

УСТОЙЧИВОЕ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕ В АРКТИКЕ. НОВЫЕ ПОДХОДЫ И РЕШЕНИЯ

Н. А. Кашулин

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

Т. П. Скуфьина

Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (Апатиты, Мурманская область, Российская Федерация)

В. А. Даувальтер

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

В. А. Котельников

Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина Кольского научного центра РАН
(Апатиты, Мурманская область, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 29 июня 2018 г.

Рассматриваются причины снижения ресурсного потенциала поверхностных вод европейской части арктического региона. Существующие линейные экономические модели в условиях Арктики не обеспечивают устойчивого развития региона, ведут к деградации природных систем. Выходом могут стать новые подходы и принципы природопользования, основанные на природоподобных методах циркулярной экономики, накопленных знаниях в области экологии и биомиметики. Обсуждается возможность реализации общемирового тренда повторного использования сточных вод в условиях Арктической зоны Российской Федерации. В контексте циркулярной экономики с циклическим использованием продукта, когда экономическое развитие сбалансировано с экологической устойчивостью, сточные воды являются широкодоступным и ценным ресурсом, обеспечивающим устойчивость водопользования.

Базисом этих подходов являются природоподобные биомиметические технологии, повторяющие принципы функционирования биологических систем различного уровня, способные перерабатывать низкоконцентрированное сырье с невысокими энерго- и ресурсозатратами, приносящие экономическую выгоду и успешно конкурирующие с традиционными подходами в экономике. Для реализации приоритетных инновационных и инвестиционных проектов в области низкотемпературной биотехнологии очевидна необходимость создания региональной научно-производственной инфраструктуры развития биотехнологии.

Ключевые слова: Арктика, устойчивое водопользование, циркулярная экономика, биотехнологии, микроводоросли.

Введение

Освоение Севера направлено на использование природных ресурсов [1; 2]. При этом хозяйственная деятельность, как правило, ведется без учета особенностей функционирования природных систем, специфических природоохранных требований и научно обоснованного регионального нормирования уровней

загрязнения и критических нагрузок на окружающую среду. Сформированные в первой половине прошлого века линейные конъюнктурно-зависимые экономические модели развития северных территорий, основанные на эксплуатации легкодоступных сырьевых ресурсов и создание низкой добавочной стоимости (продукции низкого передела), но оказывающие значительное негативное влияние на окружающую среду, не обеспечивают самостоятельный устойчивый социально-экономический рост Арктической зоны

Российской Федерации (АЗРФ), недоиспользуют имеющиеся ресурсы. Такие модели создают негативные внешние эффекты, включая масштабное загрязнение экосистем и нарушение их целостности, накопление отходов, увеличение выбросов углерода, неустойчивое водопользование и др. [3; 4].

Интенсификация освоения и использования ресурсов АЗРФ ведет к повышению антропогенной нагрузки на экосистемы региона, на компенсацию которой направлены затратные природоохранные проекты. Так, только в Мурманской области ежегодные затраты превышают 6—8 млрд руб., а в целом по России — 500 млрд [5]. Вероятно, существующие модели экономики, основанные на преимущественной эксплуатации невозобновляемых природных ресурсов, в условиях Арктики являются тупиковыми. Будучи природоразрушительными, они не обеспечивают устойчивого развития региона, ведут к деградации природных систем. Выходом из этой ситуации является поиск новых подходов и принципов природопользования Арктики с точки зрения инновационных моделей экономики и накопленных знаний в областях экологии и биомиметики [6—8]. При этом должны учитываться специфические природно-климатические условия Арктики, обуславливающие высокую чувствительность экосистем региона к внешним воздействиям, совершенствоваться экологические концепции природопользования, формироваться комплексный и всесторонний научный подход к оценке состояния живых организмов и среды их обитания. Прimitивные экономические модели, сформированные в период индустриального освоения Севера, основывались на доступных технологиях начальных этапов индустриальной революции, представлениях о неисчерпаемости природных ресурсов, недостаточных знаниях о принципах и механизмах функционирования экосистем. Они должны быть заменены новыми, основанными на природоподобных принципах циркулярной экономики [9—10].

Глобальный водный кризис и Арктика

Ключевым природным ресурсом Арктики являются природные воды, вовлеченные во все виды деятельности человека. В современном мире пресная вода становится стратегическим природным ресурсом, определяющим экономическое развитие целых регионов [11]. Проблема сохранения и рационального использования водных ресурсов стала глобальной задачей, включенной ООН в приоритетные цели развития тысячелетия (Millennium Development Goals), а в резолюции 2012 г., в частности, сформулирована цель 6: «Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех» [12]. В последние десятилетия процентное увеличение использования воды в глобальном масштабе вдвое превысило прирост населения [13]. Несмотря на глобальную достаточность доступных запасов пресных вод, постоянно

увеличивается число регионов, где пресноводные ресурсы неадекватны для удовлетворения внутренних потребностей, экономического развития и поддержания окружающей среды [14; 15]. Растущий дефицит пресной воды все чаще рассматривается как серьезный риск для мировой экономики [16]. Эти проблемы усугубляются социальными последствиями нехватки и/или ухудшения качества воды [17]. Ради решения краткосрочных экономических целей, которые часто не учитывают долгосрочную экологическую и/или экономическую устойчивость региона, а также здоровье населения, принимаются управленческие решения, приводящие к деградации водных ресурсов и связанных с ними экосистем.

Эти проблемы в полной мере относятся к АЗРФ. Скорость негативных изменений качества вод и роль в этом глобальных процессов возросли. Явления, которые в XX в. казались невероятными, например массовое цветение токсичных цианобактерий в арктических озерах, наблюдаются регулярно (рис. 1). Совместное действие климатических изменений и загрязнения окружающей среды снижают устойчивость водных экосистем, их социально-экономическую значимость. Как следствие возможны негативные изменения в важнейших для АЗРФ отраслях экономики: здравоохранении, энергетике, коммерческом рыболовстве, аквакультуре, туризме [18].

Во всех отраслях промышленности региона доминируют водоемкие технологии, природные водоемы используются для размещения отходов различного типа, отсутствует современный экологически обоснованный менеджмент водных ресурсов. Вследствие азротехногенного загрязнения в АЗРФ практически нет водных объектов, не измененных деятельностью человека. Долговременное многофакторное антропогенное воздействие, включая промышленное загрязнение, нарушение естественных гидрологических режимов и биогеохимических циклов элементов, привело к дефициту качественных пресных вод. Под угрозой находятся ценные виды гидробионтов, в том числе промысловые виды рыб [19; 20]. Большинство причин деградации водных ресурсов АЗРФ имеет социально-экономическую основу, определяемую существующими экономическими моделями и сохраняющимся стереотипом, гласящим, что вода — неисчерпаемый и бесплатный ресурс. Среди основных факторов, определяющих снижение ресурсного потенциала поверхностных вод, можно отметить: неадекватное управление, не обеспечивающее устойчивого развития региона; недостаток научных знаний, информации и понимания процессов, протекающих в природных системах Арктики; устаревшие технические и технологические решения; нехватку законодательных и нормативных актов, учитывающих региональные экологические особенности; некачественную правовую экспертизу в области природоохранного права и управления.

