмана в конце 1920-х годов на Кольский Север. В период максимального загрязнения (с конца 1970-х годов) выполнены исследования, которые дали понимание закономерностей антропогенных преобразований водных экосистем под воздействием поступления различных сточных вод, показали высокую опасность последствий загрязнения арктических вод токсичными веществами [2; 3]. В последние десятилетия вследствие сокращения объемов производства антропогенная нагрузка на озеро снизилась, особенно со стороны медно-никелевой промышленности. Также была проведена модернизация технологий и оборудования [4]. В период снижения и стабилизации нагрузок были продолжены исследования озера [5—10]. Следует отметить, что по данным [11] за последние два десятилетия в Северо-Западном регионе отмечается потепление. И хотя непрерывный ежегодный мониторинг не проводился, эти работы позволили сформировать представления об антропогенных модификациях экосистемы в период сильного антропогенного загрязнения и после него, ответить на наиболее значимый в практическом плане вопрос: возможно ли полное восстановление арктической экосистемы и возврат к природному состоянию после длительного загрязнения?

Основные периоды модификаций экосистемы

В процессе анализа результатов исследования в различные годы были выделены четыре основных периода состояния экосистемы наиболее загрязняемого плеса озера — Большой Имандры: природные условия, период максимального загрязнения и деградации экосистемы, снижение загрязнения, современное состояние экосистемы. Поскольку нет возможности поместить в статью все показатели, внимание в ней сфокусировано на изменениях видового состава (табл. 1) и показателях состояния сообществ, которые наиболее информативно отражают их трансформации (табл. 2).

Природные условия формирования водных экосистем арктического бассейна (высокий вклад атмосферных выпадений, тонкий почвенно-растительный покров, низкие температуры и соответственно замедленные процессы химического выветривания и круговорота элементов) формируют ультрапресные и олиготрофные водоемы, типичным примером которых являлось озеро Имандра. Для этого водоема было характерно высокое насыщение вод кислородом (до дна) благодаря впадению горных незамерзающих рек. Видовое разнообразие было представлено преимущественно арктическими холодноводными видами, основная часть рыбного населения — видами пресноводно-арктического комплекса: сигом, ряпушкой, гольцом и кумжей.

Период максимального загрязнения. Загрязнение вод, которое началось с сороковых годов

прошлого столетия, достигло максимума к 1970—1980-м годам. Влияние сточных вод металлургического предприятия привело к увеличению содержания в водоеме тяжелых металлов, особенно никеля и меди. Антропогенное поступление азота и фосфора с хозяйственно-бытовыми стоками в озеро привело к увеличению как общего содержания этих элементов, так и их минеральных форм (по сравнению с природным содержанием), особенно на участках — приемниках промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод. По содержаниям фосфора озеро стало соответствовать мезотрофному состоянию, а небольшие заливы — эвтрофному. Видовой состав фито- и зоопланктона изменился (см. табл. 1), увеличился диапазон колебаний максимальных и минимальных значений численности и биомассы сообществ (см. табл. 2). В составе зоопланктона коловратки как наиболее устойчивые к влиянию сточных вод промышленных производств занимали доминирующее положение.

В этот период формировались высокопродуктивные сообщества зообентоса, представленные одним-двумя доминирующими видами (преимущественно хириномидами и олигохетами) как следствие поступления хозяйственно-бытовых стоков вместе с промышленными. Они выполняют функции своеобразных ловушек с токсичными условиями водной среды, в которые мигрируют рыбы, привлекаемые высокими биомассами зообентоса. В рыбном населении значительно сократилась численность гольцов, кумжи и сигов, что связано с их чувствительностью к загрязнению вод. В этот период промысловый лов рыбы в плесе Большая Имандра был прекращен.

