Научный журнал https://sibran.ru/journals/GIPR/

ИССЛЕДОВАНИЯ В БАССЕЙНЕ БАЙКАЛА

УДК 574.635 DOI: 10.15372/GIPR20240310

О.В. ИЛЬИНА*, В.В. ИЛЬИНСКИЙ*, ДЖ. ГРИМАЛЬДИ, Б. ВАГАСКА***, Т. ОХЕДА УРИБЕ****, А. РЕЙЕС САЛАМАНКА******

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, ulesya@gmail.com, vladilinskiy@gmail.com
**Брэдфордский университет,
BD7, Брэдфорд, Ричмонд-роуд, 1DP, Великобритания, grimaldi.giulia@gmail.com
***Университет Осло, 0315, Осло, ул. Проблемвейен, 7, Норвегия, vagaska.b@gmail.com
****Культурная, туристская и экологическая ассоциация «Mar and Terra»,
5860000, Орнопирен, Чили, tamaraojedaur@gmail.com, sreyes.alexis@gmail.com

ОБРАЩЕНИЕ С ЖИДКИМИ БЫТОВЫМИ ОТХОДАМИ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗОНЕ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

Показано увеличение концентраций загрязняющих веществ в зонах сброса сточных вод в прибрежных водах оз. Байкал и его притоках, заметно превышающее фоновые показатели. Отмечено присутствие в этих зонах очагов массового развития зеленой нитчатой водоросли, что может служить признаком локального эвтрофирования. Проанализированы параметры работы четырех канализационных очистных сооружений, расположенных в центральной экологической зоне Байкальской природной территории (ЦЭЗ БПТ). На всех исследованных предприятиях отмечаются стабильные нарушения установленных нормативов, в ряде случаев предельно допустимые концентрации превышены в сотни раз. При этом нормативные требования, установленные для сточных вод в ЦЭЗ БПТ, являются беспрецедентно строгими и не имеют аналогов в мире. Для их выполнения по ряду показателей требуется достижение эффективности очистки, превышающей 98–99 %. Наилучшие доступные технологии позволяют достигать эффективности по этим показателям в пределах 85–97 %, а канализационные очистные сооружения в ЦЭЗ БПТ оперируют устаревшими технологиями, не предусматривающими извлечение биогенных соединений из состава сточных вод. С момента введения региональных нормативов рассмотренные предприятия не приблизились к их выполнению, поскольку практически не подвергались модернизации. Предлагается корректировка этих нормативов до уровня значений, соответствующих реально достижимым при использовании наилучших доступных технологий с учетом экономических возможностей региона. Утверждению скорректированных нормативов должно предшествовать реальное тестирование этих технологий на байкальских канализационных очистных сооружениях.

Ключевые слова: *оз. Байкал, эвтрофирование, биологическая очистка сточных вод, глубокое извлечение соединений азота и фосфора, нормирование сточных вод.*

O.V. IL'INA*, V.V. IL'INSKII*, G. GRIMALDI, B. VAGASCA***, T. OJEDA URIBE****, A. REYES SALAMANCA******

*Lomonosov Moscow State University,
119991, Moscow, Leninskie gory, 1, Russia, ulesya@gmail.com, vladilinskiy@gmail.com
**University of Bradford, BD7, Bradford, Richmond Road, 1DP, Great Britain, grimaldi.giulia@gmail.com
***University of Oslo, 0315, Oslo, Problemvejen, 7, Norway, vagaska.b@gmail.com
**** Agrupacion Cultural, Turistica y Medioambiental Mar y Tierra,
5860000, Hornopiren, Chile, tamaraojedaur@gmail.com, sreyes.alexis@gmail.com

WASTEWATER TREATMENT IN THE CENTRAL ECOLOGICAL ZONE OF THE BAIKAL NATURAL TERRITORY

Increased concentrations of pollutants in wastewater discharge zones of the Lake Baikal coastal waters and tributaries are detected. Green filamentous algae, an indicator of the local eutrophication, are shown to be present in wastewater discharge

zones. The technical parameters of four wastewater treatment facilities located in the central ecological zone of the Baikal Natural Territory have been analyzed. The plants do not meet the requirements for key indicators and do not have the technical capacity to improve efficiency. The maximum permissible concentrations are exceeded hundreds of times for a number of parameters. The wastewater standards established for the Baikal Natural Territory are unprecedentedly strict and have no analogues in the world. For their implementation the cleaning efficiency exceeding 98–99 % in some cases must be achieved. The best available technologies allow to reach the efficiency within 85–97 %, but the wastewater treatment facilities under study operate with outdated technologies which are not designed for the extraction of biogenic compounds from wastewater. Since the introduction of regional standards, the plants in question have not come close to their implementation nor have been modernized. The frustrating requirements of regulatory framework presumably hampers the modernization processes. It is proposed to adjust the wastewater treatment standards to the realistic level of values corresponding to those actually achievable when using the best available technologies. The economic capabilities of the region must be taken into account as well. The model testing of adjusted standards should be preceded by the pilot modernization of wastewater treatment technologies.

Keywords: *Lake Baikal, eutrophication, biological wastewater treatment, effective extraction of nitrogen and phosphorus compounds, wastewater treatment regulations.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в пределах Байкальской природной территории (БПТ) действует Приказ № 83 [1], сменивший Приказ № 63 [2]. Обе версии приказа регулируют предельно допустимое антропогенное воздействие на уникальную экологическую систему оз. Байкал. Невзирая на ранее принятые для охраны озера меры, с 2011 г. на Байкале наблюдаются признаки локального эвтрофирования. Они проявляются в прибрежной зоне в виде участков массового развития зеленой нитчатой водоросли спирогиры (*Spirogyra* sp.), занимающей на отдельных участках до 100 % поверхности дна. На этих участках нарушается зональность и наблюдается деградация сообществ фитобентоса [3, 4].

Известно, что процесс эвтрофирования водных объектов напрямую связан с антропогенной нагрузкой, в том числе с поступлением в них биогенных элементов в составе сточных вод [5]. В литературе уже отмечалась техническая невыполнимость действующих новых нормативов для канализационных очистных сооружений (КОС) [6] и предлагались дорогостоящие схемы, включающие полную транспортировку сточных вод за пределы центральной экологической зоны (ЦЭЗ) Байкала [7].

Цель настоящей работы — анализ воздействия сброса сточных вод на состояние импактных зон оз. Байкал и обоснование с учетом полученных данных необходимости изменения текущего подхода к нормированию сточных вод в ЦЭЗ БПТ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В январе 2019 г. нами были собраны и проанализированы данные о работе КОС в трех крупных населенных пунктах, расположенных в пределах ЦЭЗ БПТ. Всего было рассмотрено четыре предприятия: «Город» и «Квартал» (ООО «Слюдянское УКС», г. Слюдянка), МУП «КОС БМО» (г. Байкальск), МП «Жилищник» (г. Северобайкальск). Эти предприятия различались по году ввода в эксплуатацию (1982–2010 гг.), по производительности (800–12 000 м^3/сут), техническому состоянию («Город» — аварийное, остальные работают штатно), методам доочистки и обеззараживания стоков, конструкции аэротенков, типу сбросов (в пруд-аэратор и через рассеянный сброс в оз. Байкал — КОС «БМО», в притоки оз. Байкал — остальные КОС). В соответствии с установленными в 2010 г. нормативами (Приказ № 63), сточные воды КОС классифицировались как сбрасываемые непосредственно в оз. Байкал (КОС «БМО») либо как сбрасываемые в водные объекты в пределах центральной и буферной зон БПТ (остальные КОС). Согласно новому (2020 г.) Приказу № 83, сточные воды КОС теперь классифицируются как сбрасываемые в оз. Байкал (КОС «БМО»), сбрасываемые в пределах ЦЭЗ при нагрузке 2500–12 500 чел. — 501–2500 м^3/сут (КОС «Квартал») либо при нагрузке >12 500 чел. — 2500 м^3/сут (остальные КОС).

