

Н.Я. ШАПАРЕВ*, **, **А.В. АНДРИАНОВА***, ***

*Институт вычислительного моделирования СО РАН,
660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44, Россия, shaparev@icm.krasn.ru, AndrAV@icm.krasn.ru

**Сибирский Федеральный университет,

660041, Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия, shaparev@icm.krasn.ru

***Научно-исследовательский институт экологии рыбохозяйственных водоемов,
660097, Красноярск, ул. Парижской Коммуны, 33, Россия, AndrAV@icm.krasn.ru

ПОКАЗАТЕЛИ УСТОЙЧИВОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ Р. ЕНИСЕЙ

В соответствии с Водной стратегией Российской Федерации на период до 2020 г. в показателях устойчивого водопользования рассматривается одна из крупных рек мира — Енисей. Для этой цели применялись показатели водопользования ООН, региональные показатели, разработанные нами ранее, и гидробиологические показатели, которые можно рассматривать в качестве меры устойчивости экосистемы, поскольку они отражают реакцию гидробионтов на антропогенное воздействие. Сформированная система показателей включает четыре критерия: гидрографические характеристики, социально-экономическое состояние водопользования, характеристика сточных и качество поверхностных вод, биологические ресурсы. Каждый из критериев представлен несколькими индикаторами, содержание которых определяется статистическими материалами за 1993–2015 гг.; численными оценками, проведенными авторами; экспедиционными и литературными данными. Показано, что расход воды в бассейне Енисея не эффективен: техническое состояние систем водоснабжения изношено, доля повторно-последовательного и оборотного использования воды низкая, а показатель водопользования на единицу валового внутреннего продукта высокий. В связи с падением уровня производства забор свежей воды и сброс сточных вод уменьшились, однако это не улучшило качества поверхностных вод. Химические и биологические методы оценки качества воды в Енисее показали сходные результаты, соответствующие градациям «загрязненная» и «грязная». Русловое зарегулирование Енисея изменило термический режим реки, что в итоге привело к структурным перестройкам биологических сообществ и способствовало снижению устойчивости водной экосистемы.

Ключевые слова: Енисей, гидрография, социально-экономическое состояние водопользования, качество вод, биологические ресурсы.

N.YA. SHAPAREV*, **, **A.V. ANDRIANOVA***, ***

*Institute of Computational Modeling Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, str. 44, Russia, shaparev@icm.krasn.ru, AndrAV@icm.krasn.ru

**Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, pr. Svobodnyi, 79, Russia, shaparev@icm.krasn.ru

***Scientific Research Institute of Ecology of Fishery Reservoirs, 660097, Krasnoyarsk, ul. Parizhskoi
Kommuny, 33, Russia, AndrAV@icm.krasn.ru

THE YENISEI RIVER IN TERMS OF SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT

One of the world's largest rivers, Yenisei, is considered in terms of sustainable water management, in accordance with the Water Strategy of the Russian Federation into 2020. For that purpose, the UN indicators of water management and the regional indicators (developed by the authors previously) were used as well as the hydrobiological indicators which they can be regarded as the measure of ecosystem stability as they reflect the response of hydrobionts to the anthropogenic effect. The system of indicators thus generated includes four criteria: hydrographic characteristics, the socioeconomic state of water management, waste water characteristics, the surface water quality, and biological characteristics. Each of the criteria is represented by several indicators whose contents are filled with statistical material for the period 1993–2015, by numerical estimates made by these authors, and by expedition-based and published data. It is shown that the water discharge within the Yenisei basin is ineffective: the technical status of the water supply systems is in serious decay, the proportion of recycled and reused water is low, and the water consumption indicator per unit of gross domestic product is high. Because of the decline of the production level, freshwater intake and waste water discharge have decreased; however, this has not led to any improvement in surface water quality. The chemical and biological methods of water quality assessment for the Yenisei river have shown similar results corresponding to the «contaminated» and «dirty» classes. Channel storage of the Yenisei changed its thermal regime, resulting in structural rearrangements of biological communities and triggering a decrease in stability of the aquatic ecosystem.

Keywords: Yenisei, hydrography, socio-economic state of water use, biological resources.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Жизнедеятельность человечества связана с использованием водных ресурсов для питья, производства продуктов питания и промышленных товаров, добычи сырья, получения энергии. Однако чистая вода становится все большим дефицитом и, согласно прогнозу [1], в период с 2035 по 2045 г. объемы потребления свежей воды в мире сравняются с доступными водными ресурсами. Дефицит воды со временем будет только обостряться и потребует международной интеграции в управлении природными ресурсами [2].

Россия имеет около 10 % мирового речного стока, поэтому в будущем, вслед за «нефтяным» периодом, водные ресурсы могут стать главным преимуществом социально-экономического развития России [3], и особая роль в этом отводится водным ресурсам Сибири [4].

Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 г. [5] «определяет основные направления деятельности по развитию водохозяйственного комплекса России, обеспечивающего устойчивое водопользование, охрану водных объектов, защиту вод от негативного воздействия, а также по формированию и реализации конкурентных преимуществ Российской Федерации в водоресурсной сфере». Эффективное и рациональное водопользование может быть реализовано на основе системы показателей устойчивого развития [6]. Вода — возобновляемый природный ресурс, поэтому главная задача водопользования связана с поддержанием этой возобновляемости, а именно с сохранением условий, при которых потребности людей в необходимом количестве качественной воды удовлетворяются без нарушения функционирования экосистем речного бассейна и без ущерба для будущих поколений.