Массовые заболевания рыб регистрировались в 1970—1980-х годах: отеки; эксудаты; кровоизлияния; изменения в стенках кровеносных сосудов; белково-жировая (токсическая) дистрофия печени, ведущая к атрофии органа; соединительно-тканые разрастания; изменения эпителия и др. (табл. 2, рис. 2). Наряду с общими патологиями у рыб появлялись специфические заболевания, характерные для каждого из районов: в зоне влияния медно-никелевых стоков — нефрокальцитоз, в зоне стоков апатито-нефелинового производства — миопатия и нефрокальцитоз.

В мировой науке при оценке состояния качества вод и экосистем широкое развитие получила концепция «здоровья» экосистемы. Для этих целей используются показатели физиологического состояния организмов животных, структуры популяций и сообществ [12]. Исходя из симптомов заболеваемости рыб как индикаторов состояния «здоровья» экосистемы и качества вод, можно сделать заключение о крайне неудовлетворительном состоянии экосистемы плеса Большая Имандра в указанный период.

Периоды снижения загрязнения. В ответ на снижение антропогенной нагрузки, которая наблюдалась с начала 1990-х годов, в 2000-х годах обозначилась тенденция к улучшению качества вод

Таблица 1. Доминирующие таксоны гидробионтов озера Имандра (плес Большая Имандра) в различные периоды исследований (1 — природные условия, 2 — период максимального загрязнения и деградации экосистемы, 3 — снижение загрязнения, 4 — стабилизации антропогенных нагрузок)

	1	2	3	4
Фитопланктон	Cyclotella rossii, Dinobryon spp., Pantocsekiella rossii, Cyclotella radiosa; C. ocellata, Desmideales	Aulacoseira islandica, Tabellaria fenestrata, T.flocullosa, Rhizosolenia eriensis, Cyclotella ssp.	Aulacoseira islandica, Diatoma tenuis, Asterionella formosa; Fragilaria crotonensis, Microcystis aeruginosa	Aulacoseira islandica, Stephanodiscus minutulus, S. alpinus, Dolichospermum lemmermannii
Зоопланктон	Cyclops spp., Eudiaptomus gracilis, Daphnia longiremis, Bosmina longirostris, Polyphemus pediculus	Notholca sp., Asplanchna sp., Keratella cochlearis, Synchaeta sp., Bosmina sp., Mesocyclops leuckarti	Asplanchna priodonta, Keratella cochlearis, Kellicottia longispina, Bosmina obtusirostris	Keratella cochlearis, Polyarthra vulgaris, Brachionus calyciflorus, Bosmina obtusirostris, Cyclops sp.
Зообентос	Mysis relicta, Monoporeia affinis, Euglesa sp., Tubifex tubifex, Chironomus sp., Sergentia coracina, Procladius (Holotanypus) sp. Paratanytarsus sp.	Chironomus sp., Procladius (Holotanypus) sp., Tubifex tubifex	Procladius (Holotanypus) sp., Stictochironomus spp., Tanytassus spp, Tubifex tubifex	Monoporeia affinis, Euglesa sp, Tubifex tubifex, Chironomus sp., Glyptotendipes sp., Sergentia coracina, Procladius (Holotanypus) sp., Paratanytarsus sp.
Ихтиофауна	Salmo trutta, Coregonus lavaretus, C. albula, Salmo salar, Salvelinus alpinus, Thymalus thymallus	Coregonus lavaretus, C.albula, Perca fluviatilis, Osmerus eperlanus, Salvelinus alpinus	Coregonus lavaretus, C.albula, Perca fluviatilis, Osmerus eperlanus, Salvelinus alpinus	Osmerus eperlanus, Coregonus lavaretus, C. albula, Perca fluviatilis, Gymnocephalus cernua

и состояния экосистемы [3; 5]. Наблюдалась реколонизация озера некоторыми обитателями арктических вод, что подтверждается вторичной сменой доминирующих комплексов (см. табл. 1). Происходило повышение индивидуальной массы организмов, увеличился индекс биоразнообразия планктонных сообществ. Накопленные биогенные элементы в этот период были вовлечены в биологических круговорот в экосистеме, о чем свидетельствует превышение общих концентраций фосфора над минеральными.