В качестве примера нерационального использования водных ресурсов можно рассмотреть Киров-



Рис. 1. Массовое развитие цианобактерий (сине-зеленных водорослей) и гибель молоди сига. Август 2015 г., озеро Имандра
Fig. 1. The cyanobacteria bloom (blue-green algae) and the death of young whitefish. Lake Imandra, August, 2015

ско-Апатитский промышленный район (Мурманская область), где ПАО «ФосАгро» ведет добычу и переработку апатитнефелиновых руд. В 2017 г. компанией было извлечено 32,33 млн т руды, из которой произведено 9,5 млн т апатитового и 998,1 тыс. т нефелинового концентратов, а остальная горная масса в виде тонкодисперсных песков размещена в хвостохранилищах. При этом из различных источников было забрано 55 130 тыс. м³ воды и сброшено 208 622 тыс. м³ сточных вод (интегрированный отчет «ФосАгро», 2017 г.). Сточные воды сбрасываются в природные водные системы, для размещения хвостов используются речные русла или отсекается часть водоемов. Конечными коллекторами загрязнений являются озера Имандра (источник питьевого и промышленного водоснабжения) и Умбозеро (рис. 2). Результатом стала деградация крупнейших в Мурманской области водоемов.

На явную ограниченность такого подхода к природным ресурсам указывают и результаты трансформаций постсоветского периода в развитии минерально-сырьевого комплекса российской Арктики. Так, переоценка в 1995—1999 гг. воспроизводства минерально-сырьевой базы страны и выделение балансовых запасов с учетом рентабельности в условиях ценовой конъюнктуры мирового рынка показали существенное сокращение потенциала минеральных ресурсов доступной ча-

сти Арктики [21]. Частично ситуация нивелируется доминированием в горнопромышленных отраслях крупнейших компаний, имеющих возможности расширять природоохранные мероприятия, которые являются основой устойчивого развития, а также следствием необходимости соблюдения не только усиливающейся экологической составляющей российского законодательства, но и жестких европейских регламентов, что требуется для получения соответствующих сертификатов, паспортов безопасности международного формата, оценки воздействия производства на окружающую среду и т. д. Однако статистические данные и результаты исследований не позволяют выделить качественные изменения состояния и охраны окружающей среды европейской части арктического региона [18]. Несмотря на существенный рост доли инвестиций, направленных именно на охрану и рациональное использование водных ресурсов, не наблюдается устойчивого сокращения объема сброса загрязненных сточных вод (табл. 1 и 2).

Возможно ли устойчивое водопользование в Арктике?

В основе устойчивого водопользования должны лежать представления о функционировании промышленных предприятий и окружающей среды как единой экосистемы, характеризующейся потоками

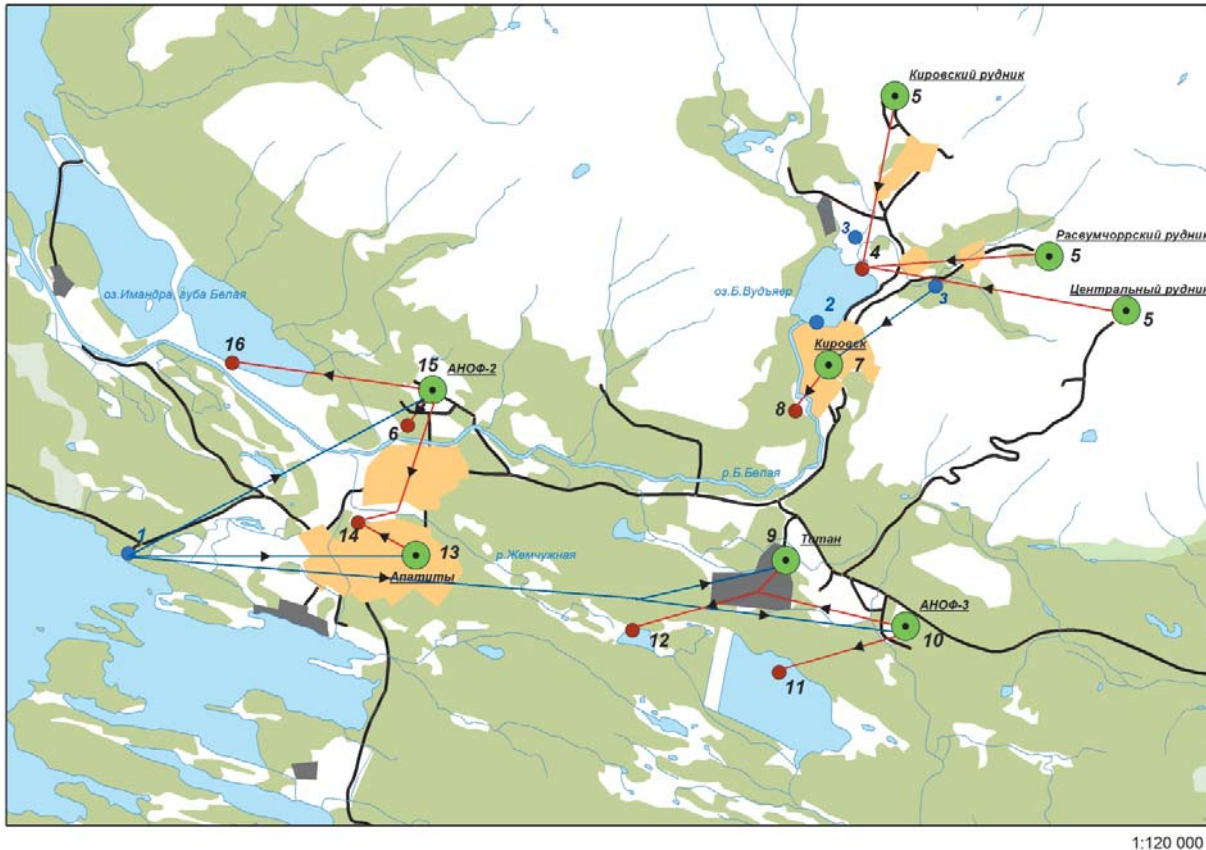


Рис. 2. Схема водопотребления и водоотведения Кировско-Апатитского района: 1 – водозабор, озеро Имандра; 2 – водозабор, озеро Б. Вудьявр; 3 – подземные водозаборы; 4 – отстойник рудничных вод, озеро Б. Вудьявр; 5 – сброс рудничных вод; 6 – сброс производственных сточных вод, река Б. Белая; 7 – коммунально-бытовые сточные воды Кировска; 8 – очистные сооружения Кировска, сброс в реку Б. Белую; 9 – коммунально-бытовые сточные воды поселка Титан и Апатитонелиновой обогатительной фабрики № 3 (АНОФ-3), сельскохозяйственные стоки; 10 – производственные стоки АНОФ-3; 11 – хвостохранилище АНОФ-3, сброс в реку Жемчужную; 12 – сброс коммунально-бытовых сточных вод поселка Титан; 13 – коммунально-бытовые сточные воды Апатитов; 14 – очистные сооружения Апатитов, сброс в реку Жемчужную; 15 – производственные стоки АНОФ-2; 16 – хвостохранилище АНОФ-2, сброс в реку Жемчужную – озеро Имандра
 Fig. 2. Water consumption and drainage scheme of the Kirovsk-Apatity district: 1 – water intake, Lake Imandra, 2 – water intake, Lake B. Vudyavr, 3 – underground water intakes, 4 – sump of mine wastewater, Lake B. Vudyavr, 5 – discharge of mine wastewater; 6 – discharges of industrial sewage, the Belyaya, 7 – municipal wastewater from Kirovsk; 8 – sewage treatment facilities of Kirovsk, discharge into the Belaya; 9 – municipal sewage of Titan village and ANOF-3, agricultural wastewater; 10 – industrial wastewater of ANOF-3; 11 – tailings dump ANOF-3, discharge into the Zhemchuzhna; 12 – municipal sewage discharge of Titan village; 13 – municipal wastewater of Apatity town; 14 – sewage treatment plant of Apatity town, discharge into the river Zhemchuzhna; 15 – industrial waste ANOF-2; 16 – tailings dump ANOF-2, discharge into the Zhemchuzhna – Lake Imandra

материальных, энергетических и информационных ресурсов, а также предоставлением ресурсов и услуг биосферы [9]. Нужно пересмотреть принципы использования пресных вод арктического региона, разрабатывать новые технологии, минимизирующие негативные последствия, оптимизировать систему управления и контроля их качества, обеспечивающие устойчивое развитие АЗРФ.

