

## ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 504.4.06(1/9)

АНТРОПОГЕННАЯ НАГРУЗКА И КАЧЕСТВО ВОДЫ НА ЗАМЫКАЮЩИХ  
СТВОРАХ РЕК АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИО.С. Решетняк<sup>1</sup>, Л.С. Косменко<sup>2</sup>, А.А. Коваленко<sup>3</sup><sup>1-3</sup> Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону, лаборатория дистанционных и химико-биологических методов наблюдений за состоянием и загрязнением водных объектов<sup>1</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Институт наук о Земле, доцент кафедры геоэкологии и прикладной геохимии, доцент, канд. геогр. наук; e-mail: olgare1@mail.ru<sup>1</sup> Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: o.reshetnyak@gidrohim.com<sup>2</sup> Вед. науч. сотр., канд. хим. наук; e-mail: l.kosmenko@gidrohim.com<sup>3</sup> Лаборант-исследователь; e-mail: arinaa.kov@gmail.com

Продолжающееся антропогенное воздействие на речные экосистемы Российской Арктики приводит к трансформации их экологического состояния, что делает необходимой оценку антропогенной нагрузки и сопоставление ее со степенью загрязненности воды устьевых областей арктических рек. В научной практике для оценки антропогенной нагрузки на водные объекты используются различные подходы. Основным является методология экологического нормирования и определения критических уровней нагрузки на водные экосистемы. В данном исследовании оценка уровня антропогенной нагрузки на устьевые участки рек выполнена с использованием модулей стока химических веществ – интегральных показателей качества водной среды – легкоокисляемых органических веществ, азота аммонийного и нефтепродуктов.

В данной работе представлены результаты оценки уровня антропогенной нагрузки на устьевые участки рек и данные о качестве вод арктических рек России за периоды 1980–1999 и 2000–2018 гг. Объекты исследования – река Печора и ее притоки (реки Уса, Колва, Адзья и Сула), реки Обь, Пур, Таз, Енисей, Анабар, Лена, Яна, Индигирка и Колыма.

В ходе сравнительного анализа уровня антропогенной нагрузки по модулям стока азота аммонийного, органических веществ и нефтепродуктов были выявлены значительные отличия. Так, для рек бассейна Печоры и Западной Сибири характерен более высокий уровень антропогенной нагрузки, в то время как реки Восточной Сибири испытывают наименьшую суммарную антропогенную нагрузку. В динамике для большинства изученных крупных рек арктической зоны России антропогенная нагрузка снижается по большинству оцениваемых показателей. При этом качество воды рек арктической зоны Европейской России и Восточной Сибири изменяется в пределах 3-го и 4-го классов качества, а Западной Сибири – 4-го и 5-го классов. В целом для исследуемых рек выявлены разнонаправленные тенденции изменения качества воды. На основе корреляционного анализа статистически подтверждена тенденция улучшения качества воды для изученных притоков реки Печоры и устьевых участков рек Енисей, Анабар, Индигирка и Колыма.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки экологически обоснованных водоохраных мероприятий с целью повышения экологической безопасности в уязвимых устьевых областях арктических рек.

**Ключевые слова:** арктические реки, уровень антропогенной нагрузки, качество воды, модуль стока, азот аммонийный, нефтепродукты, органические вещества

## ВВЕДЕНИЕ

Освоение арктического пространства России и рациональное использование природных богатств в соответствии со «Стратегией развития арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» требует наличия объективной информации о состоянии и качестве водных ресурсов Арктики, необходимой для принятия своевременных экологически обоснованных природоохраных решений, гарантирующих устойчивое развитие региона.

В арктической зоне РФ освоение месторождений сопровождается бурением большого количества скважин, строительством дорог разного назначения, инженерно-технических сооружений, населенных пунктов и др. [Черногаева и др., 2019]. Антропогенное воздействие на многолетнемерзлые породы приводит к резкой активизации процессов пучения, термокарста, солифлюкции, термоэрозии и термоабразии.

По данным исследования Г.М. Черногаевой и др. (2019), в зоне многолетней мерзлоты опасными

эколого-морфологическими явлениями поражено в разных секторах от менее 30% территории (Кольский полуостров) до более 50% (арктическая зона Западной и Восточной Сибири). При этом высока вероятность их активизации при потеплении, а значительная деградация мерзлых пород, их просадка на больших территориях могут привести к возникновению экологических рисков.