Снижение концентраций биодоступных форм биогенных элементов и содержания кремния — следствие их утилизации диатомовыми водорослями, которые в период реколонизации занимают доминирующее положение, но при значительно более высокой численности по сравнению с природной. Увеличилось число крупных форм и хищных организмов в структуре зоопланктона.

Бентосные сообщества более инертны к восстановлению, их биоразнообразие по-прежнему низко

Таблица 2. Основные индикаторы качества вод и состояния экосистемы озера Имандра (плес Большая Имандра) в различные периоды

Показатель	Доиндустриальный период (до 1940-х годов)	Интенсивное загрязнение и деградация (1980—1990-е годы)	Снижение загрязнения (1995—2005 гг.)	Стабилизация антропогенных нагрузок (2010—2018 гг.)
$P_{\text{общ}}$, мкгP/л	6	70 (8—720)	30 (6—630)	26 (15—129)
PO_4 , мкг/л	1 (0—8)	21 (9—182)	3 (0—253)	6 (3—66)
$P_{\text{общ}}/PO_4$	6/1	70/21	30/3	26/6
$N_{\text{общ}}$, мкгN/л	1—5	436 (95—4010)	242 (106—2278)	203 (135—726)
NO_3 , мкг/л	1 (0—3)	102 (26—1942)	63 (4—164)	7,5 (0—323)
$N_{\text{общ}}/NO_3$	10/3	436/102	242/19	203/7,5
Si, мг/л	(0,3—0,6)	1,1 (0,1—3,7)	0,4	0,6 (0,1—1,3)
Chl «а», мг/м ³	0,3	3,8 (1,6—8,4)	3,5 (1,9—9,3)	3,4 (1,6—6,4)
Токсичная нагрузка ($\Sigma C_i/PДК_i$) *	—	25,1 (6,3—49,7)	6,7 (5,7—14,2)	2,1 (0—2,7)
Фитопланктон				
Биомасса, г/м ³	0,1	3,6 (1,6—4,6)	3,4 (0,2—8,4)	3,8 (0,2—19,9)
Численность, экз. 10 ⁶ /л	0,1	3,8 (0,6—7,2)	3,2 (0,3—10,4)	4,4 (1,5—22,9)
H' (индекс Шеннона), бит/экз.	3,2	2,5 (1,8—2,7)	3,1 (1,3—2,9)	2,8 (1,2—3,4)
Зоопланктон				
Биомасса, г/м ³	0,3	1,7 (0,6—3,1)	1,2 (0,2—2,6)	0,8 (0,7—2,1)
Численность, экз. 10 ³ /м ³	15	271 (59—440)	107 (10—952)	445 (301—509)
H' (индекс Шеннона), бит/экз.	2,8	1,9 (1,7—3,1)	2,5 (1,7—2,6)	2,0 (1,6—2,1)
Макрозообентос				
Биомасса, г/м ²	0,3	49 (0,3—220)	12,9 (6,2—19,5)	23,8 (4,1—52,3)
Численность, экз. 10 ³ /м ²	0,5	62 (нет данных)	6,2 (0,8—11,6)	4,8 (0,9—11,5)
H' (индекс Шеннона), бит/экз.	3,5	1,66 (нет данных)	1,1 (1,0—1,2)	1,2 (0,7—2,5)
Заболываемость рыб				
Нефроальцитоз, %		48 (14—52)	0—8	0
Липоидная дегенерация печени, %		89 (78—89)	65 (0—14)	(0—9)
Рыбная часть сообщества	Гольцово-сиговый водоем с присутствием семги и кумжи	Снижение численности сига, гольца и кумжи	Сигово-корюшковый водоем с присутствием гольца	Корюшково-сиговый водоем, высокая численность окуня, единичные экземпляры гольца

* Токсичная нагрузка рассчитана как сумма превышений тяжелых металлов по отношению к их лимитирующим значениям ПДК.

Примечание. Приведены наиболее встречаемые значения в указанные периоды. Таблица составлена по данным [2; 3; 5—10].



