

**МЕРОПРИЯТИЯ ПО РЕКУЛЬТИВАЦИИ ЭВТРОФИРОВАННЫХ ВОДОЕМОВ**

Неверова-Дзиопак Е., Цветкова Л. И.

**RECLAMATION METHODS FOR EUTROPHICATED WATER BODIES**

Neverova-Dziopak E., Tsvetkova L. I.

**Аннотация**

В статье рассматриваются гидротехнические мероприятия по восстановлению экологического состояния уже эвтрофированных водоемов: увеличение проточности и водообмена, промывание, аэрирование и др.

Обсуждаются также биологические способы борьбы с «цветением», разведение растительноядных рыб, вселение организмов-антагонистов фитопланктона, использование макрофитов для аккумуляции биогенов и др.

**Ключевые слова:** эвтрофирование, биогенные вещества, вторичные загрязнения, аэрирование, гидродинамика водоема, рекультивация, биологические методы.

**Abstract**

The article deals with hydrotechnical measures for the renewal of ecological state of eutrophicated water bodies such as: the increase of flow capacity and water exchange, washing, aerating, etc.

The biological methods of combating the water blooms are also discussed: the breeding of herbivorous fish, introduction of phytoplankton antagonist organisms and the use of macrophytes for nutrient accumulation.

**Keywords:** eutrophication, biogenic substances, secondary pollution, aeration, reservoir hydrodynamics, reclamation, biological methods.

Надо признать что, несмотря на достижения в науке и технологиях и огромные экономические вложения в решении проблем вторичного загрязнения и деградации экосистем поверхностных вод вследствие эвтрофирования значительных успехов нет, что вызывает во всем мире все большее беспокойство [1–4].

Например, в Плане действий по Балтийскому морю записано: «Эвтрофирование — главная проблема Балтийского моря. С 1900 г. Балтийское море изменилось от олиготрофного моря с чистой водой до эвтрофной морской среды» [5]. Эвтрофикация привела к интенсивному развитию фитопланктона и «цветению» воды; избытку первичного фотосинтезируемого органического вещества; дефициту кислорода в придонных слоях воды; часто к гибели бентосных организмов и рыб; ухудшению качества воды и нарушению многих других видов водопользования [5].

Разработанные к настоящему времени меры борьбы с антропогенным эвтрофированием сводятся, в основном, к созданию водоочистных технологий, инженерных сооружений и строительных систем для ограничения поступления в водоемы соединений азота и фосфора, вызывающих «цветение» воды. Наиболее широко исполь-

зуемыми в практике техническими мероприятиями являются разнообразные методы и технологические схемы удаления биогенных веществ из сточных вод.

Множество существующих физико-химических и биологических методов удаления биогенов из сточных вод и огромное разнообразие различных модификаций технологических схем превращают выбор экономически обоснованной и экологически эффективной технологии в каждом конкретном случае в самостоятельную проблему. В качестве основного критерия выбора обычно используются весьма неопределенные «требования к степени очистки» или «к составу сточных вод», которые в большинстве случаев никак не отражают реакцию водоема на сброс очищенных стоков.

Но все технологические схемы удаления биогенов из сточных вод не гарантируют предотвращения антропогенного эвтрофирования. Несответствие действующих санитарно-гигиенических и других директивно установленных нормативов содержания в сточной и природной воде азота и фосфора реальной реакции конкретной водной системы часто приводят к необоснованно высоким капиталовложениям. Их реализация

эффективна только в том случае, если сточные воды являются основными или единственными поставщиками биогенных веществ [6].

Иногда вынос биогенов из рассеянных диффузных источников составляет основную долю поступления их в водный объект (более 90 %). Так, Польша занимает лидирующее положение по выносу азота и фосфора в Балтийское море с сельскохозяйственных угодий.

Кроме того, биогенные формы азота и фосфора могут поступать из многих других источников: поверхностный сток, рекреация, судоходство, донные отложения, атмосфера и др. Так, в Балтийское море около 75 % нагрузки азотом поступает через реки и другие водные сбросы, а 25 % азота поступает из атмосферы [5].