Необходимость поиска новых концепций развития была четко осознана уже в последней трети XX в., когда стали формулироваться принципы устойчивого развития человечества. За прошедшее время эта концепция претерпела значительную эволюцию от рассуждений о «немедленном прекращении экономического роста вообще», «пределах роста» и т. д. до появления новых моделей и направлений эконо-

мики, опирающихся на новейшие знания и технологии. В их основу положены нематериальные потоки финансов (в области информационных технологий) или/и природоподобные принципы циклического использования ресурсов и сокращение ресурсо- и энергоёмкости процессов (в производственных сферах). Движущими силами этого процесса являются не столько альтруистические и гуманитарные идеи, сколько понимание того, что новые технологии могут быть высокоприбыльными, создавать принципиально новые материалы. При этом новые экономики требуют не новых материальных ресурсов, но новых знаний, высокоинтеллектуального человеческого капитала. Таким образом, экологизация социально-экономического развития будет происходить не в результате давления на бизнес го-

Таблица 1. Динамика инвестиций в основной капитал организаций Мурманской области, направленных на охрану окружающей среды и некоторых показателей состояния и охраны окружающей среды

Показатель	1980	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017
Инвестиции:									
в основной капитал, млн руб.	—	41,3	29113,3	164,1	327,3	1452,6	2788,8	820,2	1299,3
в охрану водных ресурсов, млн руб.	—	—	—	—	—	—	2516,0	775,0	1061,8
в охрану водных ресурсов, % к итогу	—	39,5	32,7	34,9	37,1	31,9	90,2	94,5	81,7
Состояние и охрана окружающей среды, млн м ³ :									
забор воды из природных водных источников	1870	2641	—	1966	—	1775	1508	1491	—
объем сброса загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты	261	382	—	429	—	339	328	320	—

Источник: данные Федеральной службы государственной статистики, Комитета природных ресурсов по Мурманской области (за 1980 и 1990 гг.), отдела водных ресурсов по Мурманской области Двинско-Печорского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов (2000 г. и далее).

Таблица 2. Забор, использование и сброс воды по некоторым водным объектам Севера в 2015 г., млн м³ [5]

Водный объект	Забор воды из природных водных объектов, всего	Использование свежей воды				Потери воды при транспортировке	Сброс сточных вод в поверхностные водные объекты
		всего	в том числе на нужды				
			хозяйственно-питьевые	производственные	орошения, сельскохозяйственного водоснабжения		
Карское море	12043,4	10734,9	1463,3	6583,9	118,3	512,4	8146,6
В том числе Енисей	2464,6	2191,5	288,3	1669,2	42,6	129,2	2031,6
Обь	9059,1	8086,5	1118,8	4702,2	75,7	345,6	5943,5
Иртыш	2233,8	1740,0	551,9	978,8	33,1	200,3	1690,1
Лена	304,7	189,8	47,0	92,3	17,0	9,0	218,2
Печора	396,6	362,1	27,1	284,8	0,2	7,6	299,6
Белое море	1090,8	850,3	129,1	694,9	3,0	50,9	995,3
В том числе Северная Двина	581,6	548,1	96,9	437,6	2,9	33,5	505,3
Озеро Имандра	1284,7	1244,2	17,8	1220,0	0,0	8,8	1343,7

сударственных контролирующих структур или «зеленых» движений, а явится закономерным следствием накопления новых знаний, что создает предпосылки новых экономически эффективных неразрушающих технологий и бизнесов.

Вода — не только необходимый компонент существования любых биологических систем, но и важнейшее условие экономического роста, поскольку участвует в создании большинства продуктов, производимых обществом. При этом большая часть ис-

Таблица 3. Сброс основных загрязняющих веществ со сточными водами в водные объекты Российской Федерации [5]

Характеристика	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Объем сброса сточных вод, млрд м ³	50,9	49,2	48,1	45,5	42,9	43,9	42,9
Объем сброса сточных вод, требующих очистки, % общего объема сброшенных сточных вод	39	37	37	38	39	38	38
В составе сточных вод сброшено:							
сульфатов, тыс. т	2218,2	1915,4	1915,5	1987,5	1814,1	1760,7	1855,4
хлоридов, тыс. т	6657,3	5662,5	5399,9	5593,4	5724,7	5385,8	5570,2
азота общего, т	34475,9	36452,8	34195,9	32031,5	35864,5	27745,2	25496,1
нитратов, тыс. т	374,7	366,4	409,9	434,2	437,9	424,6	421,2
жиров и масел, т	8079,9	4098,9	3399,3	2862,9	2761,3	2168,9	2050,0
фенола, т	42,9	28,0	24,5	22,4	20,2	17,7	16,1

пользуемой воды возвращается в окружающую среду в виде сточных вод (см. табл. 2). Согласно [22] по мере увеличения общего спроса на водные ресурсы количество производимых сточных вод и их общее загрязнение непрерывно растут по всему миру. В большинстве случаев сточные воды рассматриваются как ненужный, побочный продукт, от которого необходимо избавиться с минимальными затратами. Как правило, сточные воды в основном сбрасываются непосредственно в окружающую среду без соответствующей обработки или недостаточно очищенными. Результаты, включая деградацию водных экосистем, токсическое воздействие и заболевания, передающиеся через воду, имеют долгосрочные социальные и экономические последствия.

Признание проблемы нехватки воды, роста спроса на воду, а также загрязнения водной среды определило в последнее десятилетие глобальный интерес к технологиям восстановления и утилизации сточных вод. Повторное использование сточных вод не только минимизирует объем и экологический риск их сброса, но и уменьшает давление на экосистемы, возникающее в результате изъятия пресной воды [23]. Однако на современном этапе процессы очистки сточных вод обычно энергоемки и требуют высоких инвестиционных и эксплуатационных затрат, а во время обработки значительные объемы парниковых газов и других летучих веществ выбрасываются в атмосферу, в больших количествах образуются осадки, требующие дальнейшего удаления и утилизации. Кроме того, многие ценные ресурсы, такие как соединения фосфора, азота, металлы, содержащиеся в сточных водах, не извлекаются и попадают в окружающую среду. Все это существенно снижает устойчивость и экономическую эффективность процесса [24].

Избыточное поступление в водоемы биогенных элементов (азота, фосфора и др.) в составе сточных вод приводит к проблемам эвтрофикации («цветение» вод, снижение их качества, ухудшение органолептических показателей, накопление цианотоксинов, снижение уровня растворенного кислорода и др.), вызывающим массовую гибель рыб и других гидробионтов, возрастание потенциальных угроз здоровью населения, деградацию экосистемных услуг. При этом сточные воды являются одним из важнейших источников компонентов и веществ циклического использования (табл. 3).

