

АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕРА БОЛОЙСО И ПУТИ ЕЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Б. П. ВЛАСОВ¹⁾, В. М. САМОЙЛЕНКО¹⁾, Н. Д. ГРИЩЕНКОВА¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

Исследованы изменения в экосистеме оз. Болойсо под влиянием антропогенной нагрузки за период с 1948 по 2015 г., разработаны методы ее восстановления. Доказано, что оз. Болойсо, расположенное в Браславском районе Витебской области Республики Беларусь в центре системы озер Национального парка «Браславские озера», является ярким примером быстрой деградации экосистемы под влиянием мощного точечного источника биогенных элементов. Рассматривается динамика ряда гидрохимических и гидробиологических показателей, свидетельствующих о снижении темпов эвтрофирования водоема. Обоснована необходимость проведения специальных мероприятий ввиду высокой степени загрязнения водной массы и поверхностного горизонта донных отложений. По итогам исследования разработана принципиальная схема технологии восстановления озера, включающая в себя ряд внешних (экологическое обустройство водосбора, контроль источников биогенных элементов на водосборе) и внутренних (аэрация, удаление донных отложений, биоманипуляции и др.) мер.

Ключевые слова: оз. Болойсо; антропогенная нагрузка; эвтрофирование; технологии восстановления.

ANTHROPOGENIC CHANGES OF THE BOLOYSO LAKE ECOSYSTEM AND WAYS OF ITS RESTORATION

B. P. VLASOV^a, V. M. SAMOILENKA^a, N. D. HRYSHCHANKAVA^a

^aBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus

Corresponding author: vlasov@bsu.by

Article is devoted to the analysis of changes in the Boloysso Lake ecosystem under the influence of anthropogenic load from 1948 to 2015, and development of methods for its restoration. The Boloysso Lake is located in Braslavsky district of the Vitebsk region of Republic of Belarus in the center of lakes' system of National park «Braslavskye ozero» is a good example of rapid degradation of an ecosystem under the influence of a powerful point source of biogenic elements.

Образец цитирования:

Власов Б. П., Самойленко В. М., Грищенко Н. Д. Антропогенные изменения экосистемы озера Болойсо и пути ее восстановления // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. 2017. № 1. С. 14–25.

For citation:

Vlasov B. P., Samoilenka V. M., Hryshchankava N. D. Anthropogenic changes of the Boloysso Lake ecosystem and ways of its restoration. *J. Belarus. State Univ. Geogr. Geol.* 2017. No. 1. P. 14–25 (in Russ.).

Авторы:

Борис Павлович Власов – доктор географических наук, профессор; заведующий научно-исследовательской лабораторией озераведения географического факультета.

Вера Михайловна Самойленко – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории озераведения географического факультета.

Наталья Дмитриевна Грищенко – кандидат географических наук; доцент кафедры геоэкологии географического факультета.

Authors:

Boris Vlasov, doctor of science (geography), full professor; head of the scientific research laboratory of lakes, faculty of geography.

vlasov@bsu.by

Vera Samoilenka, senior researcher at the scientific research laboratory of lakes, faculty of geography.

versam@tut.by

Natallia Hryshchankava, PhD (geography); associate professor at the department of geographical ecology, faculty of geography.

nhrysh@gmail.com

Dynamics of hydrochemical and hydrobiological indicators demonstrating decrease in rates of lake eutrophication is considered in the article. Need of holding special events, in view of high pollution of water and superficial horizon of sediments of the lake is proved. The technologies of restoration of the lake including external (ecological arrangement of watershed, control of sources of biogenic elements at watershed) and internal measures (aeration, removal of sediments, biomanipulations, etc.) are presented. The schematic diagram of restoration technology for the lake is provided.

Key words: the Boloysa Lake; anthropogenic load; eutrophication; restoration technologies.

Из всех видов антропогенного воздействия озера чаще всего испытывают влияние, связанное с поступлением избыточного количества биогенных веществ, в результате чего начинается эвтрофирование – процесс, за короткий срок приводящий к увеличению уровня биопродуктивности и нарушению сбалансированности экосистемы. Его негативные последствия обычно проявляются в чрезмерном развитии в водоемах фитопланктона (прежде всего – цианопрокариот), называемом «цветение», что отрицательно сказывается на качестве воды и снижает рекреационную ценность озер. Главная опасность эвтрофирования состоит в том, что оно труднообратимо, поскольку приводит к внутренним, коренным изменениям в экосистеме озера.

Несмотря на значительные успехи в исследовании механизма и описании этого процесса, проблема эвтрофирования далека от окончательного решения. Ухудшение качества воды обусловило активный поиск технологий и практических мероприятий, призванных ослабить этот процесс или даже способствовать деэвтрофированию водоема.

Антропогенное эвтрофирование затронуло большинство озер Беларуси. Примером быстрой деградации экосистемы под влиянием мощного точечного источника биогенных элементов является оз. Болойсо, расположенное в Браславском районе Витебской области в центре системы Национального парка «Браславские озера». Максимальная глубина озера – 15,6 м, площадь зеркала – 1,37 км², объем водной массы – 7,29 млн м³ [1]. На северо-западе водоем соединяется протокой с оз. Струсто.

Целью настоящего исследования является оценка изменений в экосистеме оз. Болойсо за период с 1948 по 2015 г., а также определение степени антропогенной трансформации экосистемы озера и разработка методов ее восстановления. В основу работы положены фондовые материалы научно-исследовательской лаборатории озераведения Белорусского государственного университета, собственные исследования авторов и литературные данные.

Значительные изменения уровня антропогенной нагрузки за период наблюдений позволили выделить несколько этапов в развитии экосистемы озера. Первый этап (до 1978 г.) – стабильное развитие экосистемы; второй (с 1978 по 1996 г.) – интенсивная аккумуляция эвтрофирующих и загрязняющих соединений сточных вод; третий (с 1997 по 2003 г.) – деградация и достижение гипертрофной стадии; четвертый этап начался после завершения реконструкции очистных сооружений г. Браслава (2004) и в настоящее время характеризуется заметным оздоровлением всех звеньев экосистемы водоема.