В таких ситуациях очистка и доочистка городских и промышленных сточных вод практически не может предотвратить эвтрофирование водного объекта.

Развитие процессов эвтрофикации в огромной степени определяется также региональными особенностями водного объекта: климат, солнечная радиация, размеры, глубина, гидродинамика, морфометрия, водохозяйственная деятельность, антропогенная нагрузка, состав и структура биоценозов и др.

Поэтому в практике водопользования имеется опыт проведения различных мероприятий по рекультивации уже эвтрофированных водоемов, которые могут использоваться и как превентивные меры. Основными из этих мероприятий являются: гидротехнические сооружения с целью улучшения гидродинамики вод (промывание, увеличение проточности и водообмена, изменение морфометрии дна, береговой линии и др.); аэрирование гипolimниона, для чего создаются аэраторы различных конструкций; удаление из водоемов донных отложений, растений и отлов рыб, аккумулирующих биогены, особенно фосфор; биологические методы воздействия на трофические цепи (акклиматизация растительноядных рыб, внедрение организмов — антагонистов водорослей и др.). Конечным результатом этих мероприятий является снижение концентраций биогенных веществ, биомассы водорослей и инактивация фосфора в донных отложениях.

Ниже приводится число различных мероприятий по восстановлению экологического состоя-

ния эвтрофированных озер в Финляндии (рис. 1) [7].

Пионерами в области рекультивации озер стали американцы. Первым рекультивированным озером было оз. Вашингтон. Наиболее радикальным способом является отведение стоков за пределы водосбора. Этим путем была уменьшена эвтрофикация Великих американских озер [8–10 и др.]. Рекультивация включает в себя различные меры, выбор которых зависит от природных условий и финансово-экономических возможностей. Применяются технические устройства для промывания, аэрации, осаднения биогенов и их дезактивации, удаление донных отложений, выкашивание высшей водной растительности, отлов рыб, питающихся фитопланктоном и удаление сейстона. Реже используются биологические методы борьбы с «цветением».

Изменение гидродинамики водоемов уже подвергшихся антропогенному эвтрофированию может лимитировать этот процесс и повернуть его вспять. Такими методами возможно снизить концентрацию основных питательных веществ или уменьшить содержание одного из компонентов до лимитирующего минимума, а также увеличить биосток, т. е. скорость удаления из озера планктонных водорослей. Промывание основано на принудительном поступлении вод, бедных биогенными веществами. Это возможно при наличии вблизи водоема источника такой воды, так как переброска воды на далекие расстояния не рентабельна. Водообмен в озерах должен производиться несколько раз в год. Эффективнее всего в этом случае подавать воды с территорий, которые находятся за пределами естественного водосбора, что возможно только тогда, когда водораздел находится достаточно близко и на небольшой высоте относительно уреза воды.

В литературе можно найти много примеров промывания озер как средства их рекультивации. Оз. Мозес в штате Вашингтон промывали 2 раза в год, используя воду из р. Колумбии. В результате концентрация хлорофилла снизилась почти на 60 %. Подобным образом была успешно проведена рекультивация оз. Грин в г. Сиэтле и оз. Буффало в штате Калифорнии [3].

Другим примером может служить предложенная Р. Е. Нежиховским еще в 1985 г. перепланировка наиболее неблагоприятного в экологиче-