Для эффективного решения проблем водообеспечения населения и отраслей экономики предлагается использовать бассейновый подход. Он позволяет выделять региональные системы водопользования, учитывать природно-экологические и социально-экономические характеристики региона и уже активно используется для оптимизации водохозяйственной отрасли. Например, разработаны подходы к формированию устойчивого водопользования в бассейне р. Оби [7], выполнен анализ состояния Волжского бассейна в обобщенных показателях [8], предложены основные принципы и меры по обеспечению эффективного водопользования на территории бассейнов трансграничных рек Амур [9] и Селенга [10].

В данной статье с точки зрения устойчивого водопользования рассматривается одна из крупных рек мира — Енисей. Для этой цели использованы показатели водопользования ООН [6], региональные показатели, разработанные нами ранее [11–14], гидробиологические показатели как мера стабильности экосистемы, поскольку они отражают реакцию гидробионтов на антропогенное воздействие на водоток и его экологическое состояние. Сформированная система показателей включает четыре критерия (гидрографические характеристики, социально-экономическое состояние водопользования, характеристики сточных и качество поверхностных вод, биологические ресурсы), каждый из которых представлен индикаторами, раскрывающими содержание критерия.

Набор данных для содержательного наполнения индикаторов включает статистические материалы, выполненные авторами численные оценки, собственные материалы экспедиционных исследований и литературные данные. Статистические данные по водным ресурсам заимствованы из государственных докладов «О состоянии и охране окружающей среды Красноярского края» за период с 1993 по 2015 г. [15], «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2009 году» [16], «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Красноярском крае в 2008 г.» [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Критерий 1. Гидрографические характеристики. Енисей протекает в центре России в меридиональном направлении на север, и его протяженность составляет 3487 км. На своем пути он пересекает горно-таежную, степную, лесную и тундровую природные зоны. По физико-географическим условиям, характеру строения долины и русла, водному режиму Енисей делят на верхний (исток—устье р. Ангара), средний (р. Ангара—устье р. Нижней Тунгуски) и нижний (р. Нижняя Тунгуска—устье р. Енисей) участки.

С запада в Енисей впадают в основном небольшие реки, на востоке есть ряд мощных притоков (Ангара, Подкаменная Тунгуска и Нижняя Тунгуска, Курейка, Хантайка). Долина Енисея в районе с. Туруханск достигает 40 км, а в районе Дудинки — 150 км. Помимо природных факторов гидрографические особенности реки обусловлены сооружением каскада гидроэлектростанций на самом Енисее (Саяно-Шушенская, Майнская, Красноярская) и на его притоке — р. Ангаре (Иркутская, Братская,

Усть-Илимская и Богучанская). Так, водный режим Енисея на значительном участке определяется Красноярской ГЭС, строительство которой привело к понижению температура воды в нижнем бьефе летом с 20–25 до 8–12 °С и нарушило режим рекреационных зон Красноярска. В зимний период в нижнем бьефе ГЭС образуется незамерзающая полынья протяженностью в отдельные годы до 500 км.

Индикатор 1.1. Общая площадь речного бассейна Енисея — 2,58 млн км². Она вмещает 71 % территории Красноярского края. Енисей обеспечивает около 60 % водозабора в крае, таким образом система показателей устойчивого водопользования в Красноярском крае фактически отражает водопользование в бассейне Енисея.

Индикатор 1.2. Площадь эксплуатируемой части водного бассейна в настоящее время составляет почти 28 %. Разведка, добыча газа и нефти и освоение северных территорий края будут способствовать ее увеличению.

Индикатор 1.3. Речной сток Енисея — около 630 км³ в средний по водности год. Это примерно 14 % речного стока всей страны (1,5 % годового стока рек мира).

Индикатор 1.4. Площадь речного бассейна, занятая лесами, составляет 63 % территории бассейна. Масштабы вырубок лесов на территории водного бассейна в настоящее время достигают 40 тыс. га в год (0,025 % от общей площади лесов), что сопоставимо с площадями естественного лесовосстановления и лесопосадок здесь.

Индикатор 1.5. Доля распаханности территории водного бассейна — 1,2 % (2978 тыс. га) от площади бассейна. Сельскохозяйственные угодья края расположены в основном полосами шириной 100 км на верхнем участке Енисея.

Индикатор 1.6. Плотность гидрологической сети составляет 6 тыс. км² на одну гидрологическую станцию [14]. Сеть включает 137 гидрологических постов, что явно недостаточно и требует увеличения числа постов в условиях освоения северных территорий края.

Критерий 2. Социально-экономическое состояние водопользования. *Индикатор 2.1. Ежегодный забор поверхностных вод* в Красноярском крае в 1993–2015 гг. представлен в табл. 1. За эти годы забор свежей воды упал на 43 % — с 3992 до 2290 млн м³, что связано с экономическими трансформациями в России. Из поверхностных вод в бассейне Енисея в 2015 г. забиралось около 1883 млн м³ в год, или 82,2 % от общего количества забранной воды. Учитывая, что речной сток равен 630 км³/год, использование водного ресурса Енисея составляет 0,3 %. Поскольку центральные и южные районы края, где сосредоточено основное водопользование, занимают лишь 20 % водосбора реки, то для них доля забора речных вод составит 1,5 %. Таким образом, объем забора воды низкий, хотя по этому показателю Красноярский край находится на пятом месте в России.

Индикатор 2.2. Техническое состояние системы водоснабжения определяет качество доставляемой потребителям воды, потери воды при транспортировке, работу очистных сооружений, частоту аварий. Состояние этой системы в крае неудовлетворительное, так как степень износа водозаборных сооружений, насосных водопроводных станций, магистральных водоводов, канализационных коллекторов и очистных сооружений достигает 80 %.

Индикатор 2.3. Потери воды при транспортировке с начала 2000-х гг. увеличились и составили в 2015 г. около 4 %, что связано со значительным износом систем водоснабжения. В России такой показатель в среднем достигает 8 %.