Рис. 2. Патологии внутренних органов сига озера Имандра в период загрязнения: а – соединительно-тканые перетяжки гонад, б – нефрокальцитоз, в – ерошение чешуи, з, д – нормальное состояние внутренних органов. Фото И. М. Королевой
 Fig. 2. Pathology of the whitefish viscera in Lake Imandra during the pollution period: а – connective-woven constriction of the gonads, б – nephrocalcinosis, в – bristling-up of scales, з, д – the normal state of viscera. Photo by I. M. Koroleva

(за исключением отдельных участков). Накопленные в донных отложениях тяжелые металлы могут оказывать угнетающее воздействие на донные организмы в местах загрязнения. Однако на участках с хорошим кислородным режимом обитатели придонных слоев, такие как боноплав *Monoporeia affinis*, получают преимущества для развития в условиях снижения токсичной нагрузки и благоприятных для них кормовых и кислородных условиях [3]. Исходя из симптомов заболеваемости рыб, можно сделать заключение об улучшении состояния «здоровья» экосистемы плеса Большая Имандра в период 2000-х годов.

В современный период (после 2010 г.) сформировалась новая модификация экосистемы. На фоне снижения содержания токсичных тяжелых металлов сохраняется высокая концентрация биогенных веществ, что привело к формированию сообществ фитопланктона мезотрофного типа. В сложившихся условиях возросло число аномально высоких количественных показателей фитопланктона, проявляющихся в течение сезона. В эвтрофируемых участках акватории регулярно стало происходить массовое развитие цианопрокариот (*Dolichospermum lammermannii*), причиной чего может быть появление на фоне высоких концентраций биогенных элементов нового глобального фактора — потепления климата Арктики [11]. Биомасса и численность фитопланктона возрастают, в зоопланктонном сообществе увеличивается численность организмов, что свидетельствует о возрастании доли мелких форм зоопланктона. Биомасса бентоса на отдельных участках достигает очень высоких значений — до 52 г/м².

Из приведенных данных можно заключить о хорошей и более равномерно распределенной кормовой

базе для рыбной части сообществ по сравнению с периодом загрязнения. Остановимся более детально на состоянии рыбного населения. Заболевание рыб практически не встречаются, их симптомы слабо выражены, что свидетельствует об улучшении «здоровья» экосистемы. По численности значимую часть в уловах занимает корюшка, возрастает и численность окуня. Несмотря на снижение токсической нагрузки, прогрессирует сокращение доли лососевых и сиговых рыб на фоне увеличения численности и активного расширения ареала европейской корюшки. В настоящее время она распространяется в придаточные водные системы: северную часть бассейна (река Куреньга — озеро Пермусозеро) и систему реки Белая (озеро Большой Вудъявр). Арктический голец встречается редко в единичных экземплярах [8]. Наряду с влиянием абиотических условий, а именно повышения содержания биогенных элементов на фоне снижения токсичной нагрузки, возможного потепления климата и эвтрофирования водоема, возможно влияние браконьерского лова, который интенсифицировался ввиду возрастания численности рыб, в частности сигов. Последние согласно [6] характеризуются более интенсивным ростом и достигают значительно крупных размеров по сравнению с периодом 1970—1980-х годов в каждой возрастной группе. Мы не располагаем данными о влиянии браконьерского лова на структуру ихтиофауны, его возможное влияние могло отразиться на численности ценных крупных особей лососевых и сиговых рыб. Однако сложно утверждать, что этот фактор мог существенно повлиять на изменения, произошедшие в рыбной части сообществ.

Таким образом, модификации экосистемы продолжилась, и характеристики озера Имандра в по-

следнее десятилетие значительно отличаются от природных, несмотря на относительно невысокий приток токсичных элементов.

Новый этап в состоянии экосистемы

Пример многолетнего загрязнения субарктического озера Имандра позволил выявить основные закономерности деградации экосистемы, а также особенности процессов ее модификации после снижения антропогенного загрязнения. Можно ли говорить о восстановлении, если экосистема приобрела другие характеристики, совершенно отличные от природных?

