

17. Селюков А.Г., Солодилов А.И., Елькин В.П. Слабые взаимодействия и регомеостаз живых систем (прикладной аспект): монография. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2008. 192 с.
18. Niimi, A.J. Review of biochemical methods and other indicators to assess fish health in aquatic ecosystems containing toxic chemicals // J. Great Lakes Res. 1990. № 16. Pp. 529-541.
19. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.5-2000. Методика определения токсичности воды по смертности и изменению плодовитости дафний. М., 2000. 36 с.
20. ФР.1.39.2001.00284 Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей. М.: Акварос, 2001. 38 с.
21. Елизаров И.М. Качественная характеристика рек юга Тюменской области / 2-й Науч.-практ. семинар «Чистая вода». Тюмень, 1997. С. 7.
22. ГОСТ Р 51592-2000 Вода. Общие требования к отбору проб. 2000. 30 с.
23. Окиюк С.А. Качество поверхностных вод // Гидробиологический журнал. 1993. № 4. С. 62-75.
24. Гашев С.Н., Елифанов А.В., Соловьев В.С., Гашева Н.А. Влияние сырой нефти на морфофункциональное состояние организма беспородных белых мышей и крыс // Бюллетень МОИП. 1994. Т. 99. Вып. 6. С. 23-29.
25. Шварц С.С., Смирнов В.С., Добринский Л.Н. Метод морфофизиологических индикаторов в экологии наземных позвоночных. Свердловск, 1968. 387 с.
26. Кононский А.И. Гистохимия. Киев, 1976.
27. Дарлингтон С.Д., Ла Кур Л.Ф. Хромосомы: Методы работы. М., 1980. 183 с.

Татьяна Ивановна МОИСЕЕНКО —
зав. отделом биогеохимии и экологии,
Института геохимии и аналитической химии
им. И.В. Вернадского РАН (г. Москва),
зав. лабораторией качества вод, устойчивости
водных экосистем и экотоксикологии
Тюменского государственного университета,
доктор биологических наук, профессор,
член-корреспондент РАН
moiseenko@geokhi.ru

Андрей Николаевич ШАРОВ —
ст. научный сотрудник лаборатории
эволюционной биогеохимии и геоэкологии,
Института геохимии и аналитической химии
им. И.В. Вернадского РАН (г. Москва),
кандидат биологических наук
sharov_an@mail.ru

УДК 574.52

ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ БОЛЬШИХ ОЗЕР ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

TRANSFORMATIONS OF WATER ECOSYSTEMS OF THE LARGE LAKES UNDER ANTHROPOGENIC LOAD CHANGE

АННОТАЦИЯ. Основываясь на обобщении многолетних исследований крупных озер севера Европейской территории России (ЕТР): Ладожское, Онежское и Имандра, сделан ретроспективный анализ состояния сообществ экосистем; выявлены основные закономерности модификаций водных экосистем больших озер в условиях высоких антропогенных нагрузок и их снижения.

SUMMARY. The article offers the retrospective analysis of aquatic ecosystem on the basis of long-term research of the Russian large lakes Ladoga, Onega and Imandra. The ecosystems transformed under the impact of pollution by toxic matters and nutrients. The authors determine basic regularities of aquatic ecosystems modifications of large lakes under intense anthropogenic load and its decrease.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Большие озера, длительное загрязнение, водные экосистемы, природное состояние, восстановление.

KEY WORDS. Large lakes, long-term pollution, aquatic ecosystem, nature condition, recovery.

Поверхностные воды суши среди природных образований наиболее подвержены антропогенным воздействиям; среди которых наибольшую опасность представляет токсичное загрязнение. В последние десятилетия наметились тенденции к снижению выбросов загрязняющих веществ, как в составе сточных вод, так и аэротехногенных потоков. Наука стала накапливать данные о позитивных изменениях в экосистемах после снижения антропогенного загрязнения. Вместе с тем общие закономерности сукцессий экосистем после токсичного загрязнения, происходящие взаимосвязанно в их структурных элементах, мало изучены.

Примером многолетнего комплексного загрязнения были крупные озера Севера Европейской территории России (ЕТР): Ладожское (Волховская губа), Онежское (Кондопожская губа) и Имандра (плес Большая Имандра). В эти локальные заливы (рис. 1) десятилетиями поступали одновременно токсичные вещества и биогенные элементы.