Индикатор 2.4. Направления использования свежей воды с 1993 по 2015 г. показаны на рис. 1. В 2015 г. использование свежей воды распределялось следующим образом, млн м³: на производственные нужды — 1680 (79,4 %), на хозяйственно-питьевые — 167,5, на поддержание пластового давления — 69,6 (3,3 %), на сельскохозяйственные — 6,8 (0,2 %), другие — 193 (9,2 %). Важно отметить, что доля производственных и сельскохозяйственных нужд уменьшается.

Таблица 1

Динамика основных показателей водопользования в Красноярском крае, млн м³

| Показатель | Годы | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1993 | 1995 | 1997 | 1999 | 2001 | 2003 | 2005 | 2007 | 2009 | 2012 | 2015 |
| Забрано свежей воды | 3992 | 2898 | 2974 | 3027 | 2554 | 2704 | 2731 | 2908 | 2722 | 2548 | 2290 |
| Использовано свежей воды | 3219 | 2713 | 2715 | 2696 | 2323 | 2518 | 2508 | 2630 | 2455 | 2349 | 2114 |
| Сброшено сточных вод в поверхностные воды | 2806 | 2332 | 2353 | 2540 | 2211 | 2430 | 2424 | 2531 | 2355 | 2179 | 1832 |

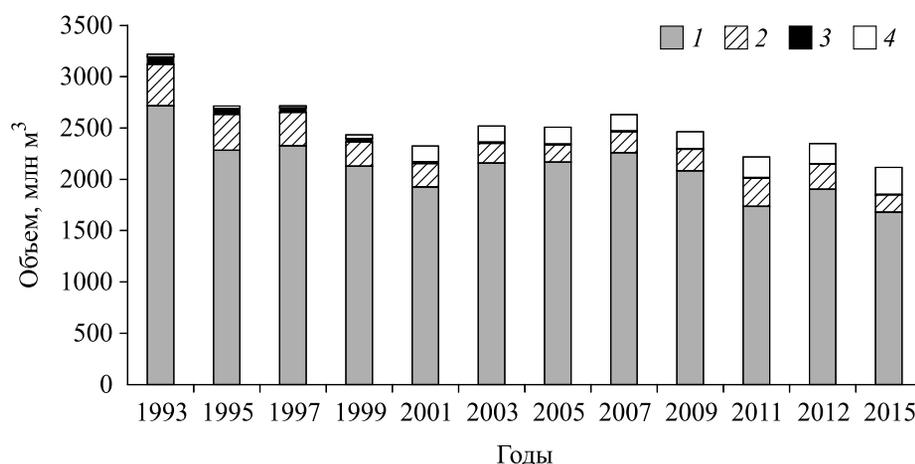


Рис. 1. Динамика использования свежей воды по направлениям деятельности в Красноярском крае.

Направление деятельности: 1 — производственное, 2 — хозяйственно-питьевое, 3 — сельскохозяйственное, 4 — другое.

Индикатор 2.5. Доля повторно-последовательного и оборотного использования воды в 2000-е гг. росла и в 2012 г. достигла 60 %, что меньше российского показателя, который составляет около 80 %. Использование воды в этих системах в крае позволяет ежегодно экономить 58 % забора свежей воды.

Индикатор 2.6. Объем водозабора на единицу валовой региональной продукции в начале XXI в. уменьшался. В 2015 г., по нашим оценкам, он составил 2,3 м³/тыс. руб. (по России в целом — 1,6 м³/тыс. руб.). По паритету покупательной способности валют российский показатель водопользования на единицу валового внутреннего продукта примерно вдвое превосходит немецкий и японский.

Индикатор 2.7. Доля населения, потребляющего питьевую воду нормативного качества, — один из главных показателей социальной государственной политики. Неудовлетворительное санитарно-техническое состояние систем водоснабжения в городских и сельских поселениях определяется недостатком организованных зон санитарной охраны водоисточников, ненадлежащим лабораторным контролем за качеством питьевой воды, природным превышением концентраций вредных веществ в источниках. Несмотря на высокую степень обеспечения населения края централизованными системами водоснабжения, состояние их остается неудовлетворительным: на каждом пятом водозаборе нет зоны санитарной охраны; на каждом седьмом — обеззараживающей установки; на каждом десятом — сооружений водоподготовки [12]. Вода из поверхностных или подземных источников поступает на станцию водоподготовки, где доводится до нормативов, и далее по магистральным водоводам и ответвлениям от них поступает к потребителю. Качество воды не должно претерпевать изменений, однако, согласно официальным документам [17], около 23 % проб, взятых в местах потребления воды, не соответствует гигиеническим нормативам.

Употребление недоброкачественной питьевой воды для 11,8 % жителей края связано с риском заболевания органов пищеварения, для 11,9 % — мочевыводящих путей. Около 8,8 % населения края подвергаются риску заражения кишечными инфекциями, употребляя питьевую воду, не отвечающую гигиеническим нормативам по бактериологическим показателям [12]. Таким образом, почти 30 % населения края обеспечивается водой, не отвечающей гигиеническим нормативам.

С 2007 г. в регионе наблюдается тенденция к улучшению санитарного состояния объектов питьевого водоснабжения за счет уменьшения доли водозаборов, не оборудованных системами обеззараживания (с 8,4 до 2,8 %) и комплексом водоподготовки (с 8 до 6,9 %).

Индикатор 2.8. Бытовое потребление воды на душу населения в среднем по краю составляет около 200 л/сут на человека. Для России в целом он достигает 370 л/сут, а для большинства стран Европы — 100–150 л/сут.