Экосистема озера Имандра видоизменялась под действием двух противоположно действующих факторов — притока биогенных элементов и стрессовых условий, т. е. токсичного загрязнения вод. В первую очередь снижалась численность типичных северных видов, уязвимых к токсичным воздействиям (см. табл. 1 и 2), что привело к снижению общего видового разнообразия. Биогенные элементы не утилизировались в экосистеме и накапливались, о чем свидетельствуют высокие концентрации биодоступных форм, которые стимулируют развитие фитопланктонных комплексов устойчивых видов. Численность и продуктивность эврибионтных видов в структуре экосистемы возрастает вследствие обеспеченности их кормовой базой и отсутствия конкурентных связей с типичными обитателями северных вод, требовательных к качеству воды. На этом фоне уменьшается относительная доля хищных видов ракообразных и ценных лососевых рыб. Уменьшение показателя условной индивидуальной массы в планктонных сообществах свидетельствует о преобладании мелких форм (*r*-стратегов), обеспечивающих более быстрый оборот биомассы в экосистеме и утилизацию дополнительно поступающих биогенных элементов [13]. В бентосных сообществах в условиях токсичного загрязнения прослеживается формирование хирономидно-олигохетного комплекса, виды которого устойчивы к токсичному загрязнению вод. Данное состояние экосистемы характеризовало ее как находящуюся в критическом состоянии. Если сопоставить ключевые показатели экосистемы в этот период с признаками нестабильной экосистемы в стрессовом состоянии, то становится очевидно, что стабильное природное состояние экосистемы трансформировалось в новую стадию, которая, судя по наблюдаемым признакам, является нестабильной (развивающейся) [14].

Приводимые в работе признаки модификации экосистемы после снижения потока загрязнения привели в течение последних двух десятилетий к новой структуре, характеризующейся параметрами более устойчивого состояния его новой модификации, признаками которой являются: повышение роли верхних звеньев трофической структуры экосистемы, успешная утилизация минеральных форм био-

генных элементов, увеличение доли крупных форм в отдельных сообществах, что согласуется с закономерностями сукцессий экосистем: от природной через развивающую стадию к более стабильной зрелой (климаксной) ее модификации, но отличной от природной структуры.

Особо следует подчеркнуть изменение рыбной части сообществ экосистемы в направлении увеличения доли теплолюбивых видов и эврибионтов — массовое развитие корюшки, увеличение численности окуня при резком сокращении гольца. Поэтому термин «восстановление экосистем» в данном случае нельзя отождествлять с понятием возвращения к природному состоянию, поскольку экосистема приобрела новые характеристики. Сложно ответить на вопрос, насколько велик вклад климата в данную трансформацию. В структуре сообществ увеличилась численность более теплолюбивых видов [6; 7; 10]. Насколько возможен возврат к природным характеристикам и есть ли в этом таковая необходимость? По мнению ученых [15; 16], прошлое состояние не должно быть целевой функцией для восстановления экосистем. Несмотря на вложение огромных финансовых средств, в научной литературе нет примеров возврата к природному состоянию в период оживления экосистем после сильного разрушающего загрязнения [16]. Человечество имеет три выбора относительно восстановления нарушенной экосистемы: продолжение разрушающего воздействия; полное прекращение и восстановление до природного состояния; поддержание экосистем и их стабильных функций, служащих на пользу человека, т. е. высокое качество вод, биоразнообразие и продуктивность. Первое недопустимо, второе невозможно, третье оптимально. Никакие технологии не могут развернуть эволюцию в обратном направлении и воссоздать те экосистемы, которые функционировали столетия назад и подверглись антропогенному стрессу.