Повторное использование сточных вод и извлечение из них продуктов могут быть намного выгоднее, чем обращение к другим существующим источникам воды: поверхностным водам, подземным водам или опреснению [25—27]. Существующие системы водоборота на предприятиях АЗРФ не решают основных задач использования накапливающихся отходов и предотвращения загрязнения окружающей среды, поскольку существующие экономические модели не ставят таких задач. Образующаяся твердая фаза отходов складывается в хвостохранилищах и отстойниках, является источником загрязнения атмосферного воздуха, а растворимая фаза напрямую попадает в природные водоемы. Направляемые в производственный процесс оборотные воды требуют дополнительной обработки и разбавления чистыми водами. В целом это высокочрезвычайно затратный процесс.

Мировая практика показывает, что в условиях постоянно растущего спроса сточные воды все чаще становятся альтернативным устойчивым и экономически выгодным источником сырья, энергии, новых материалов, питательных и биологически активных веществ, новых типов удобрений и других полезных продуктов. Выгода от извлечения таких ресурсов из



Рис. 3. Цикл углерода при синтезе биодизеля микроводорослями и его использовании
 Fig. 3. The carbon cycle in the processes of biodiesel synthesis by microalgae and its use

сточных вод и их повторного использования определяется не только улучшением состояния окружающей среды (и в конечном счете здоровья человека), но и возможностью решения задач продовольственной и энергетической безопасности, снижения негативных воздействий на климатические системы [15; 28]. Так, при производстве биотоплива, поскольку этот процесс является углеродотрицательным, рентабельность очистки сточных вод увеличивается посредством углеродных кредитов и программ торговли квотами выбросов (рис. 3). В контексте циркулярной экономики с циклическим использованием продукта, когда экономическое развитие сбалансировано с охраной природных ресурсов и экологической устойчивостью, сточные воды представляют собой широкодоступный и ценный ресурс [22]. В настоящее время в области оборота сточных вод вместо понятий «избавиться» и «очистка» все больше доминирует «использование» как необходимый элемент циркулярных экономических моделей, решающих противоречия между производственным процессом, окружающей средой и экономикой [29].

Сточные воды больше не считаются отходами, потенциально наносящими ущерб окружающей среде, а скорее дополнительным ресурсом, который можно использовать для обеспечения устойчивости водопользования. Согласно оценкам глобальный рынок технологий «Zero liquid discharge» достигнет ежегодных инвестиций в размере не менее 100—200 млн долл., которые быстро распространяются из развитых стран Северной Америки и Европы в страны с развивающейся экономикой, такие как Китай и Индия [23]. Извлечение и повторное использование ресурсов из сточных вод прежде всего распространяются на сточные воды «биологического» происхождения (коммунальные стоки, сельское хозяйство, аквакультура, пищевая промышленность

и т. д.), позволяющие использовать природоподобные технологии извлечения ценных компонентов [30].

Большим препятствием для реализации принципов использования сточных вод в качестве источника сырья являются организационно-правовые аспекты. Часто в рамках парадигмы линейной экономики компании, сосредоточенные на эффективном распределении ресурсов на рынке и не учитывающие ограниченный и исчерпывающий характер природных ресурсов, достаточно узкоспециализированы и не заинтересованы в производстве непрофильных товаров путем переработки собственных отходов, предпочитая их складировать или сбрасывать в окружающую среду. Переход к принципам циркулярной экономики путем использования сточных вод потребует межотраслевого и междисциплинарного подхода, решения организационно-правовых вопросов собственности, ответственности и т. д. Проблема рентабельности ресурсов минерально-сырьевой базы Арктики, усиленная повышенными требованиями к соблюдению экологичности производства, обуславливает необходимость существенных функциональных изменений минерально-сырьевого комплекса. Он должен рассматриваться не только как основной источник экономической динамики арктических регионов и основа доходов местных бюджетов с одновременной фиксацией снижения ресурсного потенциала, но и как источник долгосрочных изменений, затрагивающих динамику и структуру всего регионального производства. В основе этих изменений — ориентация на комплексное использование ресурсов и услуг биосферы. Устойчивое развитие требует сбалансированного и одновременного рассмотрения экономических, экологических, технологических, правовых и социальных аспектов этих процессов и их взаи-

модействия [31; 32]. Создание таких промышленных систем подразумевает так называемый промышленный симбиоз с целью достижения экономических и экологических выгод путем использования побочных продуктов при одновременном сокращении отходов или эффективной их переработке [4].

Низкотемпературные биотехнологии как основа устойчивого водопользования в Арктике

Считается, что наиболее перспективными в ближайшем будущем станут природоподобные биомиметические технологии, повторяющие принципы функционирования биологических систем различного уровня, способные перерабатывать низкоконцентрированное сырье с невысокими энерго- и ресурсозатратами, приносящие экономическую выгоду и успешно конкурирующие с традиционными подходами в экономике («Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации», п. 22). Именно в экосистемах природой реализованы циклические принципы движения вещества и энергии, повторение которых в производственных процессах, потреблении и утилизации позволяет минимизировать негативные воздействия человека на окружающую его природу и получать прибыль. По оценкам Всемирного экономического форума, в основе четвертой технологической революции лежит слияние технологий, размывающих границы между физической, цифровой и биологической сферами. Она может радикально повысить глобальные уровни дохода и улучшить качество жизни населения во всем мире [33]. Причем скорость современных прорывов не имеет исторического прецедента, и биотехнологии, позволяющие использовать биологические организмы для получения потребительских материалов, — ключевое звено этих процессов. Важнейшим фактором, определяющим бурный рост биотехнологий, является снижение затрат на секвенирование ДНК [34]. Наибольшую выгоду от этого получают те, кто имеет доступ к новым технологиям, делающим возможным создание новых продуктов и услуг, повышающим эффективность и уровень жизни [35]. Все чаще появляются биотехнологии, которые являются альтернативой существующим технологическим процессам. Однако сегодня развитие биотехнологий в России явно недостаточно. Как отмечается в [36], доля России на рынке биотехнологий составляет сегодня менее 0,1%, а по ряду сегментов (биоразлагаемые материалы, биотопливо) практически равна нулю. Эта проблема особенно актуальна для АЗРФ, хотя именно здесь имеются огромные потребности и возможности.

Большое внимание в мире уделяется развитию биоэнергетики, сочетающей улавливание/консервацию углерода в возобновляемой биомассе и получение возобновляемой энергии, результирующие в отрицательные выбросы углекислого газа. Эта концепция основана на использовании солнечной

энергии для преобразования CO_2 в нужные биохимические соединения или биотопливо, интеграции фотосинтезирующих культур в производственные циклы с целью использования полученной биомассы в перерабатывающих отраслях или энергоустановках [37]. Получаемые эфиры жирных кислот являются альтернативным биодизелем и могут быть непосредственно получены из атмосферного углекислого газа без дополнительных стадий [38; 39].