До начала сброса коммунальных сточных вод г. Браслава (1978) озеро относилось к мезотрофному типу. Его экосистема функционировала в условиях минимального антропогенного воздействия, локальные источники эвтрофирования и загрязнения отсутствовали. Летняя стагнация характеризовалась благоприятным газовым режимом. Мощность слоя эпилимниона составляла около 7 м, насыщение кислородом изменялось в пределах 90–100 % (рис. 1). Средний гипolimнионный дефицит кислорода в летнюю стагнацию колебался в диапазоне 50–90 %, его величина в многолетнем аспекте, несмотря на значительную динамику, не опускалась до нулевой отметки и соответствовала водоемам мезотрофного типа [2–4].

Прозрачность воды достигала 3,0–4,2 м. Для всех гидрохимических показателей были характерны небольшие колебания: общая минерализация изменялась в диапазоне 198,7–208,1 мг/дм³; содержание кальция составляло 28,5–31,0 мг/дм³; концентрация сульфатов была на уровне 7,0–9,9 мг/дм³. Величины водородного показателя были стабильными и слабо колебались в течение года. Содержание органического вещества по перманганатной окисляемости не превышало 4,3–6,1 мгО/дм³.

Невысокие значения азота и фосфора в воде обеспечивали продукционные процессы на уровне мезотрофных водоемов. В летний период с 1948 по 1972 г. содержание минерального фосфора в озере изменялось в пределах природного фона (0,008–0,052 мгР/л).

Ретроспективный анализ динамики поступления фосфора в экосистему водоема свидетельствует о том, что в 1948 г. в озеро попало 97 кг фосфора; основными источниками являлись атмосферные осадки (68,6 %) и сельхозугодья (30,9 %). К началу 1970-х гг. количество фосфора, поступающего в озеро в составе атмосферных осадков, возросло в 1,8 раза, что составило 80 % всего потока фосфора в экосистему. Очевидно, это было связано с развитием химической промышленности в Латвии.

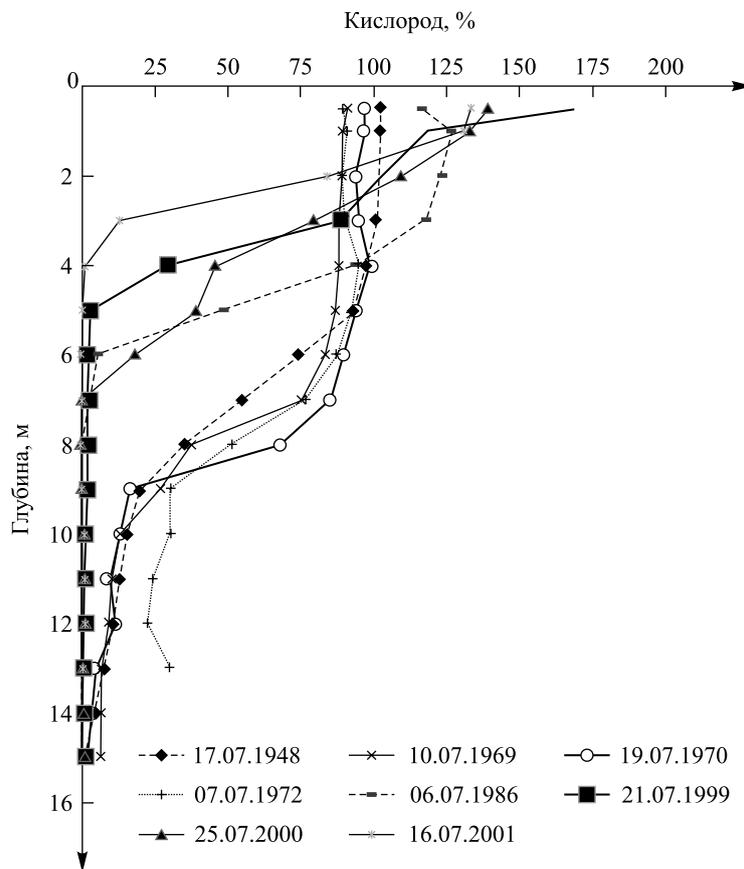


Рис. 1. Послойное распределение кислорода в оз. Болойсо в периоды летней стагнации

Fig. 1. Layered distribution of oxygen in the Boloysko Lake during summer stagnation

В первоначальный период реальная нагрузка по фосфору ($0,07 \text{ гР/м}^2$ в год) фиксировалась на уровне допустимой ($0,06 \text{ гР/м}^2$ в год), что позволяло экосистеме функционировать в пределах мезотрофной стадии. К началу 1970-х гг. ее величина практически удвоилась.

Биомасса фитопланктона летом 1972 г. составляла $4,5 \text{ г/м}^3$, преобладали цианопрокариоты, криптофитовые и золотистые водоросли. В качестве доминантов выступали *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Elenk. f. *aeruginosa* и *Gomphosphaeria lacustris* Chod. f. *lacustris*, на долю которых приходилось 15 % численности всего сообщества. Суммарные численность и биомасса зоопланктона также были низкими – $24,7 \text{ тыс. экз./м}^3$ и $0,31 \text{ г/м}^3$ соответственно. Главный вклад в общую численность (56,2 %) и биомассу (67 %) вносили веслоногие рачки. Роль коловраток в общей биомассе была незначительной. Среди кладоцер по биомассе доминировала *Daphnia cucullata*. Основу биомассы зообентоса формировали моллюски и личинки хирономид, а биомасса всего сообщества ($5,5 \text{ г/м}^2$) соответствовала среднекормным водоемам. В центральной части озера фауна хирономид была представлена в основном *Chironomus f.l. bathophilus* Kieff., *Procladius* Skuse. Встречались также мокрецы, хаборины. На песчаной литорали в массовом количестве обитали *Tanitarsini*, *Polypedilum*, *Cryptochironomus gr. defectus* Kieff. Среди моллюсков преобладали щупальцевая битиния, горошинки и шаровки. Наиболее высокую численность имели личинки хирономид, по биомассе превалировали хирономиды и моллюски.

В 1978 г. были введены в эксплуатацию очистные сооружения г. Браслава. В озеро стали сбрасывать до 2 тыс. м^3 в сутки практически неочищенных сточных вод с общей минерализацией 1000 мг/дм^3 . Согласно расчетам за год в озеро поступали свыше 700 т растворенных веществ, в том числе 1,5 т фосфора, 4,5 т аммонийного азота, 20 т хлоридов, 13,5 т сульфатов [4–6]. Столь интенсивное загрязнение обусловило высокую скорость эвтрофирования и за короткий промежуток способствовало переходу экосистемы из мезотрофной стадии в гипертрофную. Спустя 8–10 лет изменения проявились во всех элементах экосистемы.