Как известно, источниками загрязнения арктической зоны в целом и водных экосистем в частности являются предприятия топливно-энергетического комплекса, крупнейшие предприятия металлургии, добычи и переработки полезных ископаемых, химической отрасли, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности и транспорт. Поэтому для оценки уровня суммарной антропогенной нагрузки в различных секторах Арктики использованы такие показатели, как объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, сбросы сточных вод в водные объекты и объемы образования отходов. По данным Национального атласа Арктики, суммарная антропогенная нагрузка меняется от низкой (Ненецкий и Чукотский АО) до высокой (Мурманская область и Республика Саха (Якутия)) с тенденцией снижения нагрузки по вышеперечисленным показателям в большинстве регионов арктической зоны [Национальный атлас Арктики, 2017].

При оценке суммарной антропогенной нагрузки на водосборы арктической зоны немаловажным является учет источников антропогенных элементов (их поступление в экосистемы с атмосферными выпадениями), поскольку на территории Арктики происходит разгрузка воздушных потоков от многих загрязнителей, накопленных в среднеширотных районах [Сапрыкина, 2015].

В результате возрастания антропогенного воздействия и вызванных им последствий происходит постепенная трансформация гидролого-экологического состояния устьевых областей арктических рек, в первую очередь за счет заметных изменений объемов и компонентного состава поступающих с речным стоком растворенных химических веществ, в том числе и загрязняющих. Речной сток является одним из важнейших факторов формирования гидрохимического режима и качества воды устьевых областей рек, эстуариев и прибрежных частей морских акваторий [Устьевые экосистемы..., 2015; Третьяков и др., 2020].

Исследования последних лет показали, что в условиях длительного и продолжающегося антропогенного воздействия на речные экосистемы Российской Арктики отмечается антропогенная трансформация их экологического состояния. Это происходит, в первую очередь, за счет повышения степени загрязненности водной среды и усиле-

ния внутрисистемных процессов экологического регресса, при котором возрастает потенциальная возможность угнетения развития отдельных сообществ водных организмов, а возможно, и их гибель. Возрастает потенциальный экологический риск деградации экосистем [Никаноров и др., 2012; Черногаева и др., 2019]. Отмечается усиление антропогенно-индуцированных процессов в водных объектах арктического региона [Моисеенко, 2018], таких как токсическое загрязнение вод, эвтрофирование, закисление, что приводит к нарушению хрупкого экологического равновесия в арктических экосистемах.

В нашей стране для оценки антропогенной нагрузки на водные объекты используются различные принципы и подходы. Одним из концептуальных решений проблемы управления антропогенным воздействием является методология экологического нормирования, которая основывается на зависимости антропогенной нагрузки на водные объекты и отклике экосистемы на данное воздействие [Моисеенко, 2010]. Регламентация антропогенной нагрузки биогенными веществами на водные объекты в таежной природно-климатической зоне может быть проведена на основе региональной устойчивости водных экосистем к эвтрофированию, т. е. с учетом общелимпологических особенностей водных объектов [Заличева, Волков, 1994].

В исследованиях Н.В. Стоящевой оценка антропогенной нагрузки на водные объекты в пределах Обь-Иртышского бассейна выполнена с использованием такого показателя, как кратность разбавления сточных вод (в том числе загрязненных) поверхностными водами, с учетом транзитной составляющей и природно-климатических условий в пределах бассейнов рек. Автором подчеркивается, что для большинства физико-географических провинций Западной Сибири кратность разбавления превышает 1000 раз [Стоящева, 2015].

В середине 1990-х гг. сотрудниками МГУ разработана методика оценки антропогенной нагрузки на малые реки, позволяющая определить совокупную нагрузку на бассейн реки. С использованием балльного метода оценивается интенсивность возможного поступления загрязняющих веществ от точечных и рассредоточенных источников [Абрамова, 2011].

Наиболее распространенный подход к оценке антропогенной нагрузки на водный объект связан с расчетом нагрузки сточными водами. При этом возможно определение нагрузки не только по объему сбрасываемых в водоток сточных вод, но и по массе загрязняющих веществ, поступающих со стоками в водный объект [Селезнева, 2003; Королев и др., 2007; Петрова, Власов, 2008; Щерба, Абрамова, 2011]. Применение дополнительно методов много-

мерного статистического анализа позволяет не только оценить уровень нагрузки сточными водами на водные объекты, но и провести кластеризацию территории крупного бассейна с последующим экологическим зонированием территории [Гелашвили и др., 2006].