В анализируемую нами выборку входят все категории предприятий на территории ЦЭЗ БПТ, различающихся по производительности, техническому состоянию и типам сброса очищенных сточных вод. На остальных крупных предприятиях также реализован метод полной биологической очистки сточных вод в аэротенках. Таким образом, представленные предприятия можно рассматривать как репрезентативную выборку КОС, функционирующих в пределах ЦЭЗ БПТ. Отчетные данные о составе сточных вод и содержании загрязняющих веществ в районе их сбросов были нам предоставлены администрациями КОС. Выборка включает средние данные, рассчитанные по результатам регулярных измерений. Они проводились с частотой пять раз в неделю персоналом КОС за следующие

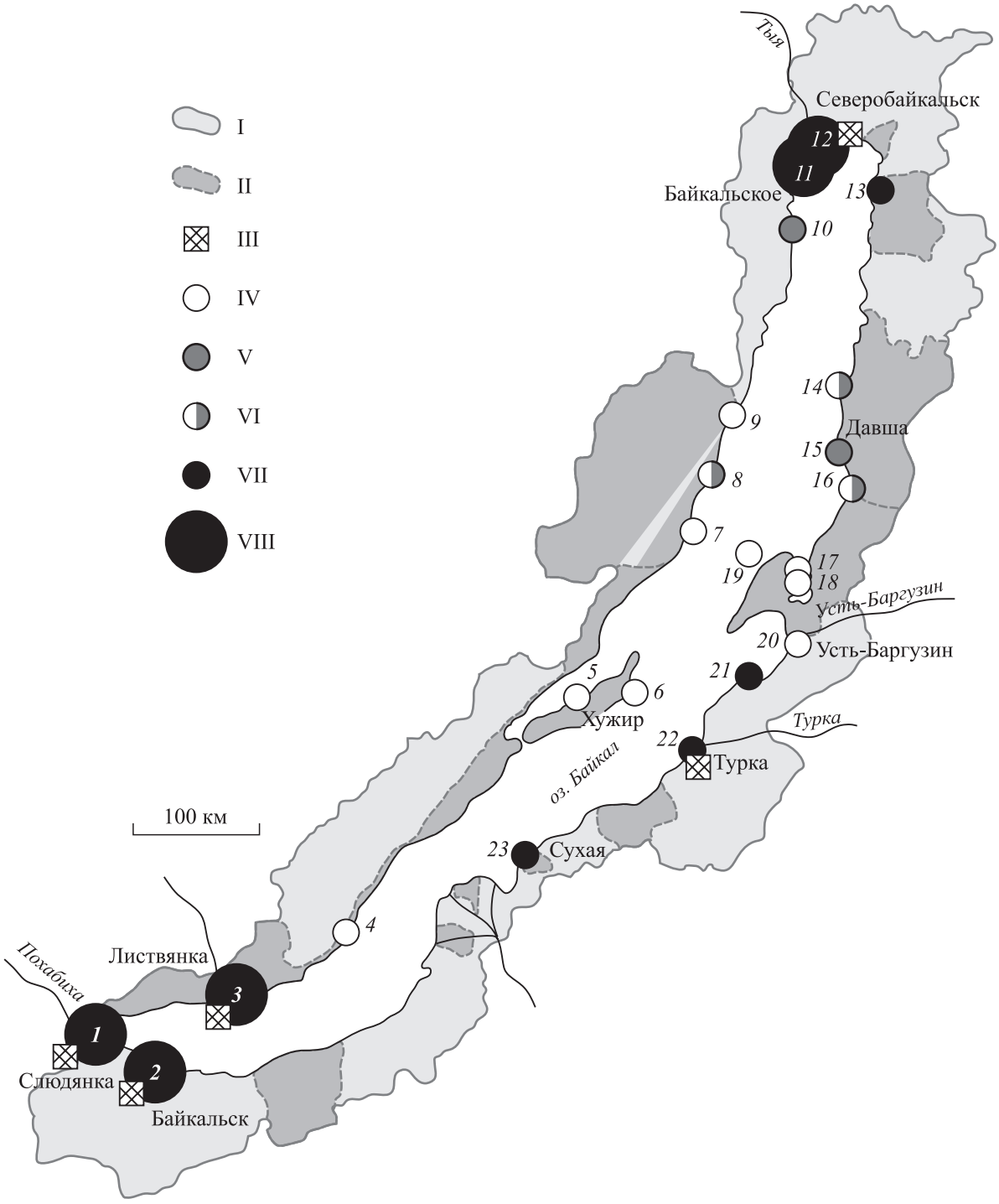

Рис. 1. Расположение станций наблюдения (*1–23*) и признаки развития *Spirogyra* sp.

I — центральная экологическая зона байкальской природной территории; II — ООПТ; III — КОС (точка сброса расположена вблизи места проведения наблюдений); IV — прибрежная зона оз. Байкал, спирогира не обнаружена; V — спирогира обнаружена в слабопроточных мелководных водоемах, сообщающихся с оз. Байкал; VI — спирогира обнаружена в слабопроточных мелководных водоемах, но не обнаружена в сообщающихся с ними участках оз. Байкал; VII — отдельные признаки присутствия спирогиры в прибрежной зоне оз. Байкал; VIII — массовое развитие спирогиры в прибрежной зоне оз. Байкал.

периоды: КОС «Квартал» — июнь–сентябрь 2018 г.; КОС «Город» — март, июнь–август 2018 г.; МП «Жилищник» — январь–декабрь 2018 г.; КОС «БМО» — январь–декабрь 2017 г.

В ходе экспедиции в январе 2019 г. нами были собраны пробы очищенных сточных вод на КОС, а также пробы воды из ряда притоков оз. Байкал и из самого озера. Пробы были зафиксированы согласно соответствующим нормативным документам и оперативно переданы в аккредитованную лабораторию ЗАО «Главный контрольно-испытательный центр питьевой воды» (Москва), где проводился их анализ. Время пробоотбора соотносилось с сезонными максимумами концентраций нитратов и фосфатов и сезонными минимумами содержания аммоний-иона, наблюдаемыми в водах оз. Байкал.

Подводные погружения и оценку состояния фитобентосных сообществ осуществляли Д. Гримальди (Великобритания) и Б. Вагаска (Норвегия) — команда проекта Diving off the Beaten Waves. Пробоотбор на водоеме и фиксация проб воды были сделаны специалистами из экологической организации Mar y Tierra (Чили).

В ходе анализа использовались аттестованные в РФ методики измерения — массовых концентраций взвешенных веществ [8], БПК после *n*-дней инкубации [9], массовой концентрации аммонийного азота [10], массовой концентрации нитрит-ионов [11], массовой концентрации нитрат-ионов [12], массовых концентраций ортофосфатов, полифосфатов и общего фосфора [13], массовой концентрации анионных поверхностно-активных веществ (аПАВ) [14], массовой концентрации нефтепродуктов [15].

Для удобства проведения сравнительного анализа полученных данных все гидрохимические показатели были пересчитаны в формат, используемый в нормативных документах [1, 2]. При пересчете форм БПК использовано усредненное соотношение для бытовых сточных вод $БПК_5/БПК_{полн}$ = = 0,6–0,7 [16]. Необходимо отметить, что соотнесение показателей КОС по данному параметру с нормативами носит справочный характер.

Сборы фитобентоса проводили в ходе летних экспедиций в июле 2016 г. (станции 1–22) и сентябре 2019 г. (ст. 1, 20, 22, 23) (рис. 1). Состояние фитобентосных сообществ в прибрежной полосе оценивали с берега и с борта судна на глубине от 0,5 до 2 м (ст. 1, 8, 10–12, 14–17, 20–23), а также до 25 м — в ходе подводных погружений (ст. 2–7, 9, 13, 18, 19). Образцы макрофитов отбирали ручным способом, их либо анализировали в полевых условиях, либо фиксировали до анализа раствором формалина (6 %). Пробы просматривали с помощью светового микроскопа при рабочих увеличениях ×10 и ×40. Доминирующие в пробах воды нитчатые водоросли определяли до рода, используя атлас-определитель [17].

Фактическую эффективность очистки ($Э_ф$) по каждому параметру рассчитывали по формуле

$$Э_ф = (1 - C_{вых}/C_{вх}) \times 100\ \%\ [18],$$

где $C_{вх}$ — концентрация анализируемого параметра в сточных водах до очистки, мг/л; $C_{вых}$ — концентрация анализируемого параметра в сточных водах после всех этапов очистки, мг/л.