Критерий 3. Характеристики сточных и качество поверхностных вод. *Индикатор 3.1.* Объемы сброса сточных вод: нормативно чистых, нормативно очищенных, загрязненных (без очистки и недостаточно очищенных) — показаны на рис. 2. Отметим, что 95,7 % сточных вод сбрасывается в поверхностные воды. С 1993 по 2015 г. общий сброс сточных вод уменьшился на 974 млн м³, так как снизился забор свежих вод в связи с изменением экономических условий. При этом в 2015 г. доля нормативно чистых вод в объеме общего сброса составила 79,8 %; доля загрязненных (недостаточно очищенных) —

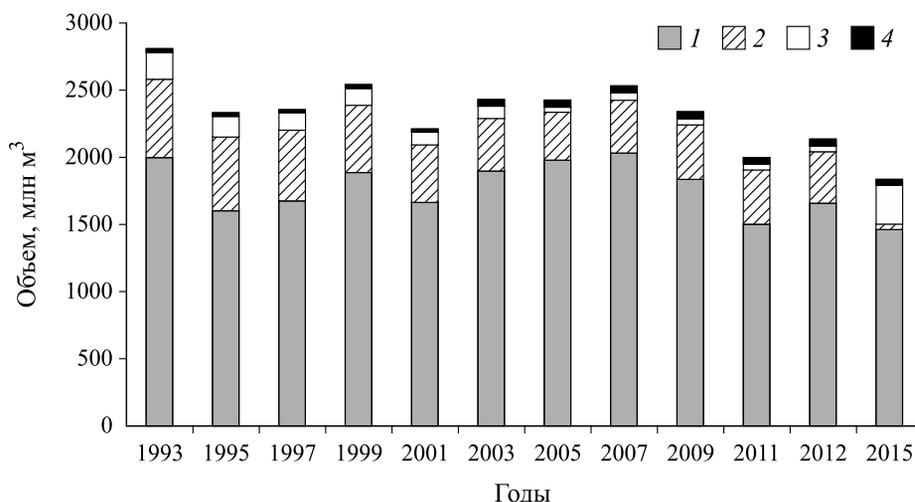


Рис. 2. Динамика сброса сточных вод в поверхностные водные объекты в Красноярском крае.

Сточные воды: 1 — нормативно чистые, 2 — загрязненные (недостаточно очищенные), 3 — загрязненные (без очистки), 4 — нормативно очищенные.

17,8 %; нормативно очищенных и загрязненных (без очистки) вод — по 2,4 %. Основные объемы сброса сточных вод приходятся на нормативно чистые воды, сбрасываемые предприятиями, которые осуществляют производство, передачу и распределение электроэнергии, газа, пара и горячей воды.

В анализируемый период (1993–2015 гг.) структура сброса сточных вод в поверхностные водные объекты по видам хозяйственной деятельности выглядела следующим образом: жилищно-коммунальное хозяйство — 69,8 %, промышленность — 29,6, транспорт и сельское хозяйство — 0,6; по отраслям промышленности: электроэнергетика — 34,5, химическая и нефтехимическая — 10,1, цветная металлургия — 7,6, лесопереработка — 27, угольная — 17,1, прочие — 3,7 %.

На долю промышленности приходится 83 % объемов загрязненных вод, сбрасываемых без очистки, на долю предприятий жилищно-коммунального хозяйства — 11,3 %.

Индикатор 3.2. Содержание загрязняющих веществ в сточных водах, сбрасываемых в водные объекты с 1993 по 2015 г., представлено в табл. 2. Общая масса загрязняющих веществ в сточных водах,

Таблица 2

Динамика сброса основных загрязняющих веществ в водные объекты, т/год

| Загрязняющие вещества | Годы | | | | | | | | |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1993 | 1995 | 1997 | 1999 | 2001 | 2003 | 2004 | 2010 | 2015 |
| БПК _{полн} | 34 200 | 21 940 | 19 788 | 16 280 | 11 970 | 10 450 | 9210 | 4901 | — |
| Взвешенные вещества | 29 460 | 19 840 | 15 122 | 11 810 | 13 690 | 3030 | 6340 | — | 4433 |
| Нефтепродукты | 460 | 240 | 189 | 100 | 80 | 50 | 50 | 29 | 17 |
| Сульфаты | 115 250 | 78 920 | 117 487 | 43 950 | 37 070 | 24 740 | 45 030 | — | — |
| Хлориды | 53 810 | 38 190 | 39 472 | 17 210 | 16 510 | 14 990 | 67 780 | — | — |
| Азот аммонийный | 4157 | 2379 | 2306 | 1652 | 1676 | 1905 | 1289 | — | — |
| Фенолы | 3 | 3 | 2 | 2 | 5 | 1 | 1 | 0,4 | 0,4 |
| СПАВ | 771 | 254 | 176 | 137 | 102 | 73 | 78 | 25 | 37 |
| Железо | 313 | 220 | 213 | 195 | 168 | 98 | 85 | 59 | 43 |
| Медь | 43 | 11 | 5 | 2 | 5 | 3 | 2 | 6 | 1 |
| Цинк | 27 | 18 | 11 | 11 | 5 | 5 | 8 | 7 | 5 |
| Формальдегид | 81 | 53 | 12 | 17 | 7 | 5 | 3 | — | — |
| Всего | 596 600 | 373 700 | 468 100 | 295 202 | 283 560 | 231 315 | 272 266 | 267 400 | 214 450 |

Примечание. БПК_{полн} — показатель загрязнения воды органическими соединениями, определяемый количеством кислорода, израсходованным на полное окисление легкоокисляющейся органики. СПАВ — синтетические поверхностно-активные вещества. Прочерк — нет данных.

поступающих в водные объекты, в 2015 г. составляла 214 450 т. Важно отметить, что в течение этого периода объемы сброса загрязняющих веществ снижались по всем основным ингредиентам.