Существенные преобразования в послойном распределении кислорода отмечаются с 1986 г. Снижение мощности эфотического слоя сопровождалось ростом насыщения его кислородом до 170 %.

На глубине 2,5–6,0 м фиксировалась зона резкого понижения концентрации газа, а с глубины 6–8 м наблюдался стопроцентный дефицит. Ситуация продолжала ухудшаться. В 2001 г. зона полного отсутствия кислорода расширилась и достигла горизонта 4 м (см. рис. 1).

В этот период отмечен рост общей минерализации. Так, в 1970-х гг. сумма ионов в среднем составляла 203 мг/дм^3 , в 1980–1999 гг. достигала 257, в 2000–2001 гг. выросла до 280 мг/дм^3 (рис. 2). Увеличение суммы ионов происходило в основном за счет повышения концентрации бикарбонатов (с 140 до 225 мг/дм^3), а также ионов, имеющих преимущественно антропогенное происхождение: сульфатов (с $5,8$ до $35,3 \text{ мг/дм}^3$), хлоридов (с $1,1$ до $35,5 \text{ мг/дм}^3$) и натрия (с $6,8$ до $26,0 \text{ мг/дм}^3$).

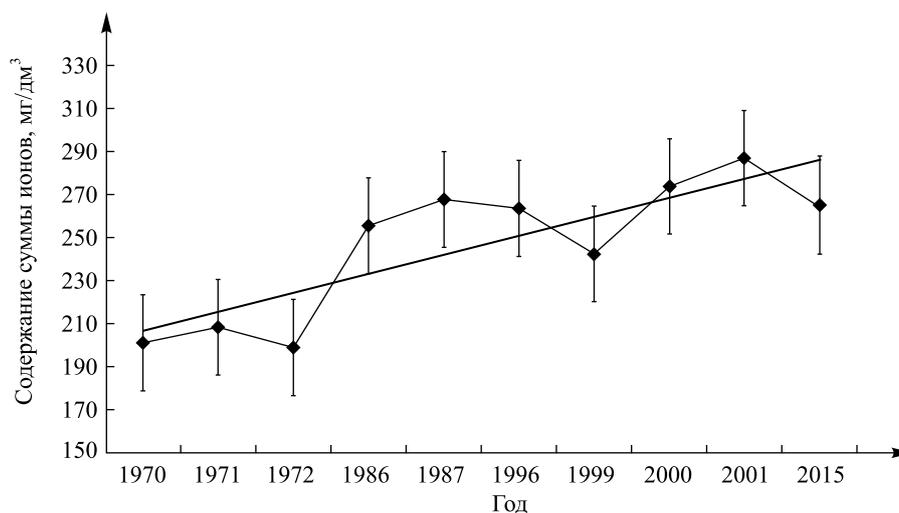


Рис. 2. Многолетняя динамика суммы ионов в оз. Болойсо
Fig. 2. Long-term dynamics of ions sum in the Boloysko Lake

Соотношение главных ионов изменялось в зависимости от антропогенной нагрузки (рис. 3). На этапе стабильного развития экосистемы бикарбонаты и кальций составляли до 75 % общей суммы ионов. К началу 2000-х гг. их относительное содержание снизилось до 65 %. Летом резко возрастала концентрация магния и натрия, достигая значений кальция и временно преобразовывая группы вод – от кальциевой к магниевой и/или натриевой. Изменение относительных величин ионов свидетельствует о высокой скорости эволюции вод и формировании в оз. Болойсо их антропогенного типа, не свойственного озерам Беларуси. Важнейшей особенностью этого процесса (при сохранении бикарбонатного класса вод) является уменьшение относительных значений бикарбонатов и кальция. Потери кальция – результат седиментации его соединений вследствие нарушения карбонатного равновесия в условиях высокой щелочности озерных вод, что наиболее ярко обнаруживается в период летней стагнации [6; 7].

Среди анионов постоянный рост абсолютных и относительных значений характерен для хлоридов. Концентрация сульфатов к 2001 г. несколько снизилась вследствие интенсификации процессов их восстановления до сероводорода в анаэробных условиях. Как отмечалось выше, зона, насыщенная сероводородом ($1,06$ – $1,7 \text{ мг/дм}^3$), к 2001 г. расширилась и достигла горизонта 4 м, заняв более половины объема водной массы озера.

Таким образом, в составе ионов происходят существенные изменения. Снижение относительного содержания бикарбонатов и кальция достигается за счет вытеснения их хлоридами, натрием и калием, сумма которых (около 20 %) более чем в 5 раз превышает таковую в 1948 г. Абсолютные величины (средние для 1999–2001 гг.) этих ионов максимально высоки: $26,2 (\pm 10,2)$; $14,0 (\pm 1,2)$; $3,6 (\pm 0,37) \text{ мг/дм}^3$ соответственно.

С 1986 г. отмечается устойчивое увеличение водородного показателя в поверхностных горизонтах с $8,49$ до $9,61$, а также постепенное снижение прозрачности с $2,8$ – $4,0$ м в 1948–1972 гг. до $0,3$ м в 1999–2001 гг.

Заметные изменения произошли и в содержании основных биогенных элементов. Повышению состава минеральных соединений азота способствовало их поступление со сточными водами, а также фиксация из воздуха цианопрокариотами, достигавшими высокой плотности, и процессы разложения аллохтонной органики. К 1999 г. средняя концентрация минерального азота доходила до $1,21 \text{ мгN/дм}^3$, 50 % составляли ионы аммония. Максимальное содержание ионов аммония зафиксировано в летнюю стагнацию 2001 г. – $1,348 \text{ мгN/дм}^3$.