Пороговую эффективность, необходимую для соблюдения установленных приказами № 63 ($Э_{п63}$) и № 83 ($Э_{п83}$) норм, вычисляли по формулам:

$$Э_{п63} = (1 - ПДК_{63}/C_{вх}) \times 100\ \%;\ Э_{п83} = (1 - ПДК_{83}/C_{вх}) \times 100\ \%,$$

где $ПДК_{63}$ и $ПДК_{83}$ — предельно допустимые концентрации соединений согласно приказам № 63 и 83 соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На всех рассмотренных КОС наблюдались стабильные показатели очистки по основным параметрам: взвешенным веществам ($Э_ф$ 81,0–98,7 %), органическим веществам (БПК) ($Э_ф$ 96,1–98,8 %) (рис. 2, табл. 1), аПАВ ($Э_ф$ 66,8–94,7 %) и нефтепродуктам ($Э_ф$ 89,6–94,8 %). Соединения групп азота и фосфора в процессе очистки минерализуются до нитратов и фосфатов, но не удаляются. Концентрация нитратов возрастает в ходе очистки в 2,7–24 раза, концентрация фосфатов практически не изменяется ($Э_ф$ 3,8–15,4 %) (рис. 3, табл. 2).

Концентрации фосфатов (в пересчете на фосфор) в реках Тые и Похабихе возрастали ниже зоны сбросов в среднем в 5,6 и 25 раз соответственно (табл. 3). Статус вод данных рек в результате сохранялся олиготрофным, но при этом, согласно эколого-санитарной классификации [19], воды рек переходили из категорий «вполне чистая» (р. Тыя) и «предельно чистая» (р. Похабиха) в категорию «слабо загрязненные» (рис. 4).

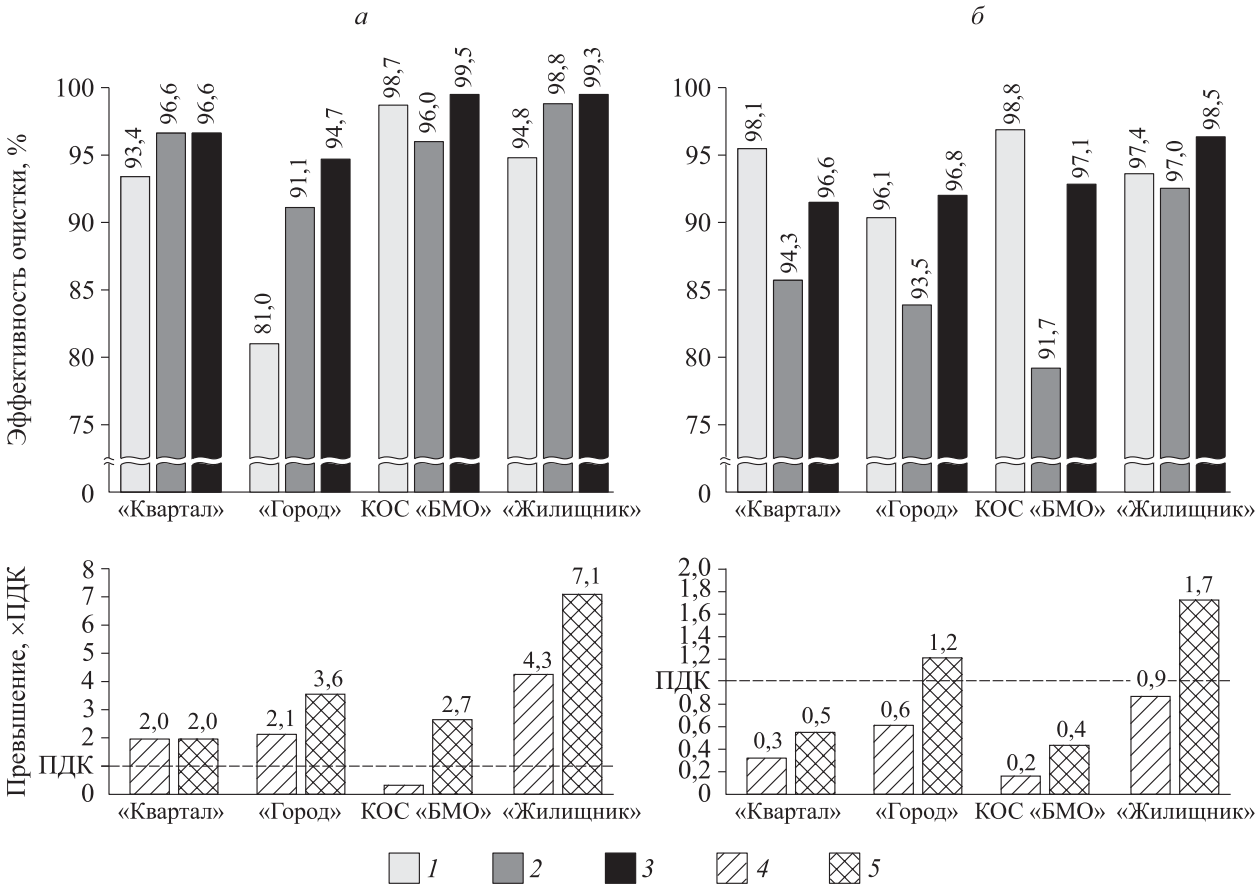

Рис. 2. Фактическая и пороговая эффективность очистки и соответствие установленным нормативам по взвешенным и органическим веществам, сульфатам и хлоридам.

1 — фактическая эффективность очистки. Пороговая эффективность, необходимая для соблюдения норм согласно приказам: *2* — № 63 [2], *3* — № 83 [1]. Кратность превышения ПДК (×ПДК) согласно приказам: *4* — № 63, *5* — № 83.

В пруде-аэраторе КОС «БМО» концентрации фосфатов оказались еще более высокими, его статус соответствует эвтрофному, а качество воды по степени загрязнения фосфатами — категории «предельно грязная» (см. рис. 4). В то же время ни на одной из обследованных станций в устьях Похабихи и Тыи фосфаты не были обнаружены; ниже пределов чувствительности метода их определения концентрации фосфатов оказались и в оз. Байкал вблизи г. Северобайкальска, и в устьевых зонах рек Турка и Усть-Баргузин (табл. 4).

В зонах сбросов очищенных сточных вод также выявляются повышенные концентрации соединений группы азота. В р. Похабихе качество воды по степени загрязнения аммоний-ионом изменяется от вполне чистой на станции выше сбросов до сильно загрязненной — на станции ниже сбросов и умеренно загрязненной — в устье этой реки. Статус р. Тыи по аммонию на станциях выше и ниже стоков не изменялся и соответствовал категории «вполне чистая». В пруде-аэраторе соединения аммония присутствовали в концентрациях, соответствующих классу «умеренно загрязненная вода» (см. рис. 4).

Содержание нитритов и нитратов в Тые и Похабихе увеличивалось на станции ниже сброса очищенных стоков. Также их концентрации оказались крайне высоки в воде пруда-аэратора Байкальска (она классифицируется как «сильно загрязненная» и «предельно грязная» по нитритам и нитратам соответственно) (см. табл. 3, рис. 4).

Нитраты были обнаружены нами во всех пробах, собранных в зимнее время на исследованных станциях оз. Байкал и сообщающихся с ним водотоках (см. табл. 3, 4). Наибольшая концентрация нитратов присутствовала в частной скважине нецентрализованного технического водоснабжения в с. Турка (класс качества воды «предельно грязная»), что, вероятно, объясняется инфильтрацией не-

Таблица 1

Показатели работы КОС и установленные нормативы по взвешенным и органическим веществам, нефтепродуктам и аПАВ, мг/л

Названия КОС и ПДК с номерами приказов № 63 и 83	Взвешенные вещества	$БПК_5/БПК_{полн}$	Нефтепродукты	аПАВ
КОС «Квартал», вход (1)	148,2 ± 27,20	113,03 ± 7,43/161,5–188,4	1,33 ± 1,06	2,47 ± 1,18
КОС «Квартал», сброс (1)	9,79 ± 0,73	2,10 ± 0,79/3,0–3,5	0,07 ± 0,03	0,13 ± 0,06
$ПДК_{63}$ для КОС «Квартал»	5	*/10,0	0,05	0,015
$ПДК_{83}$ для КОС «Квартал»	5	*/6,0	*	*
КОС «Город», вход (1)	56,13 ± 26,80	100,25 ± 23,88/143,2–167,1	1,06 ± 0,53	1,55 ± 0,81
КОС «Город», сброс (1)	10,65 ± 5,00	3,91 ± 1,53/5,6–6,5	0,11 ± 0,03	0,17 ± 0,12
МП «Жилищник», вход (1)	408,25 ± 273,37	214,58 ± 84,94/306,5–357,6	0,76 ± 0,54	4,73 ± 2,23
МП «Жилищник», сброс (1)	21,28 ± 11,21	5,58 ± 2,43/8,0–9,3	0,06 ± 0,04	1,00 ± 0,79
$ПДК_{63}$ для КОС «Город», МП «Жилищник»	5	*/10	0,05	0,015
$ПДК_{83}$ для КОС «Город», МП «Жилищник»	3	*/5	*	*
КОС «БМО», вход (1)	63,08 ± 23,62	66,92 ± 22,34/95,6–111,5	0,48 ± 0,15	1,64 ± 0,56
КОС «БМО», сброс (1)	0,80 ± 0,31	0,83 ± 0,22/1,2–1,4	0,025 ± 0,009	0,54 ± 1,73
$ПДК_{63}$ для КОС «БМО»	2,5	8 / 8,6	0,022	0,015
$ПДК_{83}$ для КОС «БМО»	0,302	*/3	0,01	0,005

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3: (1) – данные лабораторий КОС.
* Показатель не нормируется.