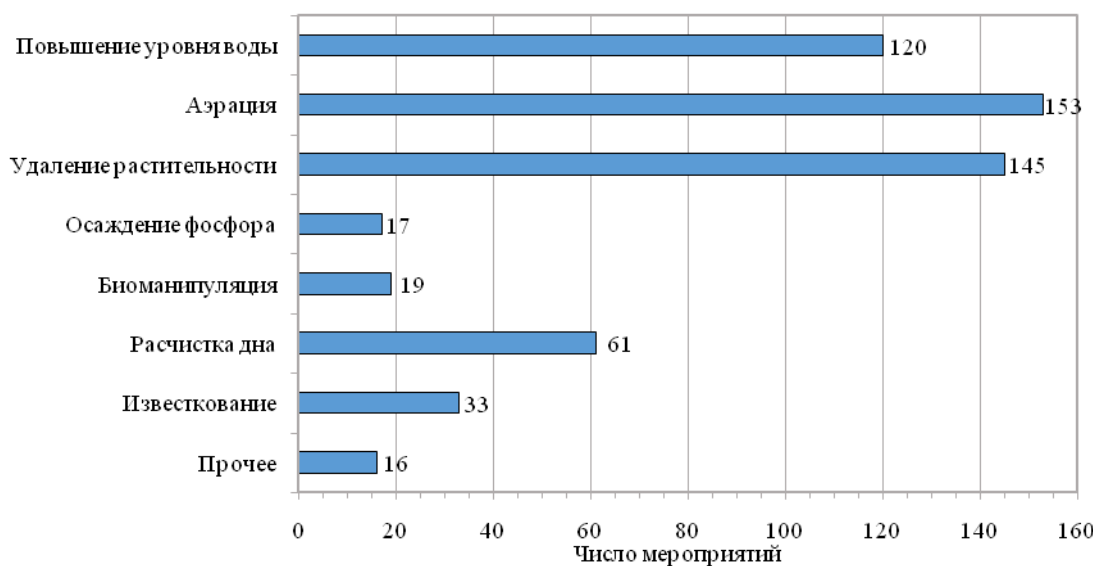


Рис. 1. Число мероприятий по рекультивации эвтрофированных озер в Финляндии

ском отношении юго-восточного угла Невской губы [11]. Он предложил следующее: береговая линия в пределах Южно-Лахтинской отмели отодвигается к Западу и ей придается овальное очертание. На траверзе «гавань Васильевского острова — Золотые ворота» сооружается новый морской канал длиной 5 км и шириной 200 м. Чтобы отклонить водный поток и направить его вдоль восточного берега губы, с одной стороны прорези ставится разделительная стенка, с другой — струнаправляющая конструкция. При реализации этого проекта расход воды, направляющейся в юго-восточный застойный угол, должен увеличиться примерно с 20–50 до 200–250 м<sup>3</sup>/с, а средняя скорость стокового течения будет 2–3 м/с вместо 0,5–1,0 см/с. Отсутствие вдольберегового течения (в зоне 1,5–2,0 км от берега) будет наблюдаться лишь при западном ветре 6–7 м/с (вместо 2–3 м/с), а обратное течение возникнет только при западном ветре 8 м/с (вместо 4 м/с). Число суток с неблагоприятной гидрометеорологической ситуацией уменьшится с 8 до 2 в месяц. Такие мероприятия по переустройству юго-восточного угла Невской губы могут оказать положительное влияние на ее экологическое состояние, особенно восточнее п. Стрельны, где находятся Константиновский дворец и Юго-Западные очистные сооружения (ЮЗОС). К сожалению, этот проект не был реализован.

Разновидностью промывания является отведение сильно эвтрофированных вод гиполимниона и введение на их место вод, насыщенных кислородом. В практике этот метод основан на устройстве водозабора в гиполимнионе, который засасывает воду и перебрасывает ее в реку ниже озера по принципу сифона.

Недостатком этого метода является то, что забор холодной воды из гиполимниона летом и отведение ее в реку может изменить температурный режим и неблагоприятно воздействовать на экосистему.

Еще одним вариантом рекультивации озера может быть его осушение с последующим наполнением водами естественного стока и из подземных источников.

Достаточно часто применяется аэрирование водоемов с целью воздействия на процессы обмена соединениями фосфора в зоне контакта между донными отложениями и водой, а также для улучшения циркуляции воды. Известно, что обмен между грунтом и водой регулируется окислительно-восстановительными условиями по обе стороны зоны контакта. Для ликвидации бескислородной области, обогащенной продуктами анаэробного распада и биогенными веществами, успешно может применяться принудительная аэрация. Воздействие на антропогенное эвтрофирование и восстановление качества воды и экологического состояния водоема этим способом приобретает

широкое распространение. Совершенствуются и становятся все более разнообразными технические решения этой задачи [6].