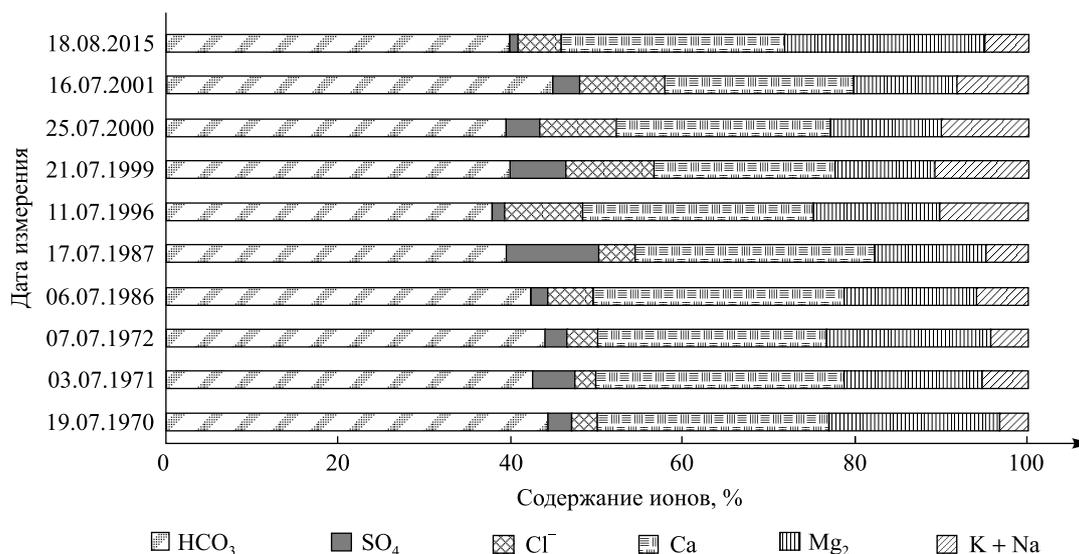


Рис. 3. Многолетняя динамика ионов в оз. Болойсо, %-экв
Fig. 3. Long-term dynamics of ions in the Boloysko Lake, %-equiv

С началом сброса сточных вод концентрация минерального фосфора постоянно возрастала, достигнув максимального значения (0,86 мгР/дм³) в 2001 г. (рис. 4). Неорганические соединения фосфора составляли 90 %. Он более не лимитировал продукционные процессы.

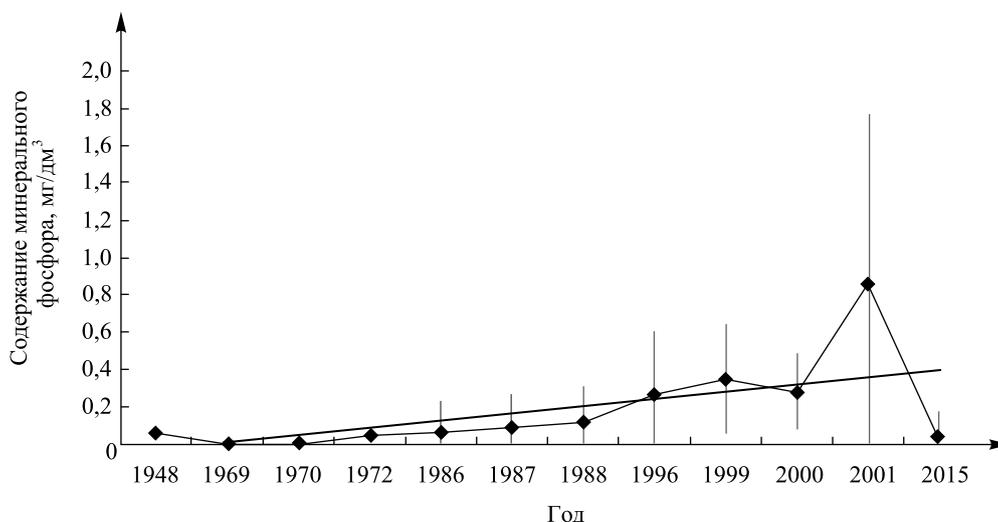


Рис. 4. Многолетние изменения минерального фосфора в оз. Болойсо
Fig. 4. Long-term changes of inorganic phosphorus in the Boloysko Lake

Основным источником соединений фосфора (91 %) стали коммунальные сточные воды. В период с 1986 по 1999 г. с ними поступало до 1500 кг фосфора в год. В связи с этим реальная фосфорная нагрузка возросла по сравнению с предыдущим этапом на порядок и в 25 раз превысила допустимую. С этого времени формирование химических и биологических процессов полностью контролируется антропогенными условиями.

Значительные колебания абиотических параметров экосистемы привели к коренному изменению гидробиологического режима, что проявилось на всех уровнях организации и функционирования сообществ гидробионтов. В начале 1970-х гг. состояние планктонных сообществ и макрозообентоса соответствовало мезотрофным водоемам. Летняя биомасса фитопланктона не превышала 1 г/м³. Преобладали хроококковые *Microcystis aeruginosa* Kütz. emend. Elenk. и *Gomphosphaeria lacustris* Chod., их

средняя численность достигала 1,72 и 1,56 млн кл./дм³ соответственно. Зоопланктон также развивался слабо: суммарная численность составляла 24,7 тыс. экз./м³, биомасса – 0,31 г/м³, при этом 52 и 68 % соответственно приходились на долю копепод. По составу бентофауны водоем характеризовался как тендипедидный и отличался довольно бедным таксономическим разнообразием. Донные беспозвоночные заселяли все биотопы вплоть до максимальных глубин. На илах центральной части обитали тендипедиды, в том числе оксифильная личинка *Chironomus f.l. bathophilus* Kieff. и олигохеты. Встречались также мокрецы и хаоборины. В литорали и сублиторали широкое распространение получили моллюски. Суммарная биомасса сообщества составила 5,5 г/м² при доминировании хирономид (40 %) и моллюсков (38 %).

Усиление антропогенной нагрузки на водоем привело к постепенной интенсификации развития фитопланктона за счет цианопрокариот [6–8]. За период с 1972 по 1987 г. летняя численность водорослей возросла в 3,6 раза, биомасса – в 5 раз (рис. 5 и 6). В последующем за аналогичный промежуток отмечено 17-кратное увеличение фитопланктона. Биомасса возросла лишь в 6,5 раза, поскольку преимущественное развитие получили мелкоклеточные формы: *Limnothrix redekei* (Van Goor) Meffert, *Planktothrix agarhii* (Gom.) Anagn. et Kom., *Plankolyngbia limnetica* (Lemm.) Kom.-Legn. et Cronb. Перечисленные виды характерны для высоко- и гипертрофных озер. Относительная численность первых двух представителей колебалась в пределах 70–95 %. В 2001 г. суммарная численность фитопланктона достигла 443,75 млн кл./дм³, биомасса – 32,25 г/м³ (см. рис. 5 и 6). На долю цианей приходилось 99 % всей численности и 98 % биомассы фитопланктона.