очищенных сточных вод, поступающих из выгребных ям частного сектора. Она носит локальный характер (см. рис. 4).

Известно, что наличие спирогиры в экосистеме оз. Байкал было описано ранее, еще до появления признаков ее массового развития [17]. Нами было выявлено три категории характерных мест обитания в акватории оз. Байкал, в которых в различных количествах присутствовала спирогира. Первая категория включает зоны с единичными признаками развития спирогиры, не связанные с эвтрофированием вод; вторая — зоны ее массового развития, которые находятся в мелководных слабопроточных водоемах; третья — зоны массового развития спирогиры на отдельных прибрежных участках акватории озера.

Зоны озера с единичными признаками развития спирогиры включали заводи и устья небольших рек (ст. 10, 14, 16), мелководные заливы (соры), сообщающиеся с оз. Байкал через узкую протоку (ст. 8), а также ручьи, которые подпитываются водами термальных источников (ст. 15) (см. рис. 1). В состав этой первой категории мест обитания вошли: устье р. Рель (ст. 10), которое находится вблизи небольшого села Байкальское; участок оз. Байкал в месте впадения в него горячих источников в черте с. Давша (ст. 15); туристическая зона Баргузинского заповедника, а также все остальные пункты, расположенные на территории заповедников и удаленные от поселений и популярных туристических мест.

Ко второй категории мест обитания нами были отнесены локализованные в прибойной или заплесковой зоне береговой линии, оторванные от донного субстрата водорослевые скопления с преобладанием нитей спирогиры: они были отмечены на ст. 13, 21–23. Станция 21 находилась вне особо охраняемой природной территории (ООПТ) оз. Байкал, вблизи трассы и с. Максимиха; ст. 22 и 23 — в черте сел Турка и Сухая соответственно; ст. 13 — в губе Аяя, популярном туристическом месте с активным судоходством.

Третья категория мест обитания включает прибрежные зоны озера с массовым развитием спирогиры. Здесь она обитает в прикрепленном на донном субстрате состоянии и занимает до 100 % площади поверхности дна. Такие зоны были отмечены на ст. 1–3, 11 и 12, вблизи крупных городов или поселков, имеющих собственные КОС (Слюдянка, Байкальск, Северобайкальск, пос. Листвянка). Наиболее протяженная (не менее 10 км) зона массового развития спирогиры была отмечена вблизи Северобайкальска (ст. 11 и 12).

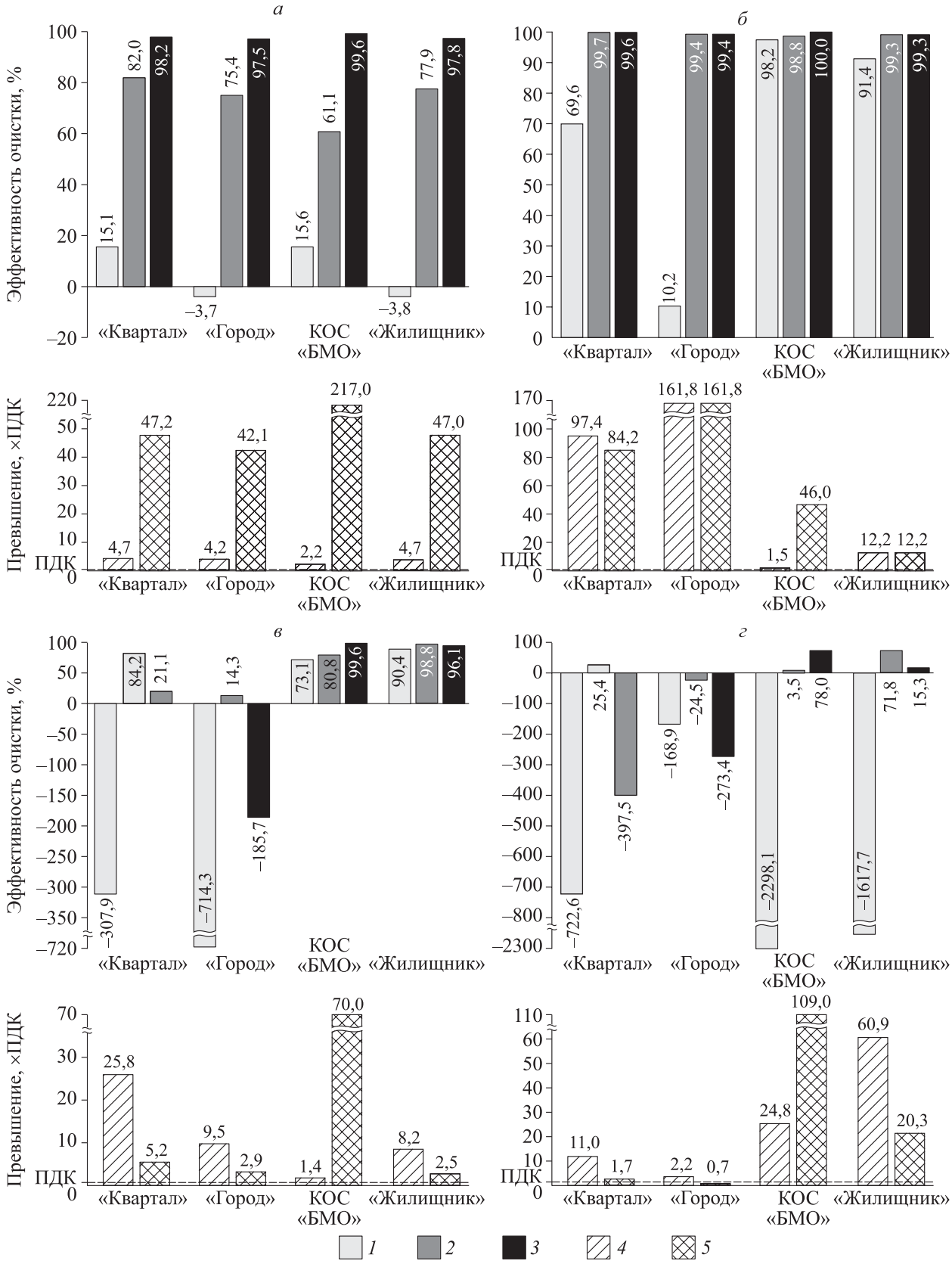

Рис. 3. Фактическая и пороговая эффективность очистки и соответствие установленным нормативам по соединениям азота и фосфора.

Усл. обозн. — см. рис. 2.