Целый ряд работ и исследований связан с разработкой методики оценки совокупной антропогенной нагрузки на водосборах с учетом как прямого воздействия на водные объекты, так и косвенной нагрузки на водосборные территории. Основу этого подхода составляет бассейновый принцип, а оценка экологического состояния водного объекта и нагрузки проводится исходя из ситуации на территории бассейна в целом [Entekhabi et al., 1999; Одессер, 1991; Экологический атлас..., 2000; Рыбкина, Стоящева, 2010; Рыбкина и др., 2011].

Таким образом, большинство подходов к оценке антропогенной нагрузки на водотоки в России связаны с анализом условий водопользования (в первую очередь с учетом влияния объемов сброса и водопотребления) и сравнением объемов сброса сточных вод по отношению к величине водности объекта. С экологической точки зрения ученые пытаются оценить способность водного объекта к самоочищению и способность экосистемы «справиться» с поступающей массой загрязняющих веществ.

За рубежом при оценке уровня антропогенной нагрузки достаточно часто оперируют термином «водный стресс», который и характеризует степень воздействия на водный объект. Уровень водного стресса, т. е. забор пресной воды в процентном соотношении к ее имеющимся ресурсам, является одним из важнейших показателей для реализации цели устойчивого развития 6 (ЦУР 6: Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех) [GEMI, 2019].

Во многих зарубежных исследованиях проводится оценка антропогенной нагрузки по стоку биогенных веществ [Hoekstra et al., 2011; Tong et al., 2017]. Применяется концепция «серого водного следа» (GWF – Grey water footprints) для количественной оценки нагрузки по «антропогенному фосфору» (или азоту) на водные ресурсы. Рассчитывается показатель GWF как количество пресной воды, необходимое для ассимиляции («разбавления») биогенной нагрузки с учетом естественного фона и максимально допустимых концентраций [The water footprint..., 2012].

Авторами работы [Mekonnen, Hoekstra, 2018] проведена оценка глобальной антропогенной нагрузки фосфором (P) на пресные воды и связанного с ней показателя GWF за период 2002–2010 гг. в речных бассейнах разных стран. Ранее выполнены аналогичные исследования по оценке глобальной

нагрузки азотом на водные системы (от диффузных и точечных источников) [Mekonnen, Hoekstra, 2015].

Таким образом, оценка антропогенной нагрузки на водные объекты представляет собой достаточно сложную задачу в силу комплексности антропогенного воздействия, глобальных климатических изменений, специфичности региональных природных факторов формирования химического состава воды и различных геоэкологических явлений [Решетняк, 2015].

Цель исследования – оценить уровень антропогенной нагрузки по модулю стока химических веществ и степень загрязненности воды крупных рек арктического региона на их замыкающих створах.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования выбраны участки арктических рек на замыкающих створах (которые можно рассматривать как устьевые участки) – р. Печоры и ее притоков (рр. Адзъва, Колва, Сула, Уса), рек арктической части Западной Сибири – Оби, Пура, Таза, Надыма и Енисея и Восточной Сибири – Анабара, Лены, Яны, Индигирки и Колымы.

Исследование проведено на основе многолетней (1980–2018) гидрологической и гидрохимической информации государственной системы наблюдений Росгидромета. Периодичность гидрохимических наблюдений (и, соответственно, временное разрешение получаемых ежегодных данных) определяется категорией пунктов наблюдений. Для большинства выбранных рек отбор проб осуществлялся в основные фазы водного режима реки, т. е. минимум семь раз в год (частота отбора проб составляла 7–12 раз в год).

Оценка уровня антропогенной нагрузки и качества воды исследуемых участков арктических рек выполнялась для двух временных периодов – 1980–1999 и 2000–2018 гг., что позволило дополнительно провести сравнение и выявить основные тенденции изменчивости антропогенной нагрузки и качества воды.