Аэрация, как правило, осуществляется перемешиванием воды либо подачей сжатого воздуха. Устранение дефицита кислорода в глубинных слоях задерживает выход фосфора из донных отложений и замедляет его оборачиваемость. На практике аэрирование часто осуществляется с помощью воздухопроводов. Но этот метод может приводить к нарушению стратификации вод, что в зависимости от условий может иметь как положительные, так и отрицательные последствия.

Аэрирование без нарушения стратификации требует более сложной техники. Сооружение, показанное на рис. 1, а, состоит из цилиндра диаметром 2 м, нижняя поверхность которого находится немного выше дна озера. Воздух, поступающий по трубопроводу, поднимает воду, которая после аэрирования по боковым рукавам снова попадает в гипolimнион. Избыток воздуха поднимается на поверхность, не нарушая стратификации.

В системе, представленной на рис. 2, б, вода гипolimниона аэрируется в специальном бассейне, расположенном на берегу озера. Вместе с воздухом в бассейн можно ввести реагенты для химического осаждения фосфора, который позднее будет связан в донных отложениях.

Аэрирование донных отложений можно осуществлять, вводя в них окислители (перманганат калия или нитраты). Это достаточно эффективный метод связывания фосфора.

Для замедления вторичного поступления фосфора в воду из донных отложений предлагалась

его изоляция от воды путем нанесения на поверхность дна тонко раздробленных материалов: глины, вулканических пород и др. Однако широкого применения этот метод не нашел.

Удаление донных отложений является очень дорогим способом рекультивации. Кроме того, существует опасность освобождения из них фосфора в процессе очистки. Удаление отложений при спуске воды — значительно более простой способ, который способствует обогащению ила кислородом. В водоемах, перегороженных плотинами, можно частично удалить осадки, вызывая сильное придонное течение, вызванное интенсивным спуском воды при открытии нижнего шлюза плотины. Этот метод применяется также для снижения заиления дна и увеличения пропускной способности водоема.

Для устранения цветения и зарастания применяют также обработку водоемов сульфатом меди, выкашивание прибрежной растительности и ее механическое удаление. Эти мероприятия могут привести к уменьшению запасов биогенных веществ в водоеме, только если отмершие водоросли и укусы высшей водной растительности, которые аккумулируют и извлекают из воды биогены, будут увезены за пределы водосбора.

Рыбы накапливают большое количество фосфора (среднее содержание Р в биомассе рыб — 0,7 %), поэтому отлов рыбы может существенно снизить биогенную нагрузку.

Наиболее перспективной мерой является разведение в водоемах растительноядных рыб. В России проведены опыты по акклиматизации белого амура и толстолобика в пресноводных водоемах [12–14].

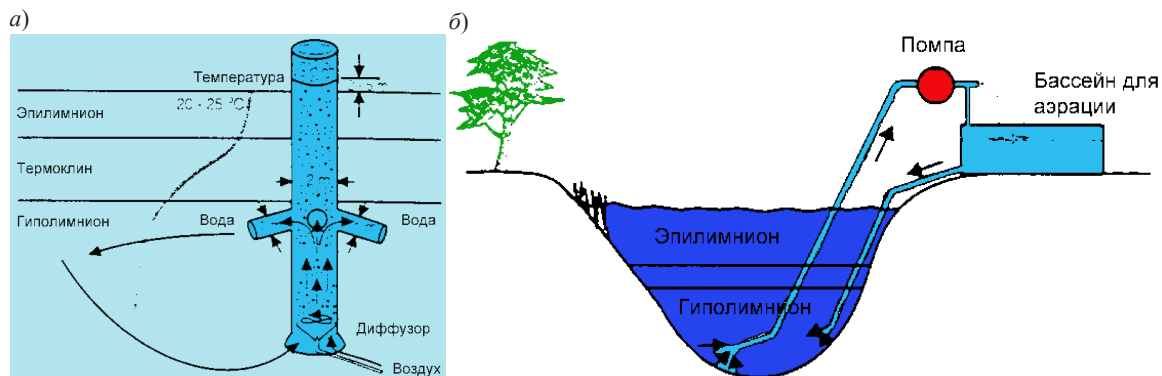


Рис. 2. Сооружения для аэрирования водоемов без нарушения стратификации вод: а — сооружение для аэрирования без нарушения стратификации; б — аэрирование гипolimниона в бассейне на берегу