Таблица 2

Показатели работы КОС и установленные нормативы по соединениям азота и фосфора, мг/л

Названия КОС и ПДК с номерами приказов № 63 и 83	Фосфор фосфатов	Аммоний-ион	Нитрит-ион	Нитрат-ион
КОС «Квартал», вход (1)	5,56 ± 0,66	124,67 ± 9,32	0,38 ± 0,06	4,02 ± 4,06
КОС «Квартал», сброс (1)	4,72 ± 0,09	37,87 ± 10,10	1,55 ± 0,73	33,07 ± 14,10
$ПДК_{63}$ для КОС «Квартал»	1	0,4	0,06	3
$ПДК_{83}$ для КОС «Квартал»	0,1	0,45/2*	0,3/0,5*	20/60*
КОС «Город», вход (1)	4,06 ± 0,95	72,10 ± 11,67	0,07 ± 0,15	2,41 ± 0,97
КОС «Город», сброс (1)	4,21 ± 0,99	64,72 ± 16,05	0,57 ± 0,16	6,48 ± 6,02
МП «Жилищник», вход (1)	4,53 ± 1,60	56,92 ± 7,35	5,159 ± 5,684	10,63 ± 15,90
МП «Жилищник», сброс (1)	4,70 ± 1,97	4,89 ± 1,81	0,493 ± 0,756	182,59 ± 50,40
$ПДК_{63}$ для КОС «Город», МП «Жилищник»	1	0,4	0,06	3
$ПДК_{83}$ для КОС «Город», МП «Жилищник»	0,1	0,4	0,2	9
КОС «БМО», вход (1)	2,57 ± 0,64	25,01 ± 4,59	0,26 ± 0,04	2,59 ± 1,36
КОС «БМО», сброс (1)	2,17 ± 0,35	0,46 ± 0,34	0,07 ± 0,06	62,11 ± 7,26
$ПДК_{63}$ для КОС «БМО»	1	0,3	0,05	2,5
$ПДК_{83}$ для КОС «БМО»	0,01	0,01	0,001	0,57

Таблица 3

Содержание соединений азота и фосфора (мг/л) на станциях в притоках оз. Байкал в зоне сброса в них очищенных сточных вод в зимний период

Местоположение станции, категория нормирования	Фосфор фосфатов	Аммоний-ион	Нитрит-ион	Нитрат-ион
р. Похабиха, выше сбросов. КОС «Квартал» и «Город» (1)	0,003 ± 0,010	0,21 ± 0,04	0,010 ± 0,010	2,23 ± 0,70
р. Похабиха, ниже сбросов. КОС «Квартал» и «Город» (1)	0,075 ± 0,013	1,47 ± 0,53	0,052 ± 0,016	2,64 ± 0,85
р. Похабиха, устье (1)	0,059 ± 0,010	1,29 ± 0,17	0,054 ± 0,007	2,67 ± 0,80
оз. Байкал, рядом с устьем (2)	<0,016	0,63	<0,02	6,80
оз. Байкал, 700 м от устья (2)	<0,016	0,17	<0,02	6,30
Пруд-аэратор (1)	0,61 ± 0,22	0,67 ± 1,26	0,172 ± 0,133	43,57 ± 15,06
оз. Байкал, устье р. Солзан, Байкальск (2)	<0,016	<0,013	<0,02	4,00
безымянная речка, Байкальск (2)	<0,016	<0,013	<0,02	16,00
р. Тыя, выше сброса (1)	0,018 ± 0,015	0,149 ± 0,147	0,016 ± 0,020	0,52 ± 0,25
р. Тыя, ниже сброса (1)	0,10 ± 0,09	0,154 ± 0,167	0,020 ± 0,013	2,57 ± 1,59
оз. Байкал, устье р. Тыи (2)	<0,016	<0,013	<0,02	2,90
ПДК РХ* для водоемов разной трофии	<0,05 – олиготрофный, 0,15 – мезотрофный, 0,2 – эвтрофный	0,5	0,08	40

Примечание. Здесь и в табл. 4: (2) – данные авторов.
* ПДК для объектов рыбохозяйственного назначения, установленные приказом Минсельхоза РФ в 2016 г. [20].

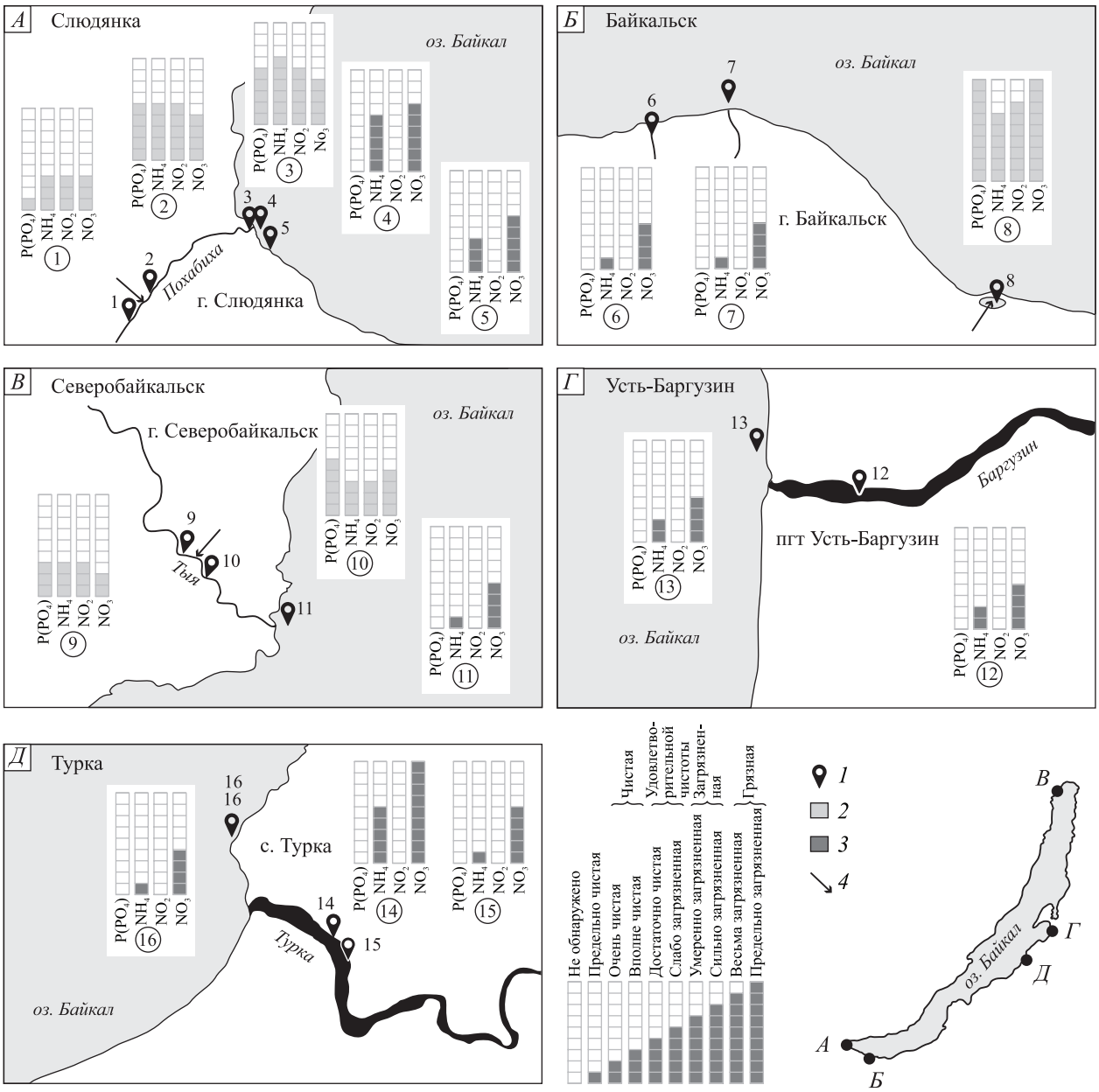

Рис. 4. Качество прибрежных вод оз. Байкал вблизи населенных пунктов согласно классификации поверхностных вод по эколого-санитарным показателям [19].

1 — точки отбора проб; *2* — данные КОС; *3* — данные авторов; *4* — очищенные сточные воды.

Также в ходе наблюдений нами были отмечены станции в прибрежной зоне оз. Байкал, на которых признаки развития спирогиры отсутствовали (ст. 4–8, 16–20). Станции 5 и 20 располагались вблизи крупных населенных пунктов — с. Хужир и пгт Усть-Баргузин, остальные — в пределах ООПТ на удалении от населенных пунктов.

В Приказе № 83 для предприятий, сбрасывающих воду в водоемы, сообщающиеся с оз. Байкал, из списка нормируемых в очищенных стоках КОС показателей исключаются нефтепродукты, аПАВ, тяжелые металлы, но при этом в нем сохраняются базовые показатели, в том числе биогенные элементы. К данной категории КОС относятся три из четырех рассматриваемых нами. С учетом требований данного приказа в очищенных стоках КОС этой категории по взвешенным веществам имеются превышения в 2–7 раз, по аммоний-иону — в 9,5–162 раза для всех КОС, по нитратам — в 2–20 раз. Концентрации фосфора фосфатов превышены в 42–145 раз, причем уже на всех КОС.