Заключение

Экосистема озера Имандра в современный период характеризуется новыми показателями, отличными от ее природного состояния. Накопленные биогенные элементы вовлечены в биологический круговорот и поддерживают биопродуктивность вновь сформированных в период загрязнения сообществ за счет эврибионтных и более теплолюбивых видов, которые получают преимущества для развития в новых условиях дальнейшего потепления климата. Появились интродуценты, которые встроились в трофическую структуру новой модифицированной экосистемы. Поэтому восстановление арктической экосистемы до природного состояния после высокого антропогенного стресса недостижимо, поскольку водная экосистема эволюционировала через критическое к новому состоянию и приобрела свойства более зрелой модификации. Мы не берем-

ся судить о стабильности ее дальнейшего состояния. Возможно, экосистема и в дальнейшем будет эволюционировать согласно законам лимнологии в сторону повышения ее трофического статуса, изменения видового состава, численности эврибионтных видов в сообществах при условии дальнейшего потепления климата и притока биогенных элементов, а возможно, сохранит стабильность во времени, как зрелая климатская модификация, но возврата к природному состоянию не будет. Эволюция природных арктических экосистем будет протекать и в дальнейшем, но насколько драматично — зависит от нашего рационального природопользования в холодных широтах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-60012 «Реконструкция прошлого и прогноз будущих изменений качества вод и арктических экосистем на основе неолитических и палеоэкологических методов»).

Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году». — М.: Минприроды России; НИИ-Природа, 2017. — 760 с.
2. Моисеенко Т. И., Яковлев В. А. Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера. — Л.: Наука, 1990. — 220 с.
3. Моисеенко Т. И., Даувальтер В. А., Лукин А. А. и др. Антропогенные модификации озера Имандра. — М.: Наука, 2002. — 399 с.
4. Промышленное загрязнение территорий российской части Баренцева региона: Доклад объединения Bellona / Bellona Foundation. — [Б. м.], 2014. — 149 с.
5. Moiseenko T. I., Sharov A. N., Vandish O. I. et al. Long-term modification of arctic lake ecosystem: reference condition, degradation and recovery // *Limnologica*. — 2009. — Vol. 39, № 1. — P. 1—13.
6. Зубова Е. М., Кашулин Н. А., Терентьев П. М. и др. Линейный рост малотычинкового сига *Coregonus lavaretus* (Coregonidae) оз. Имандра (Мурманская область) // *Вопр. ихтиологии*. — 2016. — Т. 56, № 4. — С. 463—473.
7. Денисов Д. Б., Валькова С. А., Терентьев П. М. и др. Современное состояние экосистемы оз. Имандра в зоне влияния Кольской АЭС (Мурманская область) // *Вода: химия и экология*. — 2017. — № 6. — С. 41—51.
8. Терентьев П. М., Кашулин Н. А., Зубова Е. М. Роль европейской корюшки *Osmerus eperlanus* (Linnaeus) в структуре ихтиофауны бассейна оз. Имандра (Мурманская область) // *Тр. Зоол. ин-та РАН*. — 2017. — Т. 321, № 2. — С. 228—243.
9. Сандимиров С. С., Кудрявцева Л. П., Петрова О. В. Современное состояние гидрохимических показателей южных плесов озера Имандра // *Вода: химия и экология*. — 2017. — № 2. — С. 9—19.
10. Терентьева И. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Оценка трофического статуса субарктического озера Имандра // *Вестн. МГТУ*. — 2017. — Т. 20, № 1/2. — С. 197—204.
11. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: Техническое резюме. — М.: Гидромет, 2014. — 93 с.
12. Adams S. M., Ryon M. G. A comparison of health assessment approaches for evaluating the effects of contaminant-related stress on fish populations // *Aquatic Ecosystem*. — 1994. — P. 15—25.
13. Алимов А. Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. — СПб.: Наука, 2000. — 147 с.
14. Одум Ю. Экология. — Ч. 1. — М.: Мир, 1986. — 376 с.
15. Harris J. A., Hobbs R. J., Higgs E., Aronson J. Ecological restoration and global climate change // *Restoration Ecology*. — 2006. — 14. — P. 170—176.
16. Palmer M. A., Ambrose R. F., Poff N. I. Ecology theory and community restoration ecology // *Restoration Ecology*. — 2007. — 5. — P. 291—300.