В силу природно-климатических особенностей наиболее перспективными для АЗРФ являются так называемые синие низкотемпературные (холодно-водные) биотехнологии, основанные на использовании водных ресурсов. Они позволяют значительно снизить последствия глобальных и региональных изменений окружающей среды и климата. В концепцию синей экономики заложен фундаментальный принцип «используя ресурсы, доступные в каскадных системах, ...отходы одного продукта становятся вкладом в создание нового денежного потока», а решения определяются местной средой и физико-экологическими характеристиками [40]. Низкотемпературные биотехнологии могут стать одним из основных инструментов, обеспечивающих решение сформулированной в «Стратегии...» задачи преобразования фундаментальных знаний, поисковых научных исследований и прикладных исследований в продукты и услуги, способствующие достижению лидерства России на перспективных рынках (п. 23).

Перспективным направлением является очистка стоков различного происхождения от веществ-биогенов, являющихся сырьем для производства различных биопродуктов. Основой для подобных биотехнологий стала практика применения микроводорослей, позволяющих не только очистить стоки до нормативных показателей, но и получать ценнейшие продукты (биотопливо, биологически активные и лекарственные вещества, наноструктуры с заданными свойствами на основе биополимеров и т. д.), что снижает затраты на очистку и имеет большой потенциал прибыльности. Микроводоросли — уникальная группа фототрофных организмов, представленная многочисленными про- и эукариотическими видами и имеющая широчайший ареал распространения в природе: моря, реки, озера, почва. Водоросли встречаются повсюду, где есть влажность и какой-то доступный свет: в океане, на морском дне, в озерах, на льду, даже на стенах пещер. Используя солнечную энергию и минеральные вещества из окружающей среды, они создают первичное органическое вещество, используемое другими компонентами пищевых цепей, и обогащают атмосферу Земли кислородом, снижая содержание углекислого газа. Это одноклеточные микроорганизмы с огромным потенциалом применения в разных отраслях науки и техники. Перспективность использования микроводорослей в качестве основных агентов процессов переработки стоков определяется их способностью размножаться в универ-



Рис. 4. Водоросли *Ulothrix zonata* (а, б) и *Hydrurus foetidus* (Vill.) Trev. (г) в водных объектах Хибин весной: типичное местообитание (д) и внешний вид обрастаний (фото Д. Денисова)
Fig. 4. Algae *Ulothrix zonata* (a, б) and *Hydrurus foetidus* (Vill.) Trev. (г) in the streams of The Khibin Mountains in the spring: typical habitat (д) and appearance of fouling (photo by D. Denisov)

сальных условиях окружающей среды, поглощая биогены, обогащая воду кислородом, подавляя патогенную микрофлору и продуцируя огромную биомассу, пригодную для дальнейшей переработки и производства коммерчески ценных углеродотрицательных продуктов (биотоплива, биологически активных веществ и т. д.). Микроводоросли показывают более высокую эффективность удаления биогенных веществ, присутствующих в различных сточных водах, чем другие микроорганизмы, так как непосредственно используют эти вещества для роста. Они признаны одной из самых мощных платформ биотехнологий для многих продуктов с добавленной стоимостью, включая биотопливо, биологически активные соединения, корм для животных и аквакультуры и т. д. [41—44].

Использование сточных вод для выращивания микроводорослей делает очистку сточных вод экономически и энергоэффективной. Данные технологии позволяют наиболее полно реализовать принципиально новые модели устойчивого роста — циркулярные экономические модели, когда в процессе очистки воды и поглощения CO₂ производятся богатая протеинами, липидами, минеральными и биоло-

гически активными веществами органическая биомасса, экстракционные наноматериалы [44—48].

Однако в условиях умеренного климата, а тем более в Арктике эти технологии не нашли широкого применения, поскольку исследования и их применение традиционно позиционируются в районах с теплым климатом. Использование имеющихся разработок в условиях Арктики ограничивается необходимостью поддержания относительно высоких температур рабочих сред, что резко снижает рентабельность процесса. В то же время исследования биологического разнообразия арктического региона показывают, что в природе имеется большое количество микроводорослей, адаптировавшихся к жизни в арктических условиях, способных эффективно использовать доступные ресурсы в диапазоне температур, близких к 0°C, и обладающих равной или даже большей продуктивностью по сравнению с теплолюбивыми штаммами (рис. 4). Необходимо развитие новых направлений исследований по выделению из природных сред этих организмов, оценка их эффективности для решения конкретных проблем и разработки технологий на их основе. Тот факт, что в арктических природных водоемах тем-

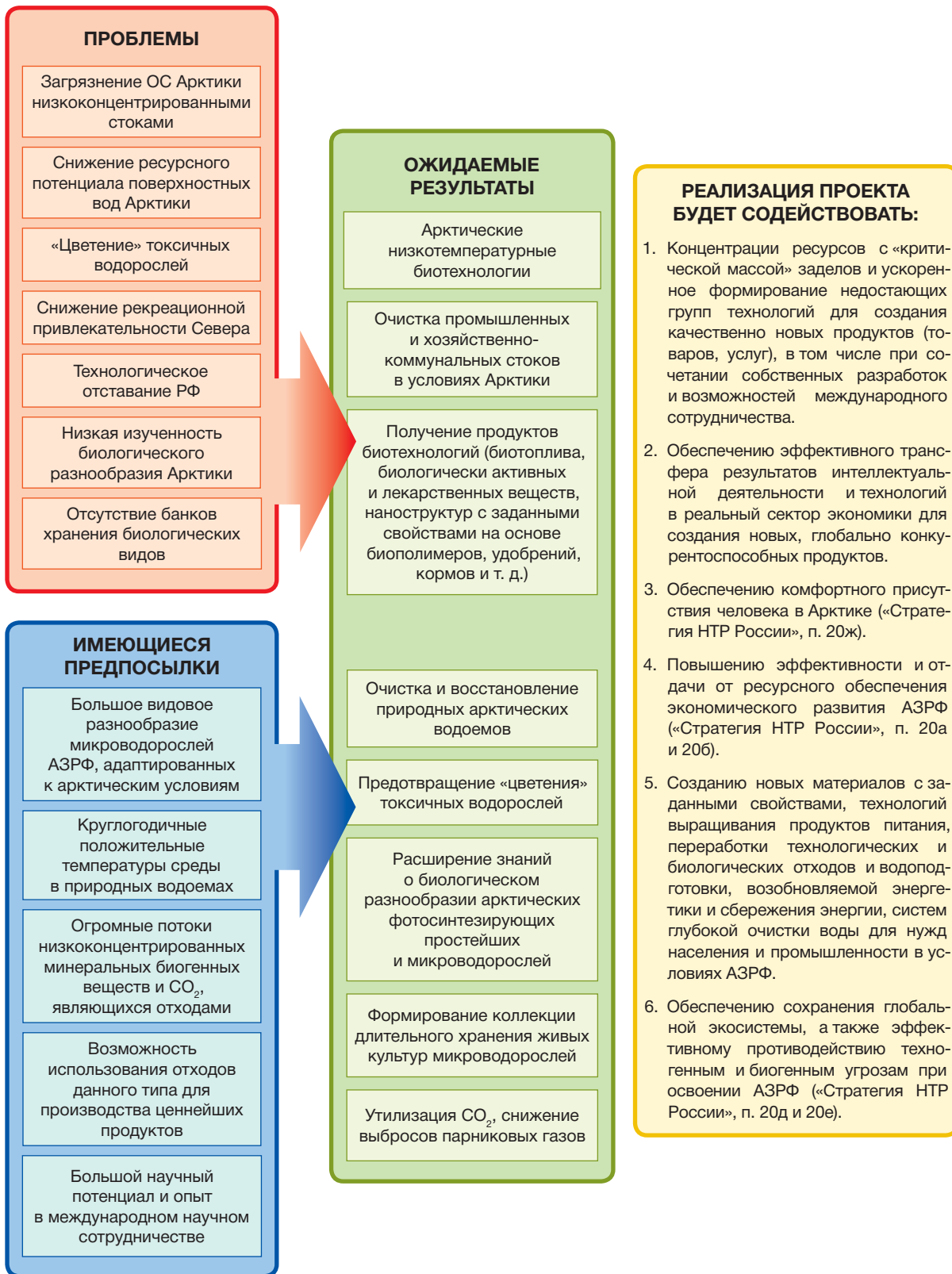


Рис. 5. Ожидаемые результаты развития биотехнологий на основе микроводорослей в АЗРФ
 Fig. 5. Expected results of development of biotechnologies based on microalgae in the Russian Arctic