Таблица 4

Содержание соединений азота и фосфора (мг/л) в оз. Байкал и его притоках вблизи населенных пунктов, не имеющих централизованной системы водоснабжения

Местоположение станции, категория нормирования	Фосфор фосфатов	Аммоний-ион	Нитрит-анион	Нитрат-анион
р. Баргузин, в черте пос. Усть-Баргузин (2)	<0,016	0,079	<0,02	3,9
оз. Байкал, устье р. Баргузин (2)	<0,016	0,076	<0,02	4,1
Частная скважина, пос. Турка (2)	<0,016	0,52	<0,02	580
р. Турка, в черте пос. Турка (2)	<0,016	<0,013	<0,02	5,8
Байкал, устье р. Турки (2)	<0,016	<0,013	<0,02	3,8
ПДК РХ* для водоемов разной трофии	<0,05 – олиготрофный 0,15 – мезотрофный 0,2 – эвтрофный	0,5	0,08	40

Для предприятий, сбрасывающих воду непосредственно в оз. Байкал, в Приказе № 83 по сравнению с Приказом № 63 все нормируемые показатели сохраняются, однако требования многократно ужесточаются. К этой категории относится только КОС «БМО», на котором в данном случае наблюдаются нарушения уже практически по всем нормируемым показателям, в том числе и по тем, которые соответствовали нормам Приказа № 63. По аммоний-иону появляется превышение в 46 раз, по нитратам кратность превышения возрастает с 21 до 109, по фосфатам — с 2 до 217.

Норма сброса взвешенных веществ, установленная для водоемов рыбохозяйственного значения высшей и первой категорий [20], в р. Похабихе превышена незначительно (в среднем на 28 %) и фактически не превышена в р. Тые. По нефтепродуктам, сульфатам и нитритам показатели на всех станциях не превосходят рыбохозяйственные нормативы. Однако отмечены превышения рыбохозяйственных ПДК по аммоний-иону: в пруде-аэраторе — на 34 %, в р. Похабихе ниже сбросов и в устье — в 2,6–3 раза. ПДК по нитратам была превышена в частной скважине в Турке в 15 раз (см. табл. 3).

С 1950-х гг. в акватории оз. Байкал осуществляется обширная схема мониторинга гидрохимических показателей [21]. Локальные показатели загрязняющих веществ в ряде случаев значительно превышают показатели, приведенные в литературе. Так, для р. Тыи описаны зимние пиковые концентрации нитратов, составляющие до 1,2 мг/л [22]. По данным КОС, ниже точек сбросов очищенных стоков концентрация нитратов значительно выше и составляет 2,6 мг/л.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ приведенных в настоящей статье данных показывает, что за 12 лет, прошедших с начала действия Приказа № 63, ни одно из известных нам предприятий КОС не внедрило систему доочистки сточных вод с глубоким извлечением азота и фосфора, не улучшило также и остальные показатели качества их очистки. Имеет место только ухудшение этих показателей в силу естественного износа очистных сооружений, регулярных банкротств предприятий, побед в проводимых местной администрацией конкурсах недобросовестных проектировщиков новых очистных сооружений, что в целом свидетельствует о неэффективности применяемого подхода.

В действующем справочнике наилучших доступных технологий (НДТ) для очистки сточных вод [23] рекомендованы методы с биологическим удалением азота нитрит-денитрификацией и биологическим (БНДФ) либо биолого-химическим извлечением фосфора (БНДБХФ). Однако на Байкальской природной территории до сих пор функционируют КОС с классической биологической очисткой, которая предусматривает окисление, но не извлечение соединений групп азота и фосфора из состава сточных вод. Такая методика вполне может быть классифицирована как устаревшая. Внедрение НДТ позволило бы сократить поступление биогенных соединений в водоем в 10–20 раз, что благоприятно сказалось бы на экосистеме оз. Байкал.

Имеющиеся НДТ позволяют достичь эффективности очистки стоков до 90 % по азоту и 95 % — по фосфору [23]. Однако для выполнения Приказа № 83 от КОС требуется эффективность 95–99 % и 97,5–99,6 % по минеральным азоту и фосфору соответственно. В то же время эффективность очистки стоков рассмотренными КОС БПТ составляет всего 6–62 % и 4–15 % по минеральным азоту и фосфору соответственно.

В связи с этим важно отметить, что даже самые строгие из известных по литературным данным ПДК, установленные в Нидерландах, также не соответствуют нормативам, установленным Приказом № 83 (табл. 5). Фактически нормативы этого приказа не имеют себе равных в мировой практике. Типовых проектов, способных обеспечить подобные уровни очистки при адекватном бюджете, просто не существует. Причина заключается в том, что заявленные в нормативных документах показатели [23] требуют применения технологий, связанных с высокими экономическими затратами (выпаривание с дальнейшей конденсацией, обратный осмос, ультрафильтрация, фильтрация через ионообменные смолы и др.). Эти методы несоразмерно дороги и технологически сложны, поэтому они не используются для рутинной очистки сточных вод даже в более экономически благополучных, чем Восточная Сибирь, регионах. Соответственно, отсутствуют и пилотные проекты, которые можно было

Таблица 5

Показатели очистки с использованием НДТ в сравнении с нормативами, принятыми в некоторых зарубежных странах, а также в России в пределах БПТ с фактическими показателями работы КОС

Показатель, мг/л	Взвешенные вещества	$БПК_5$ ($БПК_{полн}$)	Азот аммонийный (аммоний-ион)	Азот нитритный (нитрит-ион)	Азот нитратный (нитрат-ион)	Фосфор фосфатов
БНДФ [23]	8–15	3–6 (4,3–10,0)	1–2 (1,3–2,6)	0,05–0,2 (0,16–0,66)	5–12 (22,1–53,1)	0,3–1
			Общий минеральный азот: 6,05–14,20			
БНДБХФ [23]	8–15	3–6 (4,3–10,0)	1–2 (1,3–2,6)	0,05–0,2 (0,16–0,66)	5–12 (22,1–53,1)	0,15–0,8
			Общий минеральный азот: 6,05–14,20			
Биологическая доочистка (органические вещества, азот [23]	–	2–3 (2,8–5,0)	0,4 (0,51)	0,05–0,1 (0,16–0,33)	5–12 (22,1–53,1)	–
			Общий минеральный азот: 5,45–12,50			
Нормативы ЕС 91/271 [24]	35	25 по $БПК_7$	Общий азот: 15 (КОС производительностью 10–100 тыс. $м^3$), 10 (КОС производительностью >100 тыс. $м^3$)			Фосфор общий – 15 для КОС производительностью 10–100 тыс. $м^3$, 10 – для ОС производительностью >100 тыс. $м^3$
Нормативы в других странах, по [18]	–	–	10,0 (Германия); 0,02 (Нидерланды)	0,06 (Канада); нитриты и нитраты суммарно 10,0 (Нидерланды)	15,0 (Хельсинская комиссия)	Фосфор общий – 1,0–2,0 (США), 1,0 (Германия); фосфаты – 0,15 (Нидерланды)
Приказ № 63 [2] $ПДК_{63}$	$2,5^1/5^2$	$8,6^1/10^2$	$(0,3^1/0,4^2)$	$(0,05^1/0,06^2)$	$(2,5^1/3^2)$	$1^1/1^2$
			Общий минеральный азот: 0,81/1,01			
Приказ № 83 [1] $ПДК_{83}$	$0,302^3/5^4/3^5$	$3^3/6^4/5^5$	$(0,01^3/0,45(2*)^4/0,4^5)$	$(0,001^3/0,3(0,5*)^4/0,2^5)$	$(0,57^3/20(60*)^4/9^5)$	$0,01^3/0,1^4/0,1^5$
			Общий минеральный азот: 0,14/4,96(15,26*)/2,40			
Фактические показатели КОС БПТ	0,8–21,3	0,8–5,6	(0,5–64,7)	(0,07–1,55)	(6,5–182,6)	2,2–4,7
			Общий минеральный азот: 14,40–51,97			

Примечание. Показатели для сточных вод, сбрасываемых: [1] – непосредственно в Байкал; [2] – в водные объекты в пределах центральной и буферной зон БПТ; [3] – непосредственно в Байкал; [4] – в пределах центральной экологической зоны при нагрузке 2500–12 500 чел/501–2500 $м^3$/сут; [5] – в пределах центральной экологической зоны, при нагрузке >12 500 чел/2500 $м^3$/сут.