Для аккумуляции биогенов можно использовать и естественные прибрежные заросли макрофитов с последующим их удалением. Введение организмов (грибов, бактерий, вирусов), атакующих водоросли иногда также может принести положительные результаты.

Однако ввиду сложных взаимодействий между организмами биоманипуляционные методы требуют очень хорошего знания биологических механизмов. Недостаточное их знание может привести к цепи неконтролируемых реакций и результатам, обратным ожидаемым.

Так, например, широко пропагандируемый ООО НПО «Альгобиотехнологии» метод борьбы с цветением сине-зеленых водорослей путем вселения в водоем зеленой водоросли хлореллы (так называемый метод «альголизации» водоемов) не имеет никакого научного обоснования и доказательств его эффективности. Он встретил резкую критику со стороны авторитетных ученых и известных специалистов ведущих институтов Российской Академии наук. Критика этого метода отражена также в решении XI съезда Гидробиологического общества РАН, проходившего 22–26 сентября 2014 г. в г. Красноярске [15–17].

Таким образом, существует много методов, способов и технологий для снижения внешней и внутренней нагрузки биогенных веществ и рекультивации водоемов. Но само по себе снижение концентраций биогенных веществ в поверхностных водах не всегда может предотвратить их эвтрофирование, которое определяется также комплексом других, не менее важных, климатических, гидрографических, морфометрических, антропогенных и других факторов. Поэтому для принятия решения о выборе технологии очистки или методе рекультивации, предварительно необходимо определить приоритетные факторы, формирующие трофический статус водоема или водотока и их возможности компенсировать биогенные нагрузки (экологический резерв водоема).

Для достижения оптимального экологического и экономического эффекта по предотвращению антропогенного эвтрофирования и рекультивации уже эвтрофированных поверхностных вод необходимо: определение удельного веса различных естественных и антропогенных источников поступления биогенных веществ; разработка научных основ и методологии оцен-

ки экологического резерва водоема или водотока, для обоснования расчетов экологически допустимых нагрузок биогенных веществ, планирование и разработка именно системных инженерно-технических водоохраных мероприятий.

При разработке таких мероприятий целесообразно опираться на фундаментальные законы экологии. Например, концепция лимитирующих факторов Либиха [18] дает ключ к управлению экосистемами. Поэтому нужно выявлять биогенный элемент, лимитирующий эвтрофирование. Так, в Невской губе, например, таким элементом является фосфор. Достаточно его концентрацию свести до экологического минимума, чтобы приостановить эвтрофирование водоема. Это избавляет от необходимости удалять азот и резко снижает капиталовложения на очистку сточных вод. На основе того же закона минимума Либиха следует научно обосновывать мероприятия по рекультивации водоемов.