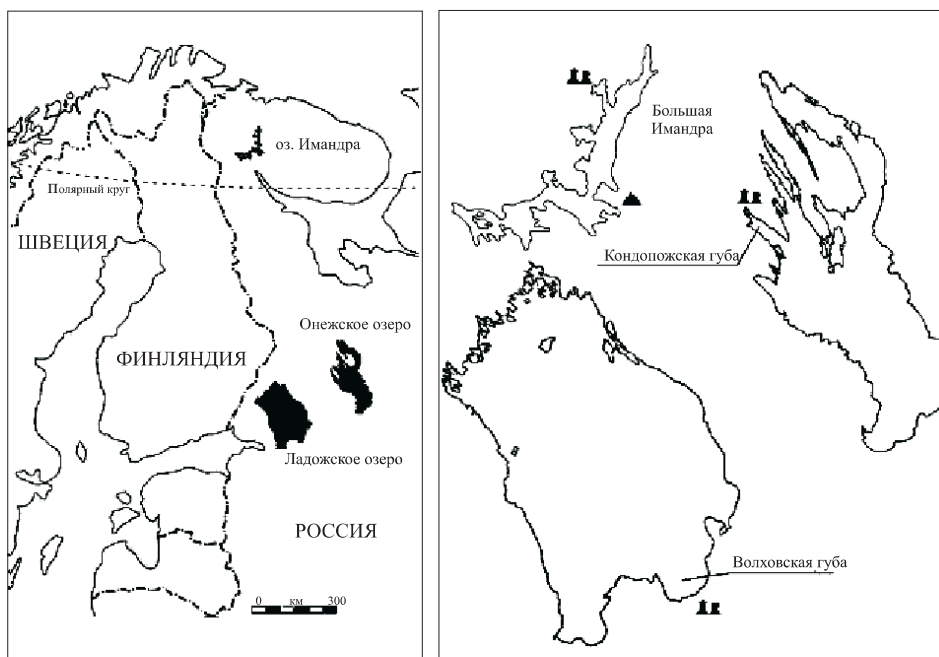


Рис. 1. Карта-схема района исследования

Целью работы было на основе анализа литературных данных и результатов собственных исследований [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7] выявить основные закономерности сукцессий водных экосистем озер Севера в условиях антропогенных нагрузок и их снижения: оценить возможность возврата экосистемы к природному состоянию после токсичного стресса.

Выделены три ключевых периода модификаций экосистем в загрязняемых заливах: природное состояние экосистем; состояние в период сильного загрязнения от крупных горнопромышленных и деревообрабатывающих производств (1940-1990 гг.) и в период снижения поступления загрязнения в водоемы.

Основные характеристики природного состояния. Климатические условия формирования вод Арктического бассейна, а именно — высокий вклад атмосферных осадков, тонкий почвенно-растительный покров, низкие температуры и соответственно замедленные процессы химического выветривания и круговорота элементов формируют ультрапресные воды (сумма ионов была 20-55 мг/л). По природным свойствам исследованные озера — типичные олиготрофные водоемы, воды которых гидрокарбонатно-кальциевого состава с низкими концентрациями микроэлементов. Содержания фосфора, в особенности биодоступных фосфатов, очень низки. Высокое соотношение концентраций N/P (43-45) подтверждают, что продукционные процессы в северных условиях лимитированы по содержанию фосфора (табл. 1).

Таблица 1

Ключевые гидрохимические и гидробиологические показатели наиболее загрязненных районов больших озер

Показатель	Природное состояние			Период интенсивного загрязнения			Период снижения загрязнения		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
pH	6.7	6.8	7.5	7.3	7.1	7.6	7.4	7.0	7.5
P _{общ.} , мкг/л	7	9	11	26	54	178	26	24	34
PO ₄ , мкг/л	2	1	3	21	30	100	2	5	9
N _{общ.} , мкг/л	250	350	450	436	750	920	195	648	890
NO ₃ , мкг/л	30	110	130	102	120	240	19	85	230
N _{общ.} /P _{общ.}	43	44	45	17	14	12	15	27	26
Si, мг/л	0.5	2	1	1	1.2	0.5	0.42	0.1	0.2
Chl «а», мг/м ³	0.4	0.7	0.7	3.8	8.4	8.0	3.6	6.8	7.9
Ni, мкг/л	<1	—	—	43	0.1	—	11.0	<0.1	—
Cu, мкг/л	<1	<1	<1	14	6.0	—	6.0	4.5	7.0
Фитопланктон									
Биомасса (B), г/м ³	0.4	0.7	0.5	3.6	2.4	5.5	3.4	1.7	2.1
Численность (N), кл.10 ⁶ /л	0.3	0.5	0.4	3.8	3.6	12.3	3.2	2.5	3.4
P, мг C/м ³ сутки	50	52	150	266	412	410	194	230	301
H (индекс Шеннона по N)	3.5	3.5	3.4	2.5	3.3	3.1	3.1	3.8	3.6
B/N, 10 ⁻⁶ г	1.0	1.0	1.3	0.9	0.6	0.4	1.0	0.7	0.6
%B Stephanodiscus sp.	0.3	0.2	0.3	6	1	3	8	2	4
%B Cryptomonas sp.	0.2	0.1	0.5	17	5	4	15	2	23
%B Синезеленых	3	3	4	9	6	65	11	7	32
%B Зеленых	4	2	2	21	5	7	20	8	10
Зоопланктон									
Биомасса (B), г/м ³	0.3	0.1	0.6	1.7	2.9	2.8	1.2	1.1	0.9