* В холодный период года, в соответствии с датами введения отопительного сезона.

бы взять за основу. Подобные высокозатратные методы используются главным образом при глубокой очистке воды для питьевых целей и потому требуют тщательной предварительной водоподготовки.

Очевидным решением в сложившейся ситуации представляется отказ от несоразмерно завышенных и потому практически нереализуемых требований, заявленных в Приказе № 83. Альтернативой на данном этапе, по нашему мнению, является внедрение уже существующих современных биологических методов очистки сточных вод и закрепление в нормативах технологически достижимых при их использовании показателей. В связи с этим нами предлагаются следующие рекомендации:

1. Отказ от штрафных мер по показателям, достижение которых не предусмотрено технологическими возможностями существующих КОС. Такая система штрафов лишена здравого смысла и оказывает негативное влияние на процессы очистки стоков, поскольку создает дополнительную экономическую нагрузку на предприятие.

2. Принятие мер, направленных на сокращение водопользователями загрязнения используемой в быту воды, в первую очередь запрет на использование населением ЦЭЗ БПТ фосфорсодержащих моющих средств. Эта мера позволит сократить концентрации фосфатов в исходных неочищенных стоках примерно в два раза [16].

3. Проведение дополнительных исследований, устанавливающих ключевые факторы локального эвтрофирования прибрежных вод оз. Байкал. В случае Приказов № 63 и 83 остаются неясны причины, по которым в фокус нормирования помещен именно фосфор и насколько обоснованы столь высокие требования к его удалению. За время действия Приказа № 63 ни одно предприятие не добилось выполнения норматива очистки по фосфору (1 мг/л), предусмотренного документом. В силу этого отсутствуют данные, необходимые для обоснования еще более радикального ужесточения нормирования по фосфору, которое имеет место в Приказе № 83. Кроме того, согласно [25–27], лимитирующим фактором для развития спирогиры в первую очередь может выступать азот, а не фосфор.

4. Объединение КОС БПТ в административную систему с общим конструкторским, технологическим, аналитическим и мониторинговым центром, с привлечением для работы в нем как специалистов по водоочистке, так и экологов и экономистов. Задача создания современных КОС, обеспечивающих сохранение уникальной экосистемы оз. Байкал, требует усилий команды профильных специалистов мирового уровня, она не может быть решена только усилиями местных администраций.

5. Разработка и запуск пилотного проекта базового очистного комплекса, предусматривающего использование НДТ, обеспечивающих глубокое извлечение биогенных соединений. После полной апробации этот пилотный проект КОС может быть масштабирован на всю зону БПТ.

6. Разработка нормативов, соответствующих новым технологическим возможностям формируемой системы КОС. Эти нормативы могут быть установлены после того, как схема очистки сточных вод будет полностью разработана и апробирована технически и экономически в конкретных условиях ЦЭЗ БПТ. Создаваемые в рамках КОС современные биологические реакторы предлагается проектировать индивидуально, в зависимости от объема и состава поступающих в них для очистки сточных вод.

7. Организация регулярных мониторинговых наблюдений за гидрохимическими и биологическими показателями в зонах сбросов сточных вод и на сетке фоновых станций. В случае сохранения проблем, связанных с загрязнением оз. Байкал сточными водами, уже прошедшими очистку с использованием новых технологических схем, а также при наличии необходимых экономических ресурсов впоследствии могут быть реализованы разработка, апробация и внедрение дополнительных модулей глубокой доочистки с последующим ужесточением введенных ранее нормативов.

Учет технологических возможностей при разработке нормативов для очищенных стоков традиционно не используется в России, однако именно он является стандартным подходом в мировой практике. В соответствии с этим подходом, нормативы принимаются исходя из возможностей НДТ и вводятся поэтапно, что позволяет оптимизировать распределение бюджетов, необходимых для модернизации КОС [18].

Такой подход, в частности, позволил внедрить технологии глубокой очистки бытовых стоков на самой крупной в Германии станции Рулебен (Берлин) с производительностью до 350 тыс. $м^3$/сут. На начальном этапе (1995–2000 гг.) с использованием только биологических методов очистки были достигнуты показатели, составляющие 0,46 мг/л по общему фосфору при эффективности его удаления 97 % и 9,3 мг/л — по общему минеральному азоту при эффективности удаления 85 % [28].

При планировании модернизаций системы КОС в БПТ следует учитывать, что основным лимитирующим фактором окажутся, вероятно, экономические причины. Технологии БНДФ и БНДХФ

классифицируются как дорогостоящие в сравнении с биологической очисткой, реализованной в действующих КОС, как по капитальным, так и по эксплуатационным затратам [23]. По некоторым оценкам, кратность различий в стоимости этих технологий колеблется от трех до десяти раз, однако это не столь существенно, как в случае с системами тонкой доочистки, которые повышают стоимость очистки сразу на несколько порядков [18]. Развитие мировых технологий обработки стоков начиная с 1970-х гг. происходит именно таким путем и при этом достигло значительных результатов [23].

Что касается оз. Байкал, то при всей беспрецедентности отечественного природоохранного законодательства в попытках достичь прогресса в данной области, начиная с 1980-х гг. он практически полностью отсутствует. К примеру, на упоминавшихся выше КОС «Рулебен» степень очистки по фосфору, полученная на первом этапе модернизации, оказалась недостаточной, чтобы решить проблему эвтрофирования реки в зонах сбросов сточных вод. Поэтому было принято решение ужесточить региональный норматив на сброс фосфора до 0,5 мг/л и ввести в схему пилотную установку доочистки с использованием коагуляции в сочетании с ультрамембранной фильтрацией. Доочистка позволила достичь показателя 0,27 мг/л по общему фосфору, однако разработчики при этом столкнулись с серьезными экономическими и техническими сложностями [28]. Можно предположить, что экономические возможности любого населенного пункта в пределах БПТ значительно скромнее, чем ресурсы муниципальных органов Берлина. В Иркутской области и Республике Бурятия местные власти с трудом собирают оплату на покрытие расходов КОС даже при существующих устаревших схемах применяемой ими очистки стоков: на всех предприятиях здесь отмечается хронический рост задолженностей. Становится очевидным, что бескомпромиссный приоритет экологических потребностей в сфере регулирования сточных вод, реализованный в Приказах № 63 и 83, не привел к ожидаемым положительным результатам. Решение проблемы эвтрофирования оз. Байкал требует комплексного подхода, учитывающего также технологические и экономические возможности региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обследование проб воды, отобранных на 23 станциях, расположенных в прибрежной зоне оз. Байкал, выявило признаки локального эвтрофирования на участках, относящихся к населенным пунктам и популярным туристическим местам, в том числе к зонам сброса очищенных сточных вод. На территориях, свободных от антропогенного воздействия, такие признаки отсутствуют.

Установлено повышение концентраций ряда загрязняющих веществ, включая растворенные соединения фосфора и азота, на станциях вблизи населенных пунктов, причем как имеющих очистные сооружения, так и неканализованных. В последнем случае неочищенные стоки, очевидно, попадают в водные системы посредством инфильтрации через грунты [5].

Нормы содержания загрязняющих веществ в очищенных сточных водах в ЦЭЗ БПТ, введенные Приказом № 83, превышают возможности современных биологических и биолого-химических методов очистки, которые входят в состав НДТ, применяемых в мировой практике.

На КОС, функционирующих в пределах ЦЭЗ БПТ, применяются устаревшие методы классической биологической очистки, конструктивно неспособные к извлечению биогенных соединений и крайне далекие от требований нормативных документов и возможностей НДТ. Финансовый потенциал региона едва позволяет обеспечивать даже имеющийся уровень очистки сточных вод, поэтому внедрение крайне затратных новых методов очистки, необходимых для достижения существующих нормативных требований, представляется нереальным.

Предлагаемый нами комплексный подход к решению проблемы эвтрофикации оз. Байкал предусматривает сокращение уровня загрязнения поступающих на КОС от местного населения бытовых сточных вод посредством введения запрета на использование в быту фосфорсодержащих моющих средств, отказ от уже введенных, но пока технически и экономически недостижимых нормативов, а также поэтапное внедрение современных методов водоочистки в составе НДТ, соответствующих экономическим возможностям региона.