пература среды круглогодично характеризуется положительными значениями, дает неоспоримые преимущества использованию синих биотехнологий по сравнению с «наземными», имеющими выраженный сезонный характер. Синие биотехнологии имеют на порядки большую продуктивность на единицу площади в пересчете на год, позволяют избежать использования земель сельскохозяйственного назначения для производства технической продукции, сочетать эти производства с очисткой водной среды.

В России пробел в данной области исследований достаточно очевиден. В АЗРФ развита горнодобывающая промышленность, ведущая разработку полезных ископаемых с использованием азотсодержащих взрывчатых веществ, обуславливающую загрязнение биогенными веществами природных водоемов. Существенную экологическую нагрузку в виде коммунально-бытовых стоков дают города и сельское хозяйство. Новыми значимыми источниками загрязнения водной среды биогенными веществами становятся бурно развивающиеся предприятия аквакультуры. Стандартные технологии водоочистки не справляются с огромными объемами низкоконцентрированных стоков или вовсе отсутствуют. Разработка адаптированных к арктическим условиям технологий очистки сточных вод с использованием микроводорослей находится на самых начальных этапах и в основном за рубежом. В настоящее время для изучения и коммерческого использования биотехнологического потенциала холодноводных микроводорослей в странах Северной Европы создаются специализированные биотехнологические центры. Так, инновационные разработки основанной в 2014 г. «Swedish Algae Factory» позволяют не только очищать воду, поглощая CO_2 и получая эффективную экологически чистую биомассу, но и создавать новые наноматериалы, повышающие эффективность солнечных батарей. Для содействия выходу России на лидирующие позиции в области разработки низкотемпературных биотехнологий, в том числе по отдельным направлениям биомедицины, агробиотехнологий, промышленной биотехнологии и биоэнергетики, применимых в АЗРФ, требуется создать межинституционный научно-технологический центр, объединяющий усилия специалистов разных областей знаний и промышленности (рис. 5).

Мурманскую область можно рассматривать как уникальный модельный полигон для решения задач, связанных с разработкой основ сохранения ресурсного потенциала пресных вод АЗРФ. Накоплен большой опыт изучения состояния микробиоты в природных средах, собраны коллекции арктических микроводорослей, разработаны методики исследований микроорганизмов в реальных условиях. Получены знания, дающие ключи к пониманию особенностей функционирования сообществ микроводорослей в различных арктических экосистемах, включая их взаимодействие с другими биотическими и абиотическими компонентами этих систем.

Однако для выполнения полного спектра работ и реализации приоритетных инновационных и инвестиционных проектов в области низкотемпературной биотехнологии путем решения ряда актуальных научных, экономических и инженерных проблем, связанных с экологически безопасным, устойчивым и эффективным территориальным развитием, позволяющим повысить качество жизни человека в Арктике, необходимо создать региональную научно-производственную инфраструктуру развития биотехнологий в АЗРФ. Первоочередными задачами являются: выделение из природных сред и создание коллекций микроорганизмов, способных эффективно «работать» в диапазоне температур, близких к 0°C , оценка эффективности выделенных микроорганизмов в различных технологических процессах, разработка арктических низкотемпературных биотехнологий мирового уровня, направленных на решение конкретных технологических и экологических задач.

Организация регионального биотехнологического центра позволит сфокусировать накопленные знания и интеллектуальные ресурсы на создание продуктов, предназначенных для расширения присутствия человека в АЗРФ, развития ресурсодобывающих отраслей, природоохранных технологий, обеспечивающих условия для формирования системы устойчивого развития региона, адаптированной к возрастающей антропогенной нагрузке на окружающую среду в условиях интенсификации освоения АЗРФ, в форме комплексных научно-технических проектов, включающих все этапы инновационного цикла от получения новых фундаментальных знаний до их практического использования, создания технологий, продуктов и услуг и их выхода на рынок. Это в конечном счете будет содействовать выходу России на лидирующие позиции в области разработки низкотемпературных биотехнологий.

Заключение

Подводя итоги, можно утверждать, что существующие экономические модели не способны обеспечить устойчивое развитие АЗРФ и технологическое лидерство в Арктике. Необходимо выработать стратегию использования природных ресурсов региона, основанную на знаниях, новых технологиях и экономических моделях, позволяющих значительно повысить прибыльность и экологичность производственных процессов, значительно расширить ресурсную базу, обеспечить устойчивое развитие. Одним из инновационных направлений в этой области должны стать низкотемпературные биотехнологии.

Возможно ли сейчас сформулировать эту стратегию изменений? Обоснованно считаем: возможно и своевременно. Возможность определяется уже созданным прочным фундаментом накопленных знаний, требующим постановки и решения задач нового уровня. Своевременность предопределена новым подходом к управлению АЗРФ как единым

объектом государственного планирования, требующим постановки долгосрочных целей на новых принципах устойчивого развития.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-05-60125 «Крупные озера Арктики в условиях глобальных и региональных изменений окружающей среды и климата»).

Литература/References

1. Павленко В. И. Арктическая зона Российской Федерации в системе обеспечения национальных интересов страны // Арктика: экология и экономика. — 2013. — № 4 (12). — С. 16—25.
 Pavlenko V. I. Arkticheskaya zona Rossiiskoi Federatsii v sisteme obespecheniya natsional'nykh interesov strany. [Arctic zone of the Russian Federation in the system of national interests of the country]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2013, no. 4 (12), pp. 16—25. (In Russian).

2. Татаркин А. И., Захарчук Е. А., Логинов В. Г. Современная парадигма освоения и развития Арктической зоны Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 2 (18). — С. 4—13.
 Tatarikin A. I., Zakharchuk E. A., Loginov V. G. Sovremennaya paradigma osvoeniya i razvitiya Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii. [The modern paradigm of development of the Arctic zone of the Russian Federation]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2015, no. 2 (18), pp. 4—13. (In Russian).

3. Ness D. Sustainable urban infrastructure in China: Towards a Factor 10 improvement in resource productivity through integrated infrastructure systems. Intern. J. Sustain. Dev. World Ecol., 2008, 15, pp. 288 —301. DOI: 10.3843/SusDev.15.4.2.

4. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. J. of Cleaner Production, 2016, vol. 114, pp. 11—32. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.

5. Охрана окружающей среды в России. 2016: Стат. сб. / Росстат. — М., 2016. — С. 0—92.
 Okhrana okruzhayushchei sredy v Rossii. [Environmental protection in Russia. 2016]. Stat. sb. Rosstat. Moscow, 2016, pp. 0—92. (In Russian).

6. Preston F. A global redesign? Shaping the circular economy. The Royal Inst. of Intern. Affairs. London, Chatham House, 2012.