Окончание табл. 1

Численность (N), экз. $10^3/м^3$	17	3	13	149	110	143	107	80	34
H (индекс Шенно- на по N)	2.8	2.3	—	1.7	1.7	—	2.5	2.5	2.7
V/N, 10^{-6} г	16	33	46	9	26	20	11	14	36
% V Rotatoria	15	7	5	44	46	27	20	40	20
Макрзообентос									
Биомасса (B), г/ $м^2$	0.6	0.6	1.6	35	3.2	4.8	13	12.0	12.6
Численность (N), экз. $10^3/м^2$	0.5	0.2	0.8	43	2.4	1.1	6.2	7.0	3.5
V/N, 10^{-3} г	1.1	2.4	2.0	0.8	1.3	4.4	2.1	1.7	3.6
H (индекс Шенно- на по N)	3.5	2.6	—	1.6	2.0	—	1.1	1.4	—

Примечание: 1 — плес Большая Имандра; 2 — Кондопожская губа Онежского озера; 3 — Волховская губа Ладожского озера в различные периоды антропогенной нагрузки (приведены средние значения за вегетационный период).

Водное население трех озер было представлено преимущественно арктическими холодноводными видами [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Состав и структура фитопланктона исследованных озер чрезвычайно сходна и типична для глубоких олиготрофных озер. В фитопланктоне озер Имандра, Ладожского и Онежского преобладали диатомовые водоросли, в частности *Aulacoseira islandica*. Отмечаются низкие значения численности и биомассы фитопланктона (табл. 1). Содержание хлорофилла и продукция фитопланктона была более высокой в Ладожском озере, как более южном водоеме, что согласуется с распределением биогенных веществ.

Преобладание ракообразных Cladocera и Copepoda в 40-х гг. прошлого века являлось характерной чертой зоопланктона озер — Ладожского, Онежского и Имандра [1], [3], [6], [7]. В зообентосе озер доминировали личинки хирономид, моллюск *Euglesa spp.* и ракообразные (*Monoporeia affinis*, *M. relicta*, *Pallasiola quadrispinosa*). Олигохеты были представлены семействами *Lumbriculidae* и *Naididae*. Ряпушка *Coregonus albula* (L) является основным планктофагом, сига (*Coregonus lavaretus* (L) — бентофагами. Среди хищных рыб в Ладожском и Онежском озере преобладает озерный лосось *Salmo trutta trutta* (L), в оз. Имандра — арктический голец *Salvelinus alpinus* (L) [1], [3], [6], [7].

Ключевые признаки деградации. Промышленное освоение сопровождалось формированием бытовых стоков от городов и поселков, которые без должной очистки выпускались в те же участки озер, куда сбрасывались и токсичные воды. Изменения химического состава вод произошли во всех трех озерах по одному типу: снизилась прозрачность, увеличился показатель pH, содержания сульфатов и хлоридов, биогенных элементов, возросли концентрации металлов и появились токсичные вещества органической природы.

Экосистемы озер видоизменялись под действием двух факторов различной экологической значимости — притока энергетических субсидий в виде биогенных элементов и стрессовых условий, формируемых токсичным загрязнением вод. Изменился видовой состав фаунистических комплексов в направлении доминирования эврибионтных видов в составе фито-, зоопланктона и зообентоса, снизилось видовое разнообразие сообществ на фоне увеличения их численности и биомассы (табл. 1).