Индикатор 3.3. Загрязнение водных ресурсов радионуклидами носит техногенный характер и обусловлено локальными сбросами вод, ранее охлаждающих ядерные реакторы горно-химического комбината (40 км от Красноярска, ниже по течению Енисея). При этом выделяются три зоны загрязнения: ближняя (от с. Атаманово до устья Кана), средняя (от устья Кана до с. Ярцево) и дальняя (от с. Ярцево до устья Енисея). Уровни загрязнения речных отложений цезием-137 снижаются вниз по течению и составляют, $\text{кБк}/\text{м}^2$: в ближней зоне — от 1500 до 260, в средней — от 370 до 110, в дальней — от 3,7 и менее [12].

Индикатор 3.4. Биологическое потребление кислорода (БПК₅) — один из важнейших критериев уровня загрязнения водоема органическими веществами. Показатели БПК₅ природных вод обычно варьируют от 0,5 до 4 мг $\text{O}_2/\text{л}$. Предельно допустимая концентрация (ПДК) органических веществ в воде по БПК₅ для водных объектов равна 2 мг $\text{O}_2/\text{л}$. В Енисее максимальные значения БПК₅ (1,7–2,6 мг $\text{O}_2/\text{л}$) отмечены на участке выше устья Ангары и соответствуют 3–4-му классам качества воды — от «удовлетворительно чистой» до «загрязненной». Ниже устья Ангары значения БПК₅ составляют 0,8–1,2 мг $\text{O}_2/\text{л}$ (2-й класс качества воды — «чистая») [18, 19]. В притоках верхнего Енисея БПК₅ достигает 8,2 мг $\text{O}_2/\text{л}$; в притоках среднего и нижнего Енисея не превышает 4,8 мг $\text{O}_2/\text{л}$.

Индикатор 3.5. Степень загрязненности поверхностных вод в России с 2005 г. определяется на основе удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ), рассчитываемого по 14–15 загрязняющим веществам. Классификация качества воды по этому показателю подразделяет поверхностные воды на пять классов.

Величина УКИЗВ по течению Енисея изменяется в пределах 2,1–4,4 (рис. 3). На участке реки от плотины Красноярской ГЭС до Игарки вода оценивается как «загрязненная» (3-й класс) и «грязная» (4-й класс). Наблюдается увеличение УКИЗВ ниже Дивногорска, Красноярска, Лесосибирска и после впадения Ангары. Основными токсикантами в реке служат металлы и нефтепродукты.

В 2015 г. содержание тяжелых металлов в воде было следующим, $\text{мг}/\text{л}$: медь — 0–0,004, цинк — 0,002–0,015, марганец — 0,005–0,026, алюминий — 0,005–0,086, железо общее — 0,078–0,334, никель — 0,000–0,001. Максимальная концентрация цинка (15 ПДК) зафиксирована в районе с. Селиваниха; марганца (19 ПДК) и меди (29 ПДК) — в 4 км выше Лесосибирска.

Среднегодовые концентрации нефтепродуктов на участке реки от Дивногорска до пос. Подтесово составили 0,01–0,03 $\text{мг}/\text{л}$. Ниже по течению загрязнение нефтепродуктами увеличивалось, и на участке реки от с. Селиваниха до Игарки среднегодовые концентрации достигали 0,47–0,68 $\text{мг}/\text{л}$. Максимальное превышение (25 ПДК) зафиксировано в створе, расположенном на 1 км ниже Игарки. Основные источники поступления нефтепродуктов в реку — сбросы с речных судов, большое количество нефтехранилищ в прибрежной зоне, сточные воды промышленных предприятий.

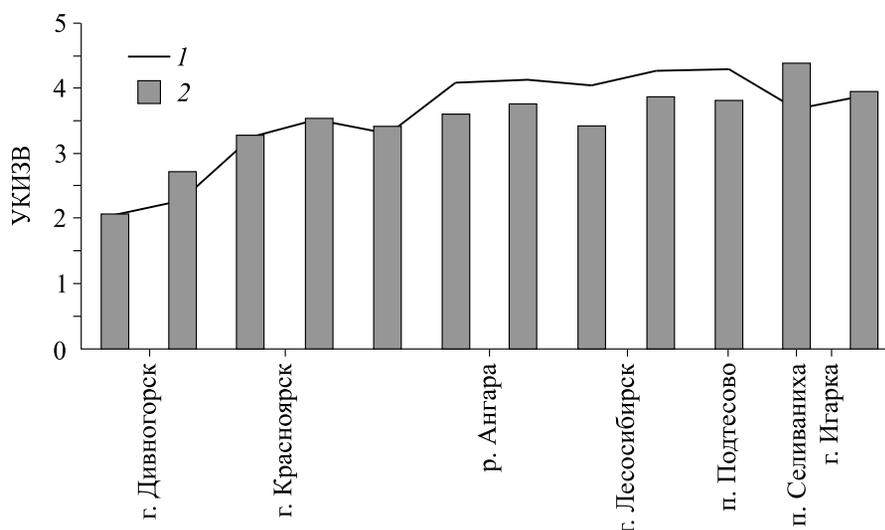


Рис. 3. Величина УКИЗВ в Енисее на участке от плотины Красноярской ГЭС до Игарки в 2010 г. (1) и 2011 г. (2).

Критерий 4. Биологические ресурсы. Сохранение биоразнообразия необходимо для человеческого существования и устойчивого развития, поэтому важно разработать показатели, оценивающие техногенное воздействие на экосистемы и контролируемые их состояние и качество. При этом возникает потребность в разнообразном информационном обеспечении, в том числе в длительных мониторинговых наблюдениях за биологическими сообществами. Устойчивость биологических систем связывают с их способностью противостоять внешнему воздействию и возвращаться в исходное состояние [20]. При анализе эффективности водопользования необходимо контролировать состояние сообществ гидробионтов — важнейших компонентов системы самоочищения водоемов и надежных индикаторов антропогенного воздействия.