#### Литература

1. Алексеев, М. И., Цветкова, Л. И., Неверова-Дзиопак, Е. В. (1999). Обеспечение экологической безопасности водоемов при сбросе сточных вод. В: *Сб. докл. науч. чтений, посвящ. 100-летию со дня рождения С. М. Шифрина*. СПб.: СПбГАСУ, сс. 8–17.
2. Фурман, Е., Мунстерхельм, Р., Салемаа, Х. (2002). Балтийское море. Окружающая среда и экология. Хельсинки: Digitone Oy, 24 с.
3. Neverova-Dziopak, E. (2007). *Ekologiczne aspekty ochrony wod powierzchniowych*. Rzeszow: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 103 с.
4. Neverova-Dziopak, E. (2010). *Podstawy zarzadzania procesem eutrofizacji antropogenicznej*. Krakow: AGH, 132 с.
5. (2008). *План действий Хелком по Балтийскому морю, Министерское заседание Хелком, Краков, Польша, 15 ноября 2007 г.* СПб.: Изд-во «Диалог», 112 с.
6. Неверова-Дзиопак, Е. (2003). Теоретическое, методологическое и инженерное обеспечение охраны поверхностных вод от антропогенного эвтрофирования. Дис. ... д.т.н. СПб., 342 с.
7. Ministry of Foreign Affairs of Finland (1993). *Advanced Environmental Technology from Finland*. Helsinki: WSOY, 380 p.
8. Bierman, V. I. (1979). A Comparison of models developed for phosphorus management in the Great Lakes. In: *Proceedings of the IJC/Cornell University Conference on "Phosphorus Management Strategies for the Great Lakes"*, Rochester, New York, pp. 178–186.
9. Chapra, S. (1977). Total phosphorus model for the Great Lakes. *Journal of the environmental engineering division*, vol. 103, № EE2, pp. 147–161.



10. Moss, B. (1982). Studies on Gull Lake Michigan. II Eutrophication evidence and prognosis. *Fresh-water boil*, vol. 2, № 4, pp. 18–25.

11. Нежиховский, Р. А. (1985). Вопросы формирования качества воды реки Невы и Невской губы. Л.: Гидрометеоздат, 106 с.

12. Абросов, В. И., Бауэр, О. Н. (1955). О разведении белого амура в СССР. *Вопросы ихтиологии*, № 3, сс. 129–134.

13. Танасийчук, Н. Н. (1961). Об акклиматизации белого амура в низовьях Волги. *Вопросы ихтиологии*, вып. 17, сс. 176–178.

14. Торканов, А. М. (2004). Акклиматизация рыб на камчатке в XX веке. В: *Сб. «Камчатка: прошлое и настоящее»*. Петропавловск-Камчатский, сс. 213–218.

15. Богданов, Н. И. (2008). Биологические основы предотвращения «цветения» Пензенского водохранилища сине-зелеными водорослями. Пенза: РИО ПГХСА, 76 с.

16. Бульон, В. В. (ред.) (2008). О книге Н. И. Богданова «Биологические основы предотвращения "цветения" Пензенского водохранилища сине-зелеными водорослями». СПб.: Лемма, 17 с.

17. (2014). Решение XI съезда ГБО РАН. Доступно по: <http://gboran.ru/wp-content/uploads/2014/12/pdf>.

18. Цветкова, Л. И. (ред.) (2012). Экология. 3-е изд. СПб.: Изд-во ООО «Новый журнал», 452 с.

#### References

1. Alekseev, M. I., Cvetkova, L. I., Neverova-Dziopak, E. V. (1999). Obespechenie ehkologicheskoy bezopasnosti vodoemov pri sbrose stochnyh vod [Ensuring the environmental safety of water bodies in wastewater discharge]. In *Sb. dokl. nauch. chtenij, posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya S. M. Shifrina*. SPb.: SPbGASU, pp. 8–17.

2. Furman, E., Munsterh'elm, R., Salemaa, H. (2002). *Baltijskoe more. Okruzhayushchaya sreda i ehkologiya* [Baltic Sea. Environment and Ecology]. Hel'sinki: Digitone Oy, 24 s.

3. Neverova-Dziopak, E. (2007). *Ekologizne aspekty ochzony wod powierzchniowych* [Ecologic aspects of surface water protections]. Rzeszow: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 103 p. (in Polish).

4. Neverova-Dziopak, E. (2010). *Podstawy zarzadzania procesem eutrofizacji antropogenicznej* [Basics of managing the anthropogenic eutrophication process]. Krakow: AGH, 132 p. (in Polish).

5. (2008). Plan dejstvij Helkom po Baltijskomu moryu, Ministerskoe zasiedanie Helkom, Krakow, Pol'sha, 15 noyabrya 2007 g. [Action Plan for the Baltic Sea Helcom, Ministerial Meeting Helcom, Krakow, Poland, 15 November 2007]. SPb.: Izd-vo «Dialog», 112 p. (in Russian).