Вследствие притока в экосистемы биодоступных форм фосфора и азота произошло нарастание биомассы первичных продуцентов. Структура биомассы фитопланктона изменяется в сторону преобладания устойчивых к загрязнению сине-зеленых и криптофитовых водорослей. В сообществах зоопланктона и бентоса снижается численность типичных северных видов, уязвимых к токсикантам, что привело к снижению общего видового разнообразия. Численность эврибионтных видов в зоопланктонных и бентосных сообществах увеличилась под влиянием хорошей обеспеченности пищевыми ресурсами и отсутствия конкурентных связей с типичными обитателями северных вод, уязвимых к токсичному воздействию. В зоопланктонных сообществах преобладают мелкоразмерные коловратки. В бентосных сообществах в условиях комплексного загрязнения прослеживается формирование хирономидно-олигохетного комплекса из устойчивых видов к токсичному загрязнению вод [3], [4], [5], [6], [7]. Таким образом, резко возрастает видовая доминантность во всех трех сообществах вплоть до образования сообществ из монокультур в отдельных заливах.

Уменьшение показателя условной индивидуальной массы характерно для фито- и зоопланктонных сообществ и свидетельствует о преобладании мелких форм (*r*-стратегов), обеспечивающих более быстрый оборот биомассы в экосистеме и утилизацию дополнительно поступающих энергетических субсидий [8]. В меньшей степени эта закономерность характеризует бентосное сообщество, в ряде случаев интенсивное развитие крупных хирономид увеличивает этот показатель. Роль верхних трофических уровней снижается. Укорочение пищевых цепей подтверждается снижением соотношения хищных и мирных видов в зоопланктоне и рыбной части сообществ, редкими становятся такие виды, как кумжа и голец, вследствие их высокой уязвимости от токсичного загрязнения. Приведенные признаки состояния сообществ трех озер в местах интенсивного загрязнения свидетельствуют о критическом состоянии экосистем и соответствуют признакам их неустойчивого стрессового состояния согласно теории Ю. Одума [9].

Модификации экосистем после снижения загрязнения. В период снижения антропогенной нагрузки на озера, начиная с 1990-х гг., обозначились тенденции к улучшению качества вод и оживлению экосистемы. Крупные промышленные предприятия были остановлены или значительно сократили объемы производства. Сократилось использование минеральных удобрений в сельском хозяйстве. В 2000-х гг. оживление экономики сопровождалось модернизацией производств и введением систем очистных сооружений.

Концентрации токсичных веществ в воде исследуемых озер снизились, например: в оз. Имандра уменьшилась концентрация никеля как основного маркера загрязнения со 150 до 10 мкг/л [7]; в Кондопожской губе Онежского озера и Волховской губе Ладожского озера снизилась концентрация лигносульфатов и фенолов, как маркеров загрязнения стоками целлюлозно-бумажной промышленности [1], [2], [4], [5].

Несмотря на снижение притока фосфора в экосистему, величины максимальных и средних значений биомасс и содержания хлорофилла почти не изменились (табл. 1). На фоне снижения концентрации фосфора и увеличения соотношения N/P в период снижения загрязнения произошла замена доминирования сине-зеленых водорослей на криптофитовые. Это было также отмечено в ряде озер Швеции и Северной Америки после сокращения загрязнения озер фосфором [10], [11]. Особенно интенсивно криптофитовые водоросли развились в Ладожском озере.

Восстановление экосистем происходит согласно закономерностям естественного развития экосистем, известных в экологии, например, их формирования после природных катаклизмов в прошлом [9], [12], [13], [14]. На фоне высоких концентраций общего фосфора снизилась концентрация биодоступных фосфатов вследствие их быстрой утилизации в трофической структуре экосистемы. Видовая структура сообществ остается отличной от природной. Ряд видов, характерных для природного состояния, не восстанавливает свою численность. Вторично изменяется доминантность в сообществах, например виды, единичные в природном состоянии, развиваются в высокой численности. Видовое разнообразие планктонных сообществ увеличивается. Происходит увеличение обилия крупных форм (К-стратегов) и хищных организмов в структуре зоопланктона, очевидно, и рыб (табл. 1). Бентосные сообщества более инертны к восстановлению, их биоразнообразие остается низким. О формировании новой структуры свидетельствует, например, в оз. Имандра, массовое развитие хищного вида — бокоплава *Monoporeia affinis*. Этот вид получает преимущества для своего развития в условиях снижения токсичной нагрузки и благоприятных кормовых условиях при повышении биопродуктивности. В Ладожском и Онежском озере активно происходит инвазия *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing), бокоплава байкальского происхождения [2].