Индикатор 4.1. Бактериопланктон. Основные количественные характеристики планктонных сообществ Енисея за 2007–2008 гг. представлены в табл. 3. На их пространственное распределение влияют антропогенный пресс и правобережные притоки Енисея. Увеличение общей численности бактерий отмечалось между промышленными центрами Красноярском и Лесосибирском, а также между двумя правобережными притоками — Подкаменной Тунгуской и Нижней Тунгуской. Закономерности формирования бактериопланктона после зарегулирования русла Енисея плотиной Красноярской ГЭС существенно не изменились [18].

Индикатор 4.2. Фитопланктон. Современный фитопланктон Енисея представлен в основном диатомовыми водорослями, к которым в летний период присоединяются синезеленые. Развитие фитопланктона характеризуется невысокими показателями (средняя биомасса <1 мг/л, среднее содержание хлорофилла <3 мкг/л), типичными для мезотрофных или даже олиготрофных вод [19]. Соотношение минеральных форм азота и фосфора в воде изменяется от 37 до 120 и свидетельствует о том, что фосфор — один из лимитирующих факторов развития фитопланктона Енисея [21].

Известно, что зарегулирование изменяет не только гидроморфологию, но и экосистему реки в целом. Наполнение Красноярского водохранилища привело к активной перестройке альгоценоза нижнего бьефа. Произошла смена доминирующих форм планктона, обогащение его видового состава и увеличение общей численности водорослей. Резко возросло количество фитобентоса и фитоперифитона, что препятствует работе водозаборов. В настоящее время фитопланктон в нижнем бьефе Красноярской ГЭС практически полностью поступает из Красноярского водохранилища и из притоков Енисея [22]. В сообществах микроводорослей нижнего Енисея также произошли коренные изменения, свидетельствующие о снижении качества воды [23].

Индикатор 4.3. Зоопланктон как биоценотический комплекс формируется только в нижнем Енисее — в дельте и губе. Для существования зоопланктонных организмов скорость течения не должна превышать 1 м/с, а развитие их происходит при скорости максимум 0,8 м/с. Из-за краткости летнего периода и низких температур в период открытой воды зоопланктон может интенсивно размножаться лишь в течение двух месяцев.

После зарегулирования Енисея плотиной Красноярской ГЭС в нижнем бьефе возрастает численность зоопланктона, особенно в приплотинной зоне за счет выноса его из Красноярского водохранилища. В неповрежденном состоянии через плотину проходит около 80 % организмов. Однако лимнический зоопланктон, попавший в речной поток с высокой турбулентностью, вскоре гибнет, и уже через 30 км его биомасса достигает 10 % от исходной в водохранилище [24]. Роль зоопланктона в экосистеме увеличивается в нижнем Енисее.

Таблица 3

Структурно-функциональные характеристики бактерио- и фитопланктона на участке от плотины Красноярской ГЭС до устья Енисея, 2007–2008 гг.

| Показатель | Среднее значение |
|--|------------------|
| Общая численность бактерий, млн кл./мл | 1,99 ± 0,23 |
| Количество гетеротрофов, кл./мл | 294 ± 48 |
| Численность фитопланктона, млн кл./л | 1,27 ± 0,16 |
| Биомасса фитопланктона, мг/л | 0,25 ± 0,04 |
| Валовая первичная продукция, мг O ₂ /(л·сут) | 0,39 ± 0,05 |
| Индекс самоочищения A/R | 2,25 ± 0,46 |
| Индекс Шеннона (ценотическое разнообразие фитопланктона) | 3,25 ± 0,09 |
| Индекс сапробности фитопланктона | 2,12 ± 0,05 |

Примечание. A/R — отношение первичной продукции фитопланктона A к деструкции органического вещества R.

Индикатор 4.4. Зообентос на всем протяжении Енисея занимает главенствующее положение в рационе многих ценных пород рыб (сиговых, лососевых, осетровых, хариусовых и др.). Для участка верхнего Енисея от плотины Красноярской ГЭС до устья Ангары характерны каменисто-галечные грунты, омываемые значительным течением. Донные сообщества здесь представлены в основном хирономидами, олигохетами и гаммарусами. Средняя численность донной фауны — 3,3 тыс. экз./м², биомасса — 10,7 г/м². В среднем Енисее после впадения Ангары увеличиваются площади, занятые песчаными отложениями, и состав зообентоса существенно изменяется по сравнению с верхним участком. По-прежнему преобладают хирономиды, но гаммарусы и олигохеты сменяются двусторчатными моллюсками, поденками и ручейниками. При этом численность и биомасса зообентоса снижаются (1,2 тыс. экз./м² и 2,9 г/м² соответственно).

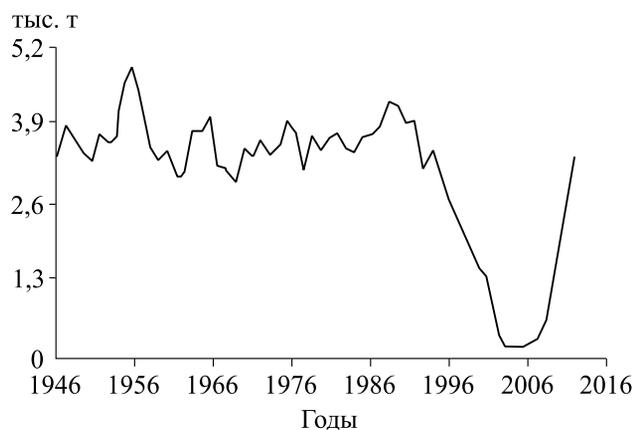
Зарегулирование стока Енисея плотиной Красноярской ГЭС коренным образом изменило донную фауну. Количественные характеристики зообентоса существенно возросли [25–27], особенно на участке от плотины Красноярской ГЭС до устья Ангары: численность увеличилась более чем вдвое, биомасса — в пять раз. Рост показателей обусловлен распространением гаммарусов из Байкала через Ангару вверх по течению Енисея, а также массовым развитием хирономид и олигохет. Доля гаммарусов в биомассе зообентоса возросла в 10 раз, хирономид — в 9, олигохет — в 40 раз.