Обеднение таксономического разнообразия водорослей характерно для гипертрофных озер. В оз. Болойсо к началу 2000-х гг. по сравнению с предыдущим периодом число таксонов снизилось в 1,5 раза (до 47–50 таксонов водорослей). Заметно беднее стали зеленые и диатомовые водоросли, количество таксонов которых сократилось примерно вдвое. Выпали целые роды зеленых водорослей, центрические диатомеи.

В составе зоопланктона возросла роль копепод и коловраток при увеличении общей биомассы в 5 раз. Отмечалось обеднение видового состава донной фауны за счет оксифильных форм. Наиболее заметен этот процесс в профундали, где встречались 1–3 вида, приспособленных к условиям дефицита кислорода. В массовом количестве обнаруживался только мотыль, на долю которого приходится 65 % всей биомассы зообентоса. Существенно снизилось распространение моллюсков. Сокращение общей биомассы бентоса привело к ухудшению кормовой базы рыб-бентофагов.

Таким образом, изменение структуры и уровня развития биоты свидетельствовало об интенсивном антропогенном эвтрофировании водоема. К началу 2000-х гг. озеро потеряло свой естественный статус. Более того, оно превратилось в источник загрязнения гидрологически связанного с ним оз. Струсто. Требовалось принять неотложные меры, чтобы предотвратить дальнейшую деградацию двух озер.

В середине 2000-х гг. сброс сточных вод прекратился, что положительно отразилось на экосистеме. В летний период 2015 г. газовый режим улучшился, прозрачность повысилась с 0,3 до 2,1 м, показатель рН в поверхностном слое снизился с 9,21 до 8,27. Наблюдается стабилизация макрокомпонентного состава вод: рост концентрации ионов Ca²⁺ и HCO₃⁻, а также существенное снижение хлора, натрия и калия. Суммарное относительное содержание последних трех ионов уменьшилось с 20,0 до 8,2 %. Вместе с тем концентрация Mg²⁺ продолжает расти, достигнув 18,24 мг/дм³, что в 1,7 раза выше значений начала 2000-х гг. Вдвое сократилось содержание минерального фосфора, хотя абсолютные значения еще высоки и составляют в среднем 0,4 мгР/дм³. Минеральные формы азота представлены исключительно аммонием, концентрация которого возросла до 0,847 мгN/дм³.

Улучшение среды обитания, в связи с прекращением сброса сточных вод, способствовало изменению структуры и направленности процессов развития фитопланктона. В настоящее время растет таксономическое разнообразие всех отделов водорослей. Комплекс доминантов по-прежнему формируют цианеи *L. redekei* и *P. agarhii*, однако плотность их популяций сократилась более чем на порядок. Максимально высокая численность (15,54 млн кл./дм³) характерна для впервые обнаруженного в составе альгофлоры *Aphanizomenon gracile* Lemm. Ведущую роль в продукционных процессах продолжают играть цианопрокариоты, хотя интенсивность их вегетации существенно снизилась, благодаря чему суммарные значения численности и биомассы сообщества уменьшились. В настоящее время общая численность водорослей составляет 54,76 млн кл./дм³ (сократилась в 8 раз) и на 92 % складывается из цианопрокариот. Общая биомасса снизилась только вдвое, достигнув 16,46 г/м³, что является следствием повышения роли более крупных представителей дино- и криптофитовых, а также золотистых водорослей.

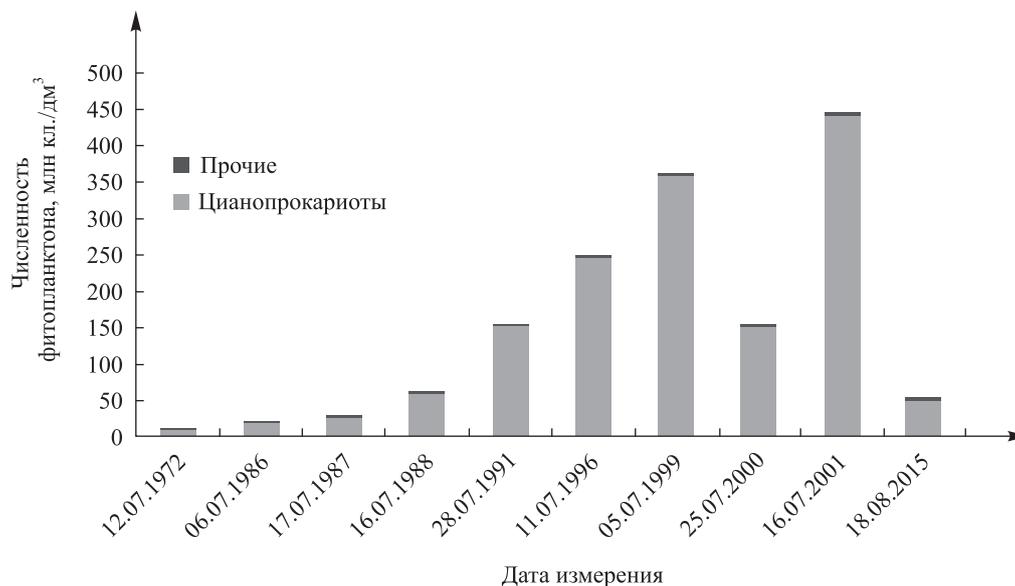


Рис. 5. Многолетние изменения летней численности фитопланктона в оз. Болойсо
Fig. 5. Long-term changes of summer quantity of phytoplankton in the Boloysko Lake