К сожалению, прямых данных о рыбопродуктивности исследованных заливов озер в последний период восстановления нет. Однако опросы населения свидетельствуют о повышении неорганизованного вылова рыбы, что может расцениваться как косвенный признак увеличения численности рыб. Снижение биомассы зоопланктона и бентоса может быть объяснено двумя факторами: 1) увеличением доминирования хищных форм над мирными в составе этих сообществ, 2) фактором выедания рыбами.

Таким образом, приводимые в работе признаки оживления экосистемы, а именно: реколонизация отдельных северных видов, повышение роли верхних звеньев трофической структуры экосистемы, успешная утилизация минеральных форм биогенных элементов, увеличение доли К-стратегов согласуются с закономерностями сукцессий экосистем [9], [15]: от природной через развивающую стадию к более стабильной зрелой (климаксной) ее модификации. Вновь сформированная стадия отлична от ее природной структуры. Ряд исследователей связывает восстановление водных экосистем со скоростью выведения фосфора и других загрязняющих веществ, как например, в Великих озерах Америки [11]. Однако эти выводы не подтверждаются какими-либо корреляционными зависимостями. По нашему мнению, ведущим механизмом возврата к природным условиям является стабильность функционирования вновь сформированной экосистемы после загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ладожское озеро — прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. 327 с.
2. Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2008. 272 с.
3. Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. 264 с.
4. Ладожское озеро: мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами / Под ред. Н.Н. Филатова; Карел. науч. центр РАН, Ин-т водных проблем Севера. Петрозаводск, 2000. 489 с.
5. Онежское озеро. Экологические проблемы / Ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1999. 293 с.

6. Моисеенко Т.И., Лукин А.А., Кудрявцева Л.П. и др. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М: Наука, 2002. 476 с.
7. Moiseenko, T.I., Sharov, A.N., Vandish, O.I., Kudryavtseva, L.P., Gashkina, N.A. Long-term modification of arctic lake ecosystem: reference condition, degradation and recovery // *Limnologia*, 2009. V. 39, № 1. Pp. 1-13
8. Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2000.
9. Одум Ю.П. Экология. М.: Мир, 1986. 376 с.
10. Willen, E. Phytoplankton and reversed eutrophication in Lake Malaren, Central Sweden, 1965-1983 // *Br. Phycol. J.* 1987, № 22. Pp. 193-208.
11. Scavia, D., Lang, G.A., Kitchell, J.F. Dynamics of Lake Michigan plankton: A model evaluation of nutrient loading, competition, predation // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1988. № 45. Pp. 165-177.
12. Grey, C.B., Neilson, M., Johannsson, O., Fitzsimmons, J., Millard, S., Dermott, R. Lake Ontario. The book of Canadian Lakes. Monograph Series. 1994 V. 3. Pp. 14-36.
13. Hobbs, R.J. Setting effective and realistic restoration goals: key direction for researches. *Restoration Ecology*, 2007. № 5. Pp. 354-357.
14. Palmer, M.A., Ambrose, R.F., Poff, N.I. Ecology theory and community restoration ecology // *Restoration Ecology*, 2007. № 5. Pp. 291-300.
15. Rapport D.J., Regier H.A., Hutchinson T.C. Ecosystem behaviors under stress. *American Naturalist*, 1985. № 125. Pp. 617-640.

Галина Александровна ПЕТУХОВА —
профессор кафедры экологии и генетики
Тюменского государственного университета,
доктор биологических наук

Татьяна Григорьевна АКАТЬЕВА —
доцент кафедры экологии
Тюменской государственной
сельскохозяйственной академии,
кандидат биологических наук

Елена Сергеевна ПЕТУХОВА —
аспирант кафедры экологии и генетики
Тюменского государственного университета

Сергей Владимирович АРТЕМЕНКО —
студент V курса биологического факультета
Тюменского государственного университета

gpetuhova@mail.ru

УДК 681.3.574.3.575.224

**ОЦЕНКА ТОКСИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД, ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕФТЬЮ,
В ТЕСТАХ НА РАСТЕНИЯХ И ЖИВОТНЫХ**

**EVALUATION OF TOXIC EFFECT OF OIL POLLUTED RIVER WATER
ON PLANTS AND ANIMALS**

АННОТАЦИЯ. Проведено изучение влияния поверхностных вод из районов нефтедобычи на растения и животных. Показано снижение выживаемости ин-