6. Neverova-Dziopak, E. (2003). *Teoreticheskoe, metodologicheskoe i inzhenernoe obespechenie ohrany poverhnostnyh vod ot antropogennogo ehvtrofirovaniya* [Theoretical, methodological and engineering support of surface water protection from anthropogenic eutrophication]. Diss. na soisk. uch. stepeni d.t.n. SPb., 342 p. (in Russian).

7. Ministry of Foreign Affairs of Finland (1993). *Advanced Environmental Technology from Finland*. Helsinki: WSOY, 380 p.

8. Bierman, V. I. (1979). A Comparison of models developed for phosphorus management in the Great Lakes. In: *Proceedings*

of the IJC/Cornell University Conference on “Phosphorus Management Strategies for the Great Lakes”, Rochester, New York, pp. 178–186.

9. Chapra, S. (1977). Total phosphorus model for the Great Lakes. *Journal of the environmental engineering division*, vol. 103, № EE2, pp. 147–161.

10. Moss, B. (1982). Studies on Gull Lake Michigan. II Eutrophication evidence and prognosis. *Fresh-water boil*, vol. 2, № 4, pp. 18–25.

11. Nezhilovskij, R. A. (1985). *Voprosy formirovaniya kachestva vody reki Nevy i Nevskoj guby* [The issues of formation of water quality of the Neva River and the Neva Bay]. L.: Gidrometeoizdat, 106 p. (in Russian).

12. Abrosov, V. I., Bauehr, O. N. (1955). O razvedenii belogo amura v SSSR. *Voprosy ihtologii*, № 3, pp. 129–134. (in Russian)

13. Tanasijchuk, N. N. (1961). Ob akklimatizacii belogo amura v nizov'yah Volgi [Acclimatization of the white Amur in the lower reaches of the Volga]. *Voprosy ihtologii*, vol. 17, pp. 176–178. (in Russian).

14. Torkanov, A. M. (2004). Akklimatizaciya ryb na kamchatke v XX veke [Acclimatization of fish on the Kamchatka Peninsula in the XX century]. In: *Kamchatka: proshloe i nastoyashchee*. Petropavlovsk-Kamchatskij, pp. 213–218. (in Russian).

15. Bogdanov, N. I. (2008). *Biologicheskie osnovy predotvrashcheniya «cveteniya» Penzenskogo vodohranilishcha sinezelenymi vodoroslyami* [Biological basis for preventing the «blooming» of the Penza reservoir with blue-green algae]. Penza: RIO PGHSA, 76 p. (in Russian).

16. Bulon, V. V. (ed.) (2008). *O knige N. I. Bogdanova «Biologicheskie osnovy predotvrashcheniya «cveteniya» Penzenskogo vodohranilishcha sinezelenymi vodoroslyami* [About the book of N. I. Bogdanov «Biological basis for preventing “flowering” of the Penza reservoir with blue-green algae»]. SPb: Lemma, 17 p. (in Russian).

17. (2014). *Reshenie XI sezda GBO RAN* [Decision of the XI congress of the GAO RAS]. Available at: <http://gboran.ru/wp-content/uploads/2014/12/pdf>.

18. Cvetkova, L. I. (ed.) (2012). *Ekologiya* [Ecology]. SPb.: Izd-vo ООО «Novyj zhurnal», 452 p. (in Russian).

#### Авторы

**Неверова-Дзиopak Елена**, д-р техн. наук, профессор  
Горно-Металлургическая академия, г. Краков  
E-mail: elenaa@agh.edu.pl

**Цветкова Людмила Ивановна**, д-р биол. наук, профессор  
Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет

E-mail: tsv\_liudmila@mail.ru

#### Authors

**Neverova-Dziopak Elena**, Dr. of Engineering, professor  
AGH University of Science and Technology, Krakow  
E-mail: elenaa@agh.edu.pl

**Tsvetkova Lyudmila Ivanovna**, Dr of Biology, professor  
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: tsv\_liudmila@mail.ru