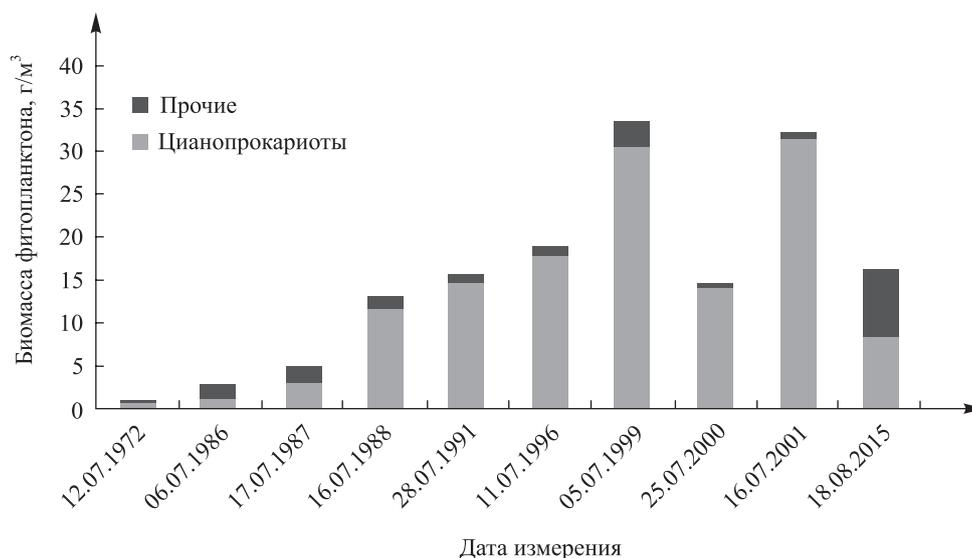


Рис. 6. Многолетние изменения летней биомассы фитопланктона в оз. Болойсо
Fig. 6. Long-term changes of summer biomass of phytoplankton in the Boloysko Lake

Наблюдаемые тенденции в изменении гидрохимического режима и фитопланктона свидетельствуют о снижении темпов эвтрофирования водоема. Вместе с тем ввиду высокой степени загрязнения водной массы и особенно поверхностного горизонта донных отложений оз. Болойсо самостоятельно, без проведения специальных мероприятий, восстановиться не сможет.

По современным представлениям главным стратегическим направлением и конечной целью восстановления нарушенной водной экосистемы должно стать создание в ней существовавших до нарушения условий жизнедеятельности биологических сообществ, обеспечивающих самоочищение водоема и качество воды в нем.

Понятие «восстановление экосистемы» подразумевает наличие сведений о ее естественном, ненарушенном состоянии, которое количественно оценивается биогенной нагрузкой на озеро, трофическим статусом и соотношением продукционно-деструкционных процессов. Сегодня, когда водосборы озер и собственно водоемы подверглись значительному антропогенному воздействию, восстановление следует понимать не как возврат экосистемы к ее начальному состоянию в геологическом прошлом,

а прежде всего как уменьшение внешней и внутренней биогенной нагрузки на озеро, прекращение поступления загрязняющих веществ в целях снижения его трофического статуса.

Большинство известных в настоящее время методов восстановления озер, как правило, представляют собой перечень мер, направленных на рекультивацию водоема. Чаще всего эти методы лишены научной концепции, базирующейся на главных теоретических положениях лимнологии: о трофическом статусе водоема и устойчивости экосистемы. Разработка такой концепции должна стать частью научно обоснованного подхода к восстановлению озерной экосистемы.

Первая группа этих методов была многократно апробирована и дала положительные результаты, вторая применяется значительно реже, и, наконец, третья группа методов разработана лишь теоретически. Применение того или иного метода зависит от особенностей водоема, вида и степени антропогенного воздействия на него, а также целей восстановления. Поэтому выбор метода или группы методов восстановления в каждом случае индивидуален.

Для борьбы с эвтрофированием разработаны две группы методов: внешние (профилактические), применяемые на водосборе, и внутренние (восстановительные), реализуемые на самом озере [9–11], что отражено в табл. 1.

Таблица 1

Мероприятия по восстановлению озер при антропогенном эвтрофировании [9]

Table 1

Measures for lakes restoration during an anthropogenic eutrophication [9]

Внешние методы	Внутренние методы
<ul style="list-style-type: none"> • Экологическое обустройство водосборов притоков • Регулирование стока и эрозии почв на водосборе методами агролугосомелиорации и с помощью гидротехники • Контроль источников биогенных элементов на водосборе • Контроль поступления биогенных элементов непосредственно в озеро • Запретительные меры • Рекомендательные меры 	<ul style="list-style-type: none"> • Аэрация, дестратификация, оксигенация • Отвод воды из гиполимниона • Разбавление озерной воды • Осаждение фосфора из озерной воды • Удаление донных отложений, славин • Контроль поступления фосфора из донных отложений • Контроль фосфороудерживающей способности озера • Контроль «цветения» воды и площади зарастания макрофитами • Биоманипуляции

Внешние мероприятия экологически более приемлемы, поскольку при этом основное внимание уделяется источнику поступления веществ, а результаты имеют долговременный характер. Данные методы призваны снизить поступление в воду биогенных веществ, тем не менее они малоэффективны в двух случаях: там, где доминируют рассредоточенные источники биогенных веществ, и там, где существенным источником биогенов являются донные отложения. Снижение биогенной нагрузки просто увеличит диффузный градиент между водой и донными отложениями, ускорив таким образом поступление автохтонного вещества из отложений в водную среду. Эта буферная способность не даст ощутимого эффекта до тех пор, пока не исчерпается запас биогенных веществ в донных отложениях. В подобных обстоятельствах профилактические меры могут быть заменены или дополнены восстановительными методами, которые основаны на удалении биогенных веществ из воды и незамедлительно позволяют получить результаты. Однако, поскольку они не устраняют первопричину проблемы, их эффективность часто бывает ограниченной и действия приходится повторять неоднократно. Многие схемы восстановления водоемов используют оба метода. К восстановительным методам прибегают реже, если удастся достичь желаемого трофического уровня и если профилактические меры способны его сохранить. Ограничивают их применение значительные материальные затраты.

На основании ранее проведенных исследований [4–8] и многолетнего мониторинга оз. Болойсо нами предложена принципиальная схема технологии восстановления водоема, включающая в себя ряд внутренних и внешних мероприятий (табл. 2; рис. 7).

Время полного восстановления озера достигает 3–4 лет с момента начала проведения работ.