Увеличение антропогенной нагрузки на экосистему Енисея сопровождается обогащением водной толщи биогенными элементами и органическими веществами, как следствие — развитием фитопланктона и фитобентоса и повышением трофности водотока [21]. Привнесенная сточными водами органика служит субстратом для развития целого ряда бентосных организмов, таких как олигохеты, некоторые хирономиды, гаммариды, которые в настоящее время доминируют в составе донных биоценозов Енисея. В свою очередь, гаммарусы способствовали вытеснению ручейников и поденок, снижению общего биоразнообразия зообентоса и, следовательно, уменьшению устойчивости экосистемы.

Индикатор 4.5. Оценка качества воды по гидробиологическим показателям (биоиндикация) основана на том, что сообщества гидробионтов являются чувствительными индикаторами степени антропогенного влияния на экосистему водоема и реагируют путем изменения таксономического состава и структурно-функциональных характеристик. Известно, что отклонение структурно-функциональных характеристик сообществ от некоего среднего уровня, исторически сложившегося в определенных условиях, отражает устойчивость экосистемы [20]. В табл. 3 представлены показатели, которые традиционно используются в системе биоиндикации для оценки качества воды по состоянию бактерио- и фитопланктонных сообществ. Набор аналогичных характеристик донных сообществ также применяется в целях биоиндикации.

По микробиологическим показателям и структурно-функциональным характеристикам фитопланктона качество воды в Енисее соответствует 3-му классу («умеренно загрязненная»). Его ухудшение наблюдалось на участке от Красноярска до устья Ангары, а также от устья Нижней Тунгуски до Игарки. По структурно-функциональным показателям зообентоса вода в верхнем Енисее характеризуется как «загрязненная» (4-й класс); в среднем Енисее — «умеренно загрязненная» (3-й класс).

Индикатор 4.6. Промысловые ресурсы Енисея определяются ихтиофауной, включающей 22 вида рыб. До зарегулирования Енисея ихтиоценоз на участке реки от Красноярска до устья Ангары характеризовался как ельцово-стерляжий; в настоящее время — как хариусово-ельцовый. Сиг — второй по численности и биомассе вид среди лососевидных рыб после хариуса. Выход хариуса на одно из первых



мест в уловах связан с зарегулированием реки и увеличением продукции зообентоса. Кроме того, структурная перестройка ихтиоценоза во многом связана со скатом рыб из Красноярского водохранилища. Так, большая часть окуня и плотвы в приплотинной зоне Енисея имеет «водохранилищное» происхождение. В то же время зарегулирование стока, повлекшее изменение гидрологического режима, оказало негативное воздействие на популяции осетровых, лососевых, сиговых и

Рис. 4. Динамика суммарного вылова рыб всех видов в Енисее.

других ценных видов рыб, существенно нарушив их ареалы. Численность осетра и стерляди в Енисее значительно сократилась, и они теперь встречаются в основном ниже устья Ангары [25]. Валек и нельма практически исчезли из состава ихтиофауны Енисея.

На рис. 4 представлена динамика вылова рыбы всех видов с 1946 по 2011 г. в Енисее. Рыбные ресурсы имеют большую социально-экономическую значимость для местного населения, особенно в северной части Красноярского края. Резкое уменьшение вылова рыбы в начале 1990-х гг. обусловлено социально-экономической перестройкой в стране. Фактический улов рыбы в настоящее время составляет около 50 % от относительно допустимого улова. Наибольшим рыбопромысловым значением обладает среднее и нижнее течение Енисея и Енисейский залив. Верхний участок до устья Ангары отличается невысокой рыбопродуктивностью и почти не используется для промышленного лова [28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно Водной стратегии Российской Федерации на период 2020 г. [5], наша страна должна переходить на путь устойчивого водопользования. В данной работе на основе предложенной системы показателей устойчивого водопользования рассмотрено водохозяйственное состояние Енисея с 1993 по 2015 г. и выявлены следующие тенденции.

За исследованный период уменьшился ежегодный забор свежей воды на 43 % и сброс загрязняющих веществ в водные объекты на 64 %, при этом возросла доля повторно-последовательного и оборотного использования воды. Тем не менее Красноярский край лидирует в Сибирском федеральном округе по объему сточных вод. На участке Енисея от плотины Красноярской ГЭС до Игарки, согласно показателю УКИЗВ, вода оценивается как «загрязненная» (3-й класс) и «грязная» (4-й класс). Химические и биологические оценки качества воды в Енисее показали сходные результаты.

В крае сохраняется большая степень износа систем водоснабжения, с чем связаны существенные потери воды при транспортировке и низкое качество доставляемой воды. В результате значительная доля населения потребляет питьевую воду, не отвечающую гигиеническим нормативам.

Величина водопользования на единицу валового регионального продукта остается высокой из-за слабой эффективности водопользования в энергетике и добычи природных ресурсов. Однако этот показатель начиная с 2000-х гг. постепенно снижается.

Условное зарегулирование Енисея коренным образом изменило биологические ресурсы речной экосистемы. Структурная перестройка биологических сообществ обернулась снижением устойчивости водной экосистемы. Обогащение водной толщи привнесенными биогенными элементами и органическими веществами стимулировало развитие фитопланктона, фито- и зообентоса. Из списка рыб исчезли валек и нельма, а численность осетра, стерляди, тайменя, ленка, сига и некоторых других ценных видов рыб резко сократилась.