Работа выполнена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» и государственного задания по теме НИР «Экологическая физиология водных микро- и макроорганизмов и влияние на них потенциально вредоносных природных и антропогенных факторов среды» (ЦИТИС 121032300131–9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Приказ** Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 21.01.2020 № 83 «Об утверждении нормативов предельно допустимых воздействий на уникальную экологическую систему озера Байкал и перечня вредных веществ, в том числе веществ, относящихся к категориям особо опасных, высоко опасных, опасных и умеренно опасных для уникальной экологической системы озера Байкал» [Электронный ресурс]. — http://publication.pravo.gov.ru/ (дата обращения 20.12.2023).
2. **Приказ** Минприроды России от 5 марта 2010 г. № 63 «Об утверждении нормативов предельно допустимых воздействий на уникальную экологическую систему озера Байкал и перечня вредных веществ, в том числе веществ, относящихся к категориям особо опасных, высокоопасных, опасных и умеренно опасных для уникальной экологической системы озера Байкал» [Электронный ресурс]. — http://pravo.gov.ru/ (дата обращения 20.12.2023).
3. **Кравцова Л.С., Ижболдина Л.А., Ханаев И.В., Помазкина Г.В., Домышева В.М., Кравченко О.С., Грачев М.А.** Нарушение вертикальной зональности зеленых водорослей в прибрежной части залива Лиственничный озера Байкал // Докл. РАН. — 2012. —Т. 447, № 2. — С. 227–229.
4. **Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M., Kupchinsky A.B., Bukshuk N.A.** Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // Journ. of Great Lakes Research. — 2016. — Vol. 42. — P. 487–497.
5. **Timoshkin O.A., Moore M.V., Kulikova N.N., Tomberg I.V., Malnik V.V., Shimaraev M.N., Troitskaya E.S., Shirokaya A.A., Sinyukovich V.N., Zaitseva E.P., Domysheva V.M., Yamamuro M., Poberezhnaya A.E., Timoshkina E.M.** Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia) // Journ. of Great Lakes Research. — 2018. — Vol. 44. — P. 230–244.
6. **Пукемо М.М., Данилович Д.А.** Недостижимые нормативы для очистных сооружений озера Байкал // Экология и промышленность России. — 2018. — Т. 22 (7). — С. 26–32.
7. **Chupin R.V., Moroz M.V., Melekhov E.S.** Transportation of wastewater over long distances in the central ecological zone of Lake Baikal // Baikal Forum 2020. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — Vol. 751. — P. 012117.
8. **ПНД Ф** 14.1:2:3:4.254-2009. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций взвешенных веществ и прокаленных взвешенных веществ в пробах питьевых, природных и сточных вод гравиметрическим методом [Электронный ресурс]. — https://library-full.nadzor-info.ru/doc/37615?ysclid=ltmlgdp1e862261843 (дата обращения 22.01.2024).
9. **ПНД Ф** 14.1:2:3:4.123-97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений биохимической потребности в кислороде после *n*-дней инкубации ($БПК_{полн}$) в поверхностных, пресных, подземных (грунтовых), питьевых, сточных и очищенных сточных водах [Электронный ресурс]. — https://e-ecolog.ru/docs/-bGkncITzyP13V1kyQTyq?ysclid (дата обращения 22.01.2024).
10. **МВИ** 01.1:1.2.4.16-05. Методика выполнения измерений массовой концентрации аммонийного азота в пробах природных, питьевых и сточных вод фотометрическим методом с применением фотометра Spectroquant Nova 60 [Электронный ресурс]. — https://docs.cntd.ru/document/437146408 (дата обращения 22.01.2024).
11. **ПНД Ф** 14.1:2:4.3-95. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нитрит-ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Грисса [Электронный ресурс]. — https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293808/4293808620.htm?-ysclid=ltpaehknfk497025796 (дата обращения 22.01.2024).
12. **ФР.1.31.2005.01774.** МВИ водородного показателя (pH), общей жесткости (суммарного содержания ионов Ca^{2+} и Mg^{2+}) и массовых концентраций ионов Cl^-, Br^-, I^-, F^-, S^{2-}, NO_3^- и др. в водных средах методом потенциометрии с использованием анализатора жидкости «Эксперт-001» [Электронный ресурс]. — https://docs.cntd.ru/document/437142067 (дата обращения 19.03.2024).
13. **ПНД Ф** 14.1:2:4.248-07. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций ортофосфатов, полифосфатов и фосфора общего в питьевых, природных и сточных водах фотометрическим методом [Электронный ресурс]. — https://gostassistent.ru/doc/-da223707-0126-4c24-8a89-3358c875e4fd?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyan-dex.ru%2F (дата обращения 19.03.2024).
14. **ПНД Ф** 14.1:2:4.158-2000. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионных поверхностно-активных веществ (АПАВ) в пробах природной, питьевой и сточной воды флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» (Издание 2004 года) [Электронный ресурс]. — https://docs.cntd.ru/-document/471813685 (дата обращения 19.03.2024).
15. **МУК** 4.1.1262-03. Измерение массовой концентрации нефтепродуктов флуориметрическим методом в пробах питьевой воды и воды поверхностных и подземных источников водопользования [Электронный ресурс]. — https://docs.cntd.ru/document/1200034289 (дата обращения 19.03.2024).
16. **Metcalf L., Eddy H.P., Tchobanoglous G.** Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse. — New York: McGraw – Hill, 1991. — 1819 p.
17. **Ижболдина Л.А.** Атлас и определитель водорослей бентоса и перифитона озера Байкал (мейо- и макрофиты) с краткими очерками по их экологии. — Новосибирск: Наука-Центр, 2007. — 248 с.
18. **Жмур Н.С.** Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. — М.: Акварос, 2003. — 507 с.

19. **Жукинский В.Н., Оксиюк О.П., Олейник Г.Н., Кошелев С.И.** Принципы и опыт построения экологической классификации качества поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. — 1981. — Т. 17, № 2. — С. 38–49.
20. **Приказ** Министерства сельского хозяйства Российской Федерации об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах речных объектов рыбохозяйственного значения от 13 декабря 2016 г. № 552 [Электронный ресурс]. — https://docs.cntd.ru/document/ (дата обращения 22.01.2024).
21. **Khodzher T.V., Domysheva V.M., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Sakirko M.V.** Hydrochemical studies in Lake Baikal: history and nowadays // Limnology and Freshwater Biology. — 2018. — Vol. 1. — P. 2–9.
22. **Сороковикова Л.М., Синюкович В.Н., Томберг И.В., Маринайте И.И., Ходжер Т.В.** Оценка качества вод притоков озера Байкал по химическим показателям // География и природ. ресурсы. — 2015. — № 1. — С. 37–45.
23. **Информационно-технический** справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 10-2015. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. — М.: Бюро НДТ, 2015. — 377 с.
24. **Council** Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment [Электронный ресурс]. — https://e-ecolog.ru/docs/nBO8pVgJGcZvyJ-DyxStb/5?ysclid=ltpb7q7wt8238576450 (дата обращения 20.01.2024).
25. **Гладышев М.И., Губелит Ю.И.** «Зеленые приливы»: новые последствия эвтрофирования природных озер // Сиб. экол. журн. — 2019. — № 2. — С. 135–156.
26. **Гладышев М.И., Глущенко Л.А., Кравчук Е.С., Анищенко О.В., Колмакова А.А., Колобов М.Ю., Разгоняева В.А., Сущик Н.Н.** Изотопный состав азота и стехиометрические соотношения элементов в биомассе *Spirogyra* в озере Байкал // Докл. РАН. Науки о жизни. — 2020. — Т. 491. — С. 134–136.
27. **Townsend S.A., Schultz J.H., Douglas M.M., Skinner S.** Does the Redfield ratio infer nutrient limitation in the macroalga *Spirogyra fluviatilis*? // Freshwater Biology. — 2008. — Vol. 53. — P. 509–520.
28. **Жмур Н.С.** Европейский опыт по сокращению сброса в водоемы соединений азота и фосфора на примере Германии // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. — 2015. — Т. 3. — С. 54–69.

Поступила в редакцию 18.08.2023
После доработки 31.10.2023
Принята к публикации 07.05.2024