Методика оценки уровня антропогенной нагрузки заключается в следующем. Антропогенная нагрузка на устьевые области рек обуславливается, в основном, поступлением химических веществ со стоком рек. Оценку антропогенной нагрузки целесообразно проводить по содержанию в воде химических веществ на замыкающем створе [P 52.24.776–2012], отражающем суммарный эффект речного переноса и трансформации компонентного состава воды по длине реки. Высокая внутри- и межгодовая изменчивость концентраций химических веществ определяет уровень антропогенной нагрузки, который можно оценить по изменчивости объемов притока этих соединений.

Замыкающий створ реки, согласно ГОСТ 19179-73, это «нижний створ по реке, ограничивающий рассматриваемый бассейн». Таким образом, определяя нагрузку по стоку химических веществ, поступающих на замыкающий створ реки, мы оцениваем воздействие на устьевой участок реки и косвенно на устьевую область.

Согласно рекомендациям Р 52.24.776–2012, оценка антропогенной нагрузки на устьевые участки рек проводится по модулю стока растворенных химических веществ, в число которых включены такие интегральные показатели, как легкоокисляемые органические вещества (по БПК<sub>5</sub>), азот ам-

монийный и нефтепродукты, резкое изменение содержания которых в воде оказывает негативное воздействие, способное вызвать нарушение структурно-функциональных характеристик сообществ водных организмов и изменение состояния экосистемы в целом [Р 52.24.776–2012]. Критерии оценки представлены в таблице 1. Использование модуля стока химических веществ (отношение среднегодового объема химического стока к площади водосбора) позволяет проводить не только оценку антропогенной нагрузки, но и сравнивать речные системы с различными объемами водного стока и площадями водосбора.

Таблица 1

### Классификатор оценки антропогенной нагрузки на речные экосистемы по модулю стока растворенных химических веществ [Р 52.24.819–2014]

Антропогенная нагрузка	Интервал максимальных значений модуля стока, т/км <sup>2</sup> в год		
	азота аммонийного	органических веществ (по БПК <sub>5</sub> )	нефтепродуктов
Малая	Менее 0,05	Менее 0,50	Менее 0,05
Умеренная	От 0,05 до 0,10 включ.	От 0,50 до 1,00 включ.	От 0,05 до 0,10 включ.
Критическая	От 0,10 до 0,20 включ.	От 1,00 до 1,50 включ.	От 0,10 до 0,30 включ.
Высокая	От 0,20 до 0,30 включ.	От 1,50 до 2,00 включ.	От 0,30 до 0,50 включ.
Очень высокая	Св. 0,30	Св. 2,00	Св. 0,50

Комплексная оценка качества речных вод арктической зоны РФ за многолетний период проведена с использованием интегрального показателя – удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) [РД 52.24.643–2002]. Для расчета значений УКИЗВ используются данные о концентрациях различных веществ: растворенного в воде кислорода, хлоридов, сульфатов, биогенных веществ (азота аммонийного, азота нитритного, азота нитратного и фосфора фосфатного), органических веществ (по показателям ХПК и БПК<sub>5</sub>), фенолов, нефтепродуктов и некоторых тяжелых металлов (соединений железа, меди, никеля, цинка и марганца) и учитывается не только кратность превышения ПДК (для кислорода – снижения относительно норматива), но и частота превышения. Определенным интервалам значений УКИЗВ соответствует определенный класс качества воды (ККВ). При этом степень загрязненности воды может меняться от «условно чистой» (1-й класс качества) до «грязной» (4-й класс) и «экстремально грязной» (5-й класс). При ухудшении качества воды до 4-го класса и выше выделяют также критические показатели загрязненности воды, высокие концентрации которых обуславливают переход качества воды в худшее состояние.

Для выявления количественной оценки основной тенденции временной изменчивости качества воды на устьевых участках рек (по значениям УКИЗВ) за 39-летний период был рассчитан ранговый коэффициент корреляции Кендалла, характеризующий меру линейной связи между годом и значением УКИЗВ за этот год. В качестве независимой переменной выступали данные о годе, ранжированные в порядке возрастания, в качестве зависимой переменной – значение УКИЗВ, рассчитанное по данным концентраций химических веществ за этот год. Наличие статистически значимой прямой связи говорит о том, что более старым годам соответствуют более низкие значения УКИЗВ, при обратной связи более старым годам соответствуют более высокие значения показателя. Соответственно, отрицательная величина рангового коэффициента корреляции указывает на постепенное снижение во времени (за 39 лет) значений УКИЗВ (т. е. улучшение качества воды), положительная – об их постепенном возрастании (т. е. об ухудшении качества воды).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее масштабные и систематичные исследования по изменчивости химического состава и