7. Lacy P., Rosenberg D., Drewell Q., Rutqvist J. 5 Business Models that are Driving the Circular Economy, 2013. Available at: <https://www.fastcompany.com/1681904/5-business-models-that-are-driving-the-circular-economy>.

8. Planing P. Business model innovation in a circular economy reasons for non-acceptance of circular business models. Open J. of Business Model Innovation, 2015, vol. 1, p. 11.

9. Erkman S. Industrial ecology: an historical view. J. of Cleaner Production, 1997, vol. 5, no. 1—2, pp. 1—10.

10. Preston F., Lehne J. A Wider Circle? The Circular Economy in Developing Countries. London, Chatham House, 2017, 24 p.

11. Qadir M., Smakhtin V. Where the Water Is. Project Syndicate. 2018. Available at: <https://www.project-syndicate.org/commentary/tapping-unconventional-freshwater-sources-by-manzoor-qadir-and-vladimir-smakhtin-2018-05>.

12. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. ООН, 2015. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/420355765>.
 Preobrazovanie nashego mira: Povestka dnya v oblasti ustoichivogo razvitiya na period do 2030 goda. OON, 2015. [Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 70/1. UN. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/420355765> (In Russian).

13. Global Risks 2015, 10th Edition. World Economic Forum. Geneva, 2015. Available at: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_2015_Report15.pdf.

14. Schwarzenbach R. P., Egli T., Hofstetter T. B., Urs von Gunten U., Wehrli B. Global water pollution and human health. Annual Rev. of Environment and Resources, 2010, 35, pp. 109—136.

15. Cosgrove W. J., Loucks D. P. Water management: Current and future challenges and research directions. Water Resources Research, 2015, vol. 51, no. 6, pp. 4823—4839.

16. Hoekstra A. Y. Water scarcity challenges to business. Nature climate change. 2014, vol. 4, no. 5, pp. 318—320. DOI: 10.1038/nclimate2214.

17. Water. Global Issue. Socio-Economic and Demographic Drivers. WEF, 2018. Available at: <https://toplink.weforum.org/knowledge/insight/a1Gb00000015MLgEAM/explore/dimension/a1Gb0000001TbSMEA0/summary>.

18. Kashulin N. A., Dauvalter V., Denisov D., Valkova S. Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk region, Russia. J. of Environmental Science and Health. 2017, pt. A, 52 (9), pp. 921—929. DOI: 10.1080/10934529.2017.1318633.

19. Кашулина Т. Г., Кашулин Н. А., Даувальтер В. А. Долговременная динамика гидрохимических показателей низкоминерализованного субарктического озера при снижении кислотной нагрузки // Вестн. Мурман. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 19. — № 1—2. — С. 194—206.
 Kashulina T. G., Kashulin N. A., Dauval'ter V. A. Dolgovremennaya dinamika gidrokhimicheskikh pokazatelei nizkomineralizovannogo subarkticheskogo ozera pri snizhenii kislотноi nagruzki. [The long-term dynamics of hydrochemical indices of low-mineralized subarctic lakes in reducing the acid load]. Vestn. Murm. gos. tekhn. un-ta, 2016, vol. 19, no. 1—2, pp. 194—206. (In Russian).

20. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Гидрохимия озер Большеземельской тундры // Метеорология и гидрология. — 2017. — № 8. — С. 93—104.

- Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. *Gidrokimiya ozer Bol'shezemel'skoi tundry*. [Hydrochemistry of Lakes in Bol'shezemel'skaya Tundra]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2017, no. 8. pp. 93—104. (In Russian).
21. Ломакина Н. В. Реформенные трансформации и их результаты в минеральном секторе Дальнего Востока // *Пространств. экономика*. — 2018. — № 1. — С. 59—82. — DOI: 10.14530/se.2018.1.059-082.
- Lomakina N. V. Reformennye transformatsii i ikh rezultaty v mineral'nom sektore Dal'nego Vostoka. [Reform Transformations and Their Results in the Mineral Sector of the Far East]. *Prostranstv. ekonomika*, 2018, no. 1, pp. 59—82. DOI: 10.14530/se.2018.1.059-082. (In Russian).
22. Wastewater: the untapped resource. UN world water development report 2017.
23. Tong T., Elimelech M. The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions. *Environmental science & technology*, 2016, vol. 50, no. 13, pp. 6846—6855.
24. Li W. W., Yu H. Q., He Zh. Towards sustainable wastewater treatment by using microbial fuel cells-centered technologies. *Energy & Environmental Science*, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 911—924. Available at: <http://dx.doi.org/10.1039/C3EE43106A>.
25. Hernández-Sancho F., Molinos M., Sala-Garrido R. Economic valuation of environmental benefits from wastewater treatment processes: An empirical approach for Spain. *Science of the Total Environment*, 2010, vol. 408, no. 4, pp. 953—957. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.10.028.
26. Molinos-Senante M., Hernández-Sancho F., Mocholí-Arce M., Sala-Garrido R. Economic and environmental performance of wastewater treatment plants: Potential reductions in greenhouse gases emissions. *Resource and Energy Economics*, 2014, vol. 38, pp. 125—140. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2014.07.001>.
27. Ruiz-Rosa I., García-Rodríguez F. J., Mendoza-Jiménez J. Development and application of a cost management model for wastewater treatment and reuse processes. *J. of Cleaner Production*, 2016, vol. 113, pp. 299—310. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.044>.
28. Papa M., Alfonsín C., Moreira M. T., Bertanza G. Ranking wastewater treatment trains based on their impacts and benefits on human health: a “Biological Assay and Disease” approach. *J. of Cleaner Production*, 2016, vol. 113, pp. 311—317. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.021>.
29. Grant S. B., Saphores J.-D., Feldman D. L., Hamilton A. J., Fletcher T. D., Cook P. L. M., Stewardson M., Sanders B. F., Levin L. A., Ambrose R. F., Deletic A., Brown R., Jiang S. C., Rosso D., Cooper W. J., Marusic I. Taking the “waste” out of “wastewater” for human water security and ecosystem sustainability. *Science*, 2012, vol. 337, iss. 6095, pp. 681—686. DOI: 10.1126/science.1216852.
30. Wood A., Blackhurst M., Hawkins T., Xue X., Ashbolt N., Garland J. Cost-effectiveness of nitrogen mitigation by alternative household wastewater management technologies. *J. of environmental management*, 2015, vol. 150, pp. 344—354. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.10.002.
31. Guidelines for the Integration of Sustainable Agriculture and Rural Development. The concept of SARD. FAO, Food and Agriculture Organization. 2002. Available at: <http://www.fao.org/docrep/w7541e/w7541e04.htm>.
32. Reh L. Process engineering in circular economy. *Particuology*, 2013, 11, pp. 119—133. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.11.001>.
33. Harnessing the Fourth Industrial Revolution. WEF, 2018. Available at: <https://toplink.weforum.org/knowledge/insight/a1Gb0000001hXikEAE/explore/dimension/a1Gb00000044D65EAE/summary>.
34. Carlson R. Time for New DNA Synthesis and Sequencing Cost Curves. *Synthetic Biology News*. 2014. Available at: <https://synbiobeta.com/time-new-dna-synthesis-sequencing-cost-curves-rob-carlson/>.
35. Tueth M. Fundamentals of sustainable business: a guide for the next 100 years. World Scientific Books. 2009, 228 p.
36. Комплексная программа развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 года. — Утв. Правительством РФ 24 апреля 2012 г. № 1853П-П8.
- Kompleksnaya programma razvitiya biotekhnologii v Rossiiskoi Federatsii na period do 2020 goda. Utv. Pravitel'stvom RF 24 aprelya 2012 g. № 1853P-P8 [Integrated program for the development of biotechnologies in the Russian Federation for the period until 2020. The Government of Russia of April 24, 2012. № 1853P-P8]. (In Russian).
37. Woo H. M. Solar-to-chemical and solar-to-fuel production from CO₂ by metabolically engineered microorganisms. *Current opinion in biotechnology*, 2017, vol. 45, pp. 1—7. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.11.017>.
38. Hansen A. S. L., Lennen R. M., Sonnenschein N., Hergård M. J. Systems biology solutions for biochemical production challenges. *Current opinion in biotechnology*, 2017, vol. 45, pp. 85—91. DOI: 10.1016/j.copbio.2016.11.018.
39. Poggi-Varaldo H. M., Devault D. A., Macarie H., Sastre-Conde I. Environmental biotechnology and engineering: crucial tools for improving and caring for the environment and the quality of life of modern societies. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, pp. 25483—25487. DOI:10.1007/s11356-017-0621-y.
40. Pauli G. A. The Blue Economy Version 2.0: 200 Projects Implemented, US\$ 4 Billion Invested, 3 Million Jobs Created: a Report to the Club of Rome — Academic Foundation. 2015. 419 p.
41. Chew K. W., Yap J. Y., Show P. L., Suan N. H., Juan J. C., Ling T. C., Lee D. J., Chang J. S. Microalgae biorefin-