Для перехода к устойчивому водопользованию необходимы грамотные управленческие решения. Это может быть достигнуто посредством институциональных ресурсов, включая административно-правовые, экономические и организационные механизмы и методы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (16–47–240517) и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rodda G.** On the problems of assessing the World water resources // *Geosciences and Water Resource Environment Data Model.* — Berlin: Heidelberg, 1997. — P. 14–32.
2. **Hering J.G., Ingold K.M.** Water resources management: what should be integrated? // *Science.* — 2012. — Vol. 336, issue 6086. — P. 1234–1235.
3. **Данилов-Данильян В.Н.** Водно-стратегический фактор развития экономики России // *Вестн. РАН.* — 2007. — № 2. — С. 108–114.
4. **Безруков Л.А., Гагаринова О.В., Кичигина Н.В., Корытный Л.М., Фомина Р.А.** Водные ресурсы Сибири: состояние, проблемы и возможности использования // *География и природ. ресурсы.* — 2014. — № 4. — С. 30–41.
5. **Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года.** Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 августа 2009 г. № 1235-р [Электронный ресурс]. — docs.cntd.ru/document/902173350 (дата обращения 05.09.2016).
6. **Indicators of Sustainable Development: Framework and Methodology.** — New York: United Nations, 1996. — 359 p.

7. **Винокуров Ю.И., Жерелина И.В., Красноярова Б.А.** Подходы к формированию стратегии устойчивого водопользования в бассейне р. Оби // Ползунов. вестн. — 2004. — № 2. — С. 4–13.
8. **Волжский бассейн.** Устойчивое развитие: опыт, проблемы, перспективы / Под ред. Г.С. Розенберга. — М.: Изд-во Ин-та устойчивого развития Общественной палаты Российской Федерации, 2011. — 104 с.
9. **Говорушко С.М., Горбатенко Л.В.** Трансграничное водопользование в бассейне р. Амур // Вестн. ДВО РАН. — 2013. — № 2. — С. 74–83.
10. **Молотов В.С.** Концептуальные основы стратегии устойчивого водопользования в условиях российско-монгольского трансграничья // Вестн. Бурят. ун-та. — 2012. — Вып. 4. — С. 57–63.
11. **Шапарев Н.Я.** Природные ресурсы Красноярского края // Вестн. РАН. — 2007. — Т. 77, № 4. — С. 291–300.
12. **Шапарев Н.Я.** Ресурсы Красноярского края в показателях устойчивого развития. — Красноярск: Изд-во Краснояр. пед. ун-та, 2009. — 352 с.
13. **Shaparev N., Astafiev N.** Water resources of the Krasnoyarsk Krai in Sustainable development indices // International Journ. of Sustainable Development and World Ecology. — 2008. — Vol. 15, N 6. — P. 574–583.
14. **Shaparev N.** Regional sustainable nature management // Herald of the Russian Academy of Sciences. — 2009. — Vol. 79, N 6. — P. 574–579.
15. **Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае за 2015 год».** — Красноярск: Министерство природных ресурсов и лесного комплекса Красноярского края, 2016. — 320 с.
16. **Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2009 году».** — М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2010. — 288 с.
17. **Доклад о санитарно-эпидемиологической обстановке в Красноярском крае в 2008 г.** — Красноярск, 2009. — 201 с.
18. **Апонасенко А.Д., Дрюккер В.В., Сороковикова Л.М., Щур Л.А.** О воздействии притоков на экологическое состояние реки Енисей // Водн. ресурсы. — 2010. — Т. 37, № 6. — С. 692–699.
19. **Минеева Н.М., Щур Л.А., Бондаренко Н.А.** Функционирование фитопланктона крупных пресноводных систем при разной обеспеченности ресурсами // Гидробиол. журн. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 21–33.
20. **Алимов А.Ф.** Элементы теории функционирования водных экосистем. — СПб.: Наука, 2001. — 147 с.
21. **Сороковикова Л.М., Башенхаева Н.В.** Евтрофирование и качество воды Енисея // Водн. ресурсы. — 2000. — Т. 27, № 4. — С. 498–503.
22. **Дрюккер В.В., Кузьмина А.Е., Шевелёва Н.Г., Петрова В.И., Емельянова Л.М.** Изменение структуры биоценозов р. Енисей под влиянием зарегулирования стока // Охрана речных вод Сибири. — Новосибирск: Наука, 1982. — С. 167–176.
23. **Бессудова А.Ю., Сороковикова Л.М., Фирсова А.Д., Томберг И.В.** Современное состояние вод нижнего участка реки Енисей // География и природ. ресурсы. — 2014. — № 3. — С. 93–99.
24. **Гладышев М.И., Дубовская О.П., Махутова О.Н.** Живой и мертвый лимнический зоопланктон в верхнем и нижнем бьефах плотины Красноярской ГЭС // Докл. АН. — 2003. — Т. 390, № 4. — С. 571–573.
25. **Заделенов В.А.** Современное состояние популяций осетровых рыб (Acipenseridae) и их кормовой базы в бассейне Енисея // Сиб. экол. журн. — 2000. — Т. 7, вып. 3. — С. 287–291.
26. **Гладышев М.И., Москвичёва (Андрианова) А.В.** Байкальские вселенцы заняли доминирующее положение в бентофауне Верхнего Енисея // Докл. АН. — 2002. — Т. 383, № 4. — С. 568–570.
27. **Андрианова А.В.** Динамика развития енисейского зообентоса в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Вестн. Том. ун-та. Биология. — 2013. — Т. 1, № 21. — С. 74–88.
28. **Корытный Л.М., Безруков Л.А.** Водные ресурсы Ангаро-Енисейского региона (геосистемный анализ). — Новосибирск: Наука, 1990. — 214 с.

Поступила в редакцию 6 октября 2016 г.