Информация об авторах

Моисеенко Татьяна Ивановна, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, заведующая отделом биогеохимии и геоэкологии, Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 19), e-mail: moiseenko@geokhi.ru.

Денисов Дмитрий Борисович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией водных экосистем, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Мурманская область, Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а), e-mail: proffessuir@gmail.com.

Библиографическое описание данной статьи

Моисеенко Т. И., Денисов Д. Б. Возможно ли восстановление озерной арктической экосистемы после длительного загрязнения? // *Арктика: экология и экономика*. — 2019. — № 4 (36). — С. 16—25. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-16-25.

IS IT POSSIBLE TO RESTORE THE ARCTIC LAKE ECOSYSTEMS AFTER LONG-TERM POLLUTION?

Moiseenko T. I.

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the RAS (Moscow, Russian Federation)

Denisov D. B.

Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre of the RAS (Apatity, Murmansk region, Russian Federation)

The article was received on May 8, 2019

Abstract

Intensive development of mineral resources of the Arctic regions has led to anthropogenic pressure on ecosystems. Using the example of the long-term anthropogenic pollution of the subarctic Lake Imandra with the sewage of the mining and industrial complex, the dynamics of changes in ecosystem indicators for more than 70 years is considered, an analysis of the newly formed lake modification that is significantly different from the natural state is given. Chemical water composition and the ecosystem structural components (phyto, animal plankton, zoobenthos and fish fauna) are analyzed in following periods: 1) pre-industrial in the natural background state; 2) industrial development of deposits on the shores of the lake and intensive pollution; 3) significant reduction of anthropogenic impact and; 4) the current state.

The main regularities of the aquatic ecosystem variability under anthropogenic pressure are revealed that have led to the coenosis degradation and massive fish diseases. From the point of view of ecological theory, an explanation is given of the modification paths and the impossibility of the lake return to its natural state. It is revealed that the climatic factor along with the entry of biogenic elements have led to the eutrophication of the lake and the coenosis adaptation to new conditions including the appearance of introduced species, the increasing role of thermophilic and eurybiontic forms in the coenosis and utilization of nutrients in biogeochemical cycles, which corresponds to more stable newly formed modification ecosystems. Thus establishing that restoration of the ecosystem with natural characteristics is impossible.

Keywords: Arctic region, Lake Imandra, long-term pollution, mining complex, ecosystem modifications, ecosystem restoration.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 18-05-60012 "Reconstruction of the past and forecasting future changes in the water quality and Arctic ecosystems based on neo- and paleo-ecological methods").

References

1. Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2016 godu". [The Russian Federation National Environmental report in 2016]. Moscow, Minprirody Rossii, NIA-Priroda, 2017, 760 p. (In Russian).
2. Moiseenko T. I., Yakovlev V. A. Antropogennye preobrazovaniya vodnykh ekosistem Kol'skogo Severa. [Anthropogenic transformation of aquatic ecosystems of the Kola peninsula]. Leningrad, Nauka, 1990, 220 p. (In Russian).
3. Moiseenko T. I., Dauval'ter V. A., Lukin A. A., Kudryavtseva L. P., Il'yashuk B. P., Il'yashuk E. A., Sandimirov S. S., Kagan L. Ya., Vandyshe O. I., Sharov A. N., Sharova Yu. N., Koroleva I. M. Antropogennye modifikatsii ozera Imandra. Moscow, Nauka, 2002, 399 p. (In Russian).
4. Promyshlennoe zagryaznenie territorii rossiiskoi chasti Barentseva regiona. [Industrial Pollution of Russian Part of the Barents Region]. Doklad ob"edineniya Bellona. Bellona Foundation. [S. I.], 2014, 149 p. (In Russian).
5. Moiseenko T. I., Sharov A. N., Vandyshe O. I., Kudryavtseva L. P., Gashkina N. A., Rose C. Long-term modification of arctic lake ecosystem: reference condition, degradation and recovery. *Limnologica*, 2009, vol. 39, no. 1, pp. 1—13.
6. Zubova E. M., Kashulin N. A., Terent'ev P. M., Denisov D. B., Val'kova S. A. Lineinyi rost malotychinkovogo siga *Soregonus lavaretus* (Soregonidae) oz. Imandra (Murmanskaya oblast'). [Linear growth of whitefish *Coregonus lavaretus* (Coregonidae) lake Imandra (Murmansk province)]. *Vopr. ikhtologii*, 2016, vol. 56, no. 4, pp. 463—473. (In Russian).
7. Denisov D. B., Val'kova S. A., Terent'ev P. M., Sandimirov S. S., Vandyshe O. I. Sovremennoe sostoyanie ekosistemy oz. Imandra v zone vliyaniya Kol'skoi AES (Murmanskaya oblast'). [Current state of ecosystem of lake Imandra near Kola NPP (Murmansk province)]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2017, no. 6, pp. 41—51. (In Russian).
8. Terent'ev P. M., Kashulin N. A., Zubova E. M. Rol' evropeiskoi koryushki *Osmerus eperlanus* (Linnaeus) v strukture ikhtiofauny basseina oz. Imandra (Murmanskaya oblast'). [The role of european smelt *Osmerus eperlanus* in fish fauna structure of the Imandra lake