ery: High value products perspectives. *Bioresource technology*, 2017, 229, pp. 53—62. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.01.006.

42. *Moreno-Garcia L., Adjallé K., Barnabé S., Raghavan G. S. V.* Microalgae biomass production for a bio-refinery system: recent advances and the way towards sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 2017, 76, 493—506. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.024>.

43. *Razzak S. A., Ali S. A. M., Hossain M. M., deLasa H.* Biological CO₂ fixation with production of microalgae in wastewater – A review. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 2017, vol. 76, pp. 379—390. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.038>.

44. *Salama E.-S., Abou-shanab R., Yang Il-S., Jeon B.-H., Kurade M., El-Dalatony M. M., Min B.* Recent progress in microalgal biomass production coupled with wastewater treatment for biofuel generation. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 2017, 79, pp. 1189—1211. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.091.

45. *Milano J., Hwai Chyuan Ong, Masjuki H. H., Chong W. T., Man Kee Lam, Ping Kwan Loh, Vellayan V.*

Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 2016, 58, pp. 180—197. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.150>.

46. *Wang Y., Ho S. H., Cheng C., L., Guo W. Q., Nagarajan D., Ren N. Q., Lee D. J., Chang J. S.* Perspectives on the feasibility of using microalgae for industrial wastewater treatment. *Bioresource technology*, 2016, 222, pp. 485—497. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.09.106.

47. *Suganya T., Ho S. H., Cheng C., L., Guo W. Q., Nagarajan D., Ren N. Q., Lee D. J., Chang J. S.* Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: a biorefinery approach. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 2016, 55, pp. 909—941. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.026>.

48. *Zhou W., Wang J., Chen P., Ji C., Kang Q., Lu B., Li K., Liu J., Ruan R.* Bio-mitigation of carbon dioxide using microalgal systems: Advances and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 2017, 76, pp. 1163—1175. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.065>.

Информация об авторах

Кашулин Николай Александрович, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты, Мурманская область, мкр. Академгородок, д. 14а), e-mail: nikolay@iner.ksc.ru.

Скуфьина Татьяна Петровна, доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий отделом, Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина ФИЦ «КНЦ РАН» (184200, Россия, Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, д. 24а).

Даувальтер Владимир Андреевич, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты, Мурманская область, мкр. Академгородок, д. 14а), e-mail: vladimir@iner.ksc.ru.

Котельников Владимир Александрович, научный сотрудник, Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Апатиты, Мурманская область, мкр. Академгородок, д. 18, офис ПАБСИ), e-mail: v.kotelnikov2682@gmail.com.

Библиографическое описание данной статьи

Кашулин Н. А., Скуфьина Т. П., Даувальтер В. А., Котельников В. А. Устойчивое водопользование в Арктике. Новые подходы и решения // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 4 (32). — С. 15—29. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-15-29.

SUSTAINABLE WATER USE IN THE ARCTIC. NEW APPROACHES AND SOLUTIONS

Kashulin N. A.

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

Skufina T. P.

Luzin Institute for Economic Studies — Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences» (Apatity, Murmansk region, Russian Federation)

Dauvalter V. A.

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

Kotelnikov V. A.

Polar Alpine Botanical Garden and Institute of the Kola Science Centre of the RAS
(Apatity, Murmansk region, Russian Federation)

The article was received on June 29, 2018

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-05-60125 “Large Arctic lakes under the global and regional environmental and climatic changes”.

Abstract

The article considers the reasons for the decrease in the resource potential of surface waters in the European part of the Arctic region. The existing linear nature-destructive economic models in the conditions of the Arctic do not ensure the sustainable development of the region, leading to the degradation of natural systems. The solution could be a search for new approaches and principles of environmental management based on innovative models and nature-like principles of circular economy, accumulated knowledge in the fields of ecology and biomimetics. The possibility of implementing the global trend of wastewater reuse in the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF) is considered.

In the context of circular economy with cyclical product use, when economic development is balanced with the protection of natural resources and environmental sustainability, wastewater is a widely available and valuable resource. Due to the reuse, wastewater becomes an additional resource that ensures the water use sustainability. The basis of these approaches are nature-like biomimetic technologies, repeating the principles of functioning of biological systems at various levels, capable of processing low-concentrated raw materials, with low energy and resource costs, providing economic benefits and successfully competing with traditional approaches in the economy. To implement priority innovation and investment projects in the field of low-temperature biotechnology, it is obvious that a regional research and production infrastructure for the biotechnology development will be created in the Russian Arctic.

Keywords: *Arctic, sustainable water use, circular economy, biotechnology, microalgae.*

Information about the authors

Kashulin Nikolay Alexandrovich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Chief Researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre of the RAS (14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209), e-mail: Nikolay@inep.ksc.ru.

Skoufina Tatyana Petrovna, Doctor of Economic Sciences, Professor, Chief Researcher, Head of the Department, Luzin Institute for Economic Studies — Subdivision of the Kola Science Centre of the RAS (24a, Fersman Street, Apatity, Murmansk region, Russia, 184200).

Dauvalter Vladimir Andreyevich, Doctor of Geographic Sciences, Professor, Chief Researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre of the RAS (14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209), e-mail: vladimir@inep.ksc.ru.

Kotelnikov Vladimir Alexandrovich, Researcher, Polar Alpine Botanical Garden and Institute of the Kola Science Centre of the RAS (18, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209), e-mail: v.kotelnikov2682@gmail.com.

Bibliographic description

Kashulin N. A., Skufina T. P., Dauvalter V. A., Kotelnikov V. A. Sustainable water use in the Arctic. New approaches and solutions. Arctic: ecology and economy, 2018, no. 4 (32), pp. 15—29. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-15-29. (In Russian).

© Kashulin N. A., Skufina T. P., Dauvalter V. A., Kotelnikov V. A., 2018