Технология восстановления оз. Боллойсо

Table 2

Restoration technology for Boloyso lake

№ п/п	Мероприятия	Характеристика	Используемые устройства	Ожидаемый эффект
1	Аэрация гипolimниона с деэтрагификацией водной массы	Производится на площади 0,19 км ² методом эрлифтной циркуляции с возвращением обогащенной кислородом воды на глубину, с которой она была взята; объем аэрируемой водной массы – 0,6 млн м ³	Аэрация воды методами инжекции (подача воздуха в воду) и эжекции (подсос воздуха в воду); оптимальным представляется применение устройства, использующего энергию ветра. Производительность системы составит 80 т растворенного кислорода в сезон	Ликвидация анаэробной зоны в гипolimнионе, а также вероятности возникновения заморных явлений. Создание условий для миграции растворенных форм фосфора в эфотическую зону и последующего его вовлечения в продукционные процессы
2	Выкашивание и удаление высшей водной растительности	Осуществляется в период цветения растений по всему периметру озера на площади 0,47 км ²	В безледный период – лодка для скашивания и сбора растений BERKY (тип 6520), баржа с плавающим резаком и коллектором, электромеханические устройства (<i>JensonLakeMower, WeedRoller, LakeMaid, BeachGroomer</i>), специализированные плавающие комбайны и комбайны-амфибии (<i>AquariusSystems, TRUXOR, MOBTRAC</i>); в зимний период – ручной метод или механические косилки	Изъятие биогенных веществ, накопленных в биомассе; снижение содержания в воде разлагающегося органического вещества, улучшение кислородного режима, уменьшение биогенной нагрузки на озеро
3	Извлечение автотонной органики из поверхностных слоев озера	Очистка на берегу в районе протоки, соединяющей озеро Боллойсо и Струсто и предварительно перекрытой резиновой дамбой, что полностью защитит оз. Струсто от поступления в него загрязняющих веществ	ПАВ-озонная технология очистки (патент РФ № 2057722 от 10.04.1996 г.). При производительности установки 70 м ³ /ч за вегетационный период (120 дней) будет извлечено 35 т органического вещества при биомассе фитопланктона 35 г/м ³ , что позволит изъять свыше 350 кг фосфора	Очищение водоема от биогенных и органических веществ; фитопланктон после подсушки рекомендуется использовать в качестве органических удобрений
4	Изъятие донных отложений	Осуществляется в южной части озера на площади 0,3 км ² гидромеханизированным способом с последующим их ответвлением в биопруды; объем изымаемых донных отложений – 0,15 млн м ³	Установки для гидромеханизированной добычи с механической фрезой и грязевым насосом	Снижение внутренней нагрузки, увеличение объема воды, улучшение газового режима и повышение скорости окислительных процессов

5	Вселение пестрого толстолобика, хищных видов рыб	<p>Норма посадки двухгодовиков пестрого толстолобика – около 200–220 шт./га (за вегетационный сезон можно получить товарной продукции до 150 кг/га); после улучшения кислородного режима озера и вылова основной массы пестрого толстолобика возможно зарыбление водоема хищными рыбами, в частности судаком</p>	–	Удаление питательных веществ с выловленной икhtiомассой, улучшение кислородного режима, уменьшение ресуспендирования донных осадков после вселения хищных видов рыб
6	Строительство биоинженерных сооружений	<p>Возведение в юго-западной части озера системы, состоящей из двух последовательных биологических прудов и окислительного канала; ежегодное скашивание макрофитов, уборка пруда и очищение дна от отложений через каждые 3–5 лет</p>	<p>Каждый пруд площадью 0,1 га и глубиной до 0,5 м, площадь покрытия макрофитами – 60...80 %; стоки из прудов выпускаются в тальвеги ложбины стока, где устраиваются искусственный окислительный канал с незначительным уклоном: слой воды в канале – 0,025...0,15 м, ширина – 0,65...1,5 м, длина – 0,7 км</p>	Снижение внешней биогенной нагрузки, улучшение качества воды
7	Водоохранные мероприятия на водосборе	<p>Строительство заградительной резиновой дамбы на протоке в оз. Струсто</p>	<p>Длина дамбы – 70 м, диаметр – 1,5 м</p>	Удаление питательных веществ с выловленной икhtiомассой, улучшение кислородного режима, уменьшение ресуспендирования донных осадков после вселения хищных видов рыб
		<p>Ликвидация точечных источников, устройство лесополос вдоль южного залива; контроль качества сточных вод из очистных сооружений</p>	–	Снижение внешней биогенной нагрузки