- basin (Murmansk province)]. Tr. Zool. in-ta RAN, 2017, vol. 321, no. 2, pp. 228—243. (In Russian).
9. Sandimirov S. S., Kudryavtseva L. P., Petrova O. V. Sovremennoe sostoyanie gidrokhimicheskikh pokazatelei yuzhnykh plesov ozera Imandra. [The current state of hydro-chemical indicators of the southern reaches of lake Imandra]. Voda: khimiya i ekologiya, 2017, no. 2, pp. 9—19. (In Russian).
10. Terent'eva I. A., Kashulin N. A., Denisov D. B. Otsenka troficheskogo statusa subarkticheskogo ozera Imandra. [Estimate of the trophic status of subarctic lake Imandra]. Vestn. MG TU, 2017, vol. 20, no. 1/2, pp. 197—204. (In Russian).
11. Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii ego posledstviyakh: Tekhnicheskoe rezyume. [Second assessment report on climate change and its effects on the territory of the Russian Federation: technical summary]. Moscow, Gidromet, 2014, 93 p. (In Russian).
12. Adams S. M., Ryon M. G. A comparison of health assessment approaches for evaluating the effects of contaminant-related stress on fish populations. Aquatic Ecosystem, 1994, pp. 15—25.
13. Alimov A. F. Elementy teorii funktsionirovaniya vodnykh ekosistem. [Elements of the theory of the functioning of aquatic ecosystems]. St. Petersburg, Nauka, 2000, 147 p. (In Russian).
14. Odum Yu. Ekologiya. [Ecology]. Pt. 1. Moscow, Mir, 1986, 376 p. (In Russian).
16. Harris J. A., Hobbs R. J., Higgs E., Aronson J. Ecological restoration and global climate change. Restoration Ecology, 2006, 14, pp. 170—176.
16. Palmer M. A., Ambrose R. F., Poff N. I. Ecology theory and community restoration ecology. Restoration Ecology, 2007, 5, pp. 291—300.

Information about the authors

Moiseyenko Tatiana Ivanovna, Doctor of Biological Science, Corresponding member of RAS, Head of the Department of Biogeochemistry and Geoecology, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the RAS (19, Kosygin St., Moscow, Russia, 119991), e-mail: moiseenko@geokhi.ru.

Denisov Dmitriy Borisovich, PhD of Biological Science, Head of the Laboratory of Aquatic Ecosystems, Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre of the RAS (14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209), e-mail: proffessuir@gmail.com.

Bibliographic description

Moiseenko T. I., Denisov D. B. Is it possible to restore the Arctic lake ecosystems after long-term pollution? Arctic: Ecology and Economy, 2019, no. 4 (36), pp. 16—25. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-16-25. (In Russian).

© Moiseenko T. I., Denisov D. B., 2019