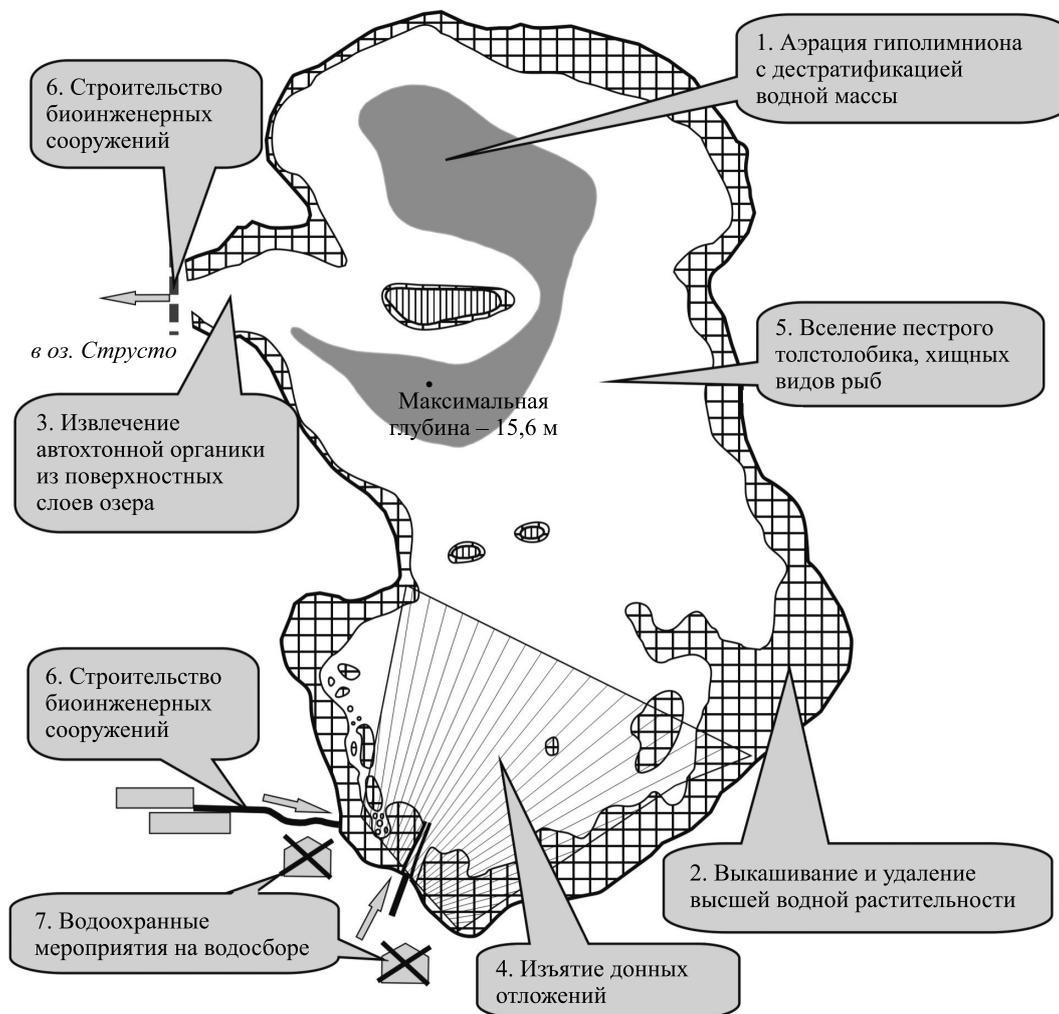


Рис. 7. Принципиальная схема технологии восстановления оз. Болойсо

Fig. 7. Schematic diagram of restoration technology for Boloysa lake

Результаты исследования, а также представленная принципиальная схема технологии восстановления озера могут применяться при определении путей охраны и очищения экосистемы водоемов, рационализации использования и воспроизводства их ресурсов, а также при целенаправленном формировании оптимальной структуры и экологическом обустройстве водосбора.

Библиографические ссылки

1. Боровик Е. А. Озера Белорусской ССР. Минск, 1964.
2. Цыганков И. В. Гидрохимический режим Brasлавских озер // Учен. зап. БГУ. Сер.: Биология. 1954. Вып. 17. С. 140.
3. Якушко О. Ф. Белорусское Поозерье. Минск, 1971.
4. Мысливец И. А., Мелешко М. А., Лешкович Л. Е. Антропогенные изменения гидрохимического режима Brasлавских озер // Вестн. БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География. 1991. № 2. С. 63–67.
5. Карташевич З. К., Кирильчик Л. М. Изменение гидрохимического режима оз. Болойсо под влиянием коммунальных сточных вод // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: материалы Междунар. науч. конф. (Минск – Нарочь, 20–25 сент. 1999 г.). Минск, 2000. С. 68–74.
6. Современное состояние озера Болойсо / З. К. Карташевич [и др.] // Природ. ресурсы. 2000. № 2. С. 104–112.
7. Самойленко В. М., Карташевич З. К. Многолетние изменения гидрохимических показателей и фитопланктона водоемов Национального парка «Браславские озера» // Природ. ресурсы. 2007. № 3. С. 16–25.
8. Самойленко В. М., Карташевич З. К. Многолетние изменения фитопланктона как показатель эвтрофирования озер Браславской группы // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем: сб. материалов Междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 23–27 окт. 2006 г.). СПб., 2007. С. 107–112.
9. Прыткова М. Я. Научные основы и методы восстановления озерных экосистем при разных видах антропогенного воздействия. СПб., 2002.
10. Сиренко Л. А., Гавриленко М. Я. «Цветение» воды и эвтрофирование. Киев, 1978.
11. Björk S. Limnological methods for environmental rehabilitation. Stuttgart, 2014.

References

1. Borovik E. A. *Ozera Belorusskoi SSR*. Minsk, 1964 (in Russ.).
2. Tsygankov I. V. *Gidrokhimicheskii rezhim Braslavskikh ozer* [Hydrochemical mode of the Braslavskye lakes]. *Uch. zap. BGU. Ser.: Biol.* 1954. Issue 17. P. 140 (in Russ.).
3. Yakushko O. F. *Belorusskoe Poozer'e*. Minsk, 1971 (in Russ.).
4. Myslivets I. A., Meleshko M. A., Leshkovich L. E. *Antropogennye izmeneniya gidrokhimicheskogo rezhima Braslavskikh ozer* [Anthropogenic changes of the hydrochemical mode of the Braslavskye lakes]. *Vestnik BGU. Ser. 2, Khim. Biol. Geogr.* 1991. No. 2. P. 63–67 (in Russ.).
5. Kartashevich Z. K., Kiril'chik L. M. *Izmenenie gidrokhimicheskogo rezhima oz. Boloiso pod vliyaniem kommunal'nykh stochnykh vod* [Change of the hydrochemical mode of the lake Boloiso under the influence of municipal sewage]. *Ozernye ekosistemy: biologicheskie protsessy, antropogennaya transformatsiya, kachestvo vody* : materialy Mezhdunar. nauchn. konf. (Minsk – Naroch', 20–25 Sept., 1999). Minsk, 2000. P. 68–74 (in Russ.).
6. Kartashevich Z. K., Samoilenko V. M., Romanov V. P., et al. *Sovremennoe sostoyanie ozera Boloiso* [The Critical Conditions of the Lake Boloiso Ecosystem at «Braslaw Lakes» National Park]. *Priir. resursy*. 2000. No. 2. P. 104–112 (in Russ.).
7. Samoilenko V. M., Kartashevich Z. K. *Mnogoletnie izmeneniya gidrokhimicheskikh pokazatelei i fitoplanktona vodoemov Natsional'nogo parka «Braslavskie ozera»*. *Priir. resursy*. 2007. No. 3. P. 16–25 (in Russ.).
8. Samoilenko V. M., Kartashevich Z. K. *Mnogoletnie izmeneniya fitoplanktona kak pokazatel' evtrofirovaniya ozer Braslavskoi gruppy* [Long-term changes of phytoplankton as an indicator of eutrofication of the Braslavskye lakes]. *Bioindikatsiya v monitoringe presnovodnykh ekosistem* : sb. materialov Mezhdunar. nauchn. konf. (Saint Petersburg, 23–27 Okt., 2006). Saint Petersburg, 2007. P. 107–112 (in Russ.).
9. Prytkova M. Y. *Nauchnye osnovy i metody vosstanovleniya ozernykh ekosistem pri raznykh vidakh antropogennogo vozdeistviya*. Saint Petersburg, 2002 (in Russ.).
10. Sirenko L. A., Gavrilenko M. Y. *«Tsvetenie» vody i evtrofirovanie*. Kiev, 1978 (in Russ.).
11. Björk S. *Limnological methods for environmental rehabilitation*. Stuttgart, 2014.

Статья поступила в редакцию 26.10.2016.
Received by editorial board 26.10.2016.