качества воды арктических рек выполнены сотрудниками Гидрохимического института под руководством чл.-корр. РАН Никанорова А.М. Результаты опубликованы в серии монографий [Никаноров и др., 2007; Никаноров, Брызгалов, 2009; Никаноров, Брызгалов, 2010; Реки материковой..., 2016]. Достоинством является масштабность и комплексность этих исследований, выполненных на основе многолетней информации государственной системы наблюдений Росгидромета на реках арктической зоны России. Гидрохимическая информация получена с соблюдением единства методической базы по отбору проб и выполнению измерений [РД 52.24.309–2016].

Проведенные ранее исследования [Никаноров и др., 2011] показали, что уровень антропогенной нагрузки на устьевых участках крупных рек арктической зоны значительно меняется территориально и в зависимости от показателя, по которому проводится оценка. Так, по модулю стока азота аммонийного антропогенная нагрузка на замыкающих створах рек менялась от «малой» (для Лены, Яны, Индигирки и Колымы) до «критической» (Печора и Обь), по модулю стока органических соединений – была более равномерной и соответствовала категории «умеренной», а по модулю стока нефтепродуктов – «малой».

Наблюдаемые различия в уровне антропогенной нагрузки также обуславливают изменчивость состояния устьевых экосистем крупных арктических рек. Как показано в работе [Никаноров и др., 2011] состояние водных экосистем рек с малой нагрузкой (Лена, Яна, Индигирка и Колыма) соответствует «естественному» или «равновесному» состоянию, а для устьевых участков, испытывающих высокую антропогенную нагрузку (Обь, Енисей и Печора), состояние меняется от «равновесного» до «кризисного».

При усилении антропогенной нагрузки следует ожидать изменений в химическом составе воды и состоянии водных экосистем устьевых участков арктических рек, наиболее уязвимых к антропогенному воздействию и имеющих низкий потенциал самовосстановления. Для выявления потенциальной возможности проявления таких процессов необходимо рассмотреть изменение антропогенной нагрузки во времени.

Пространственно-временная изменчивость максимальных значений модуля стока растворенных химических веществ (значений, превышающих верхнюю границу модального интервала значений модуля стока за определенный период) на устьевых участках рек арктической зоны России представлена в таблице 2. По абсолютным значениям модуля стока наибольшую нагрузку по стоку азота аммонийного и органических веществ испытывают устьевые участки рек Колва, Уса и Адзъва (бассейн

реки Печоры), по стоку нефтепродуктов – рек Адзъва и Колва в арктической зоне Европейской России, рек Надым, Таз и Енисей – в Западной и реки Анабар – в Восточной Сибири.

Сравнение максимальных значений модуля стока азота аммонийного, органических веществ и нефтепродуктов с критериями, приведенными в таблице 1, позволило оценить уровень антропогенной нагрузки на устьевые участки исследуемых арктических рек России за два периода: 1980–1999 (рис. 1) и 2000–2018 гг. (рис. 2).

В целом для рек бассейна Печоры характерна «очень высокая» антропогенная нагрузка по стоку азота аммонийного для притоков и «умеренная» – для устья самой реки. Аналогичная ситуация наблюдается и по стоку органических веществ (для всех исследуемых участков рек выявлена «очень высокая» антропогенная нагрузка). Уровень антропогенной нагрузки по модулю стока нефтепродуктов значительно варьирует от «малой» (для рр. Печора и Уса в отдельные годы) до «очень высокой» (р. Адзъва).

Соотнесение максимальных значений модулей стока для рек арктической зоны Западной Сибири с критериями оценки уровня антропогенной нагрузки показало следующее. Для всех рек уровень антропогенной нагрузки по модулю стока азота аммонийного довольно высокий и меняется от «критической» до «очень высокой», по модулю стока органических веществ более низкий уровень наблюдается для Оби («малая») и рек Надым, Пур (в основном «умеренная» нагрузка), а наибольший – для рек Таз и Енисей (от «умеренной» до «высокой»). Уровень антропогенной нагрузки по модулю стока нефтепродуктов для рек Западной Сибири очень сильно варьирует (от «умеренной» до «высокой») (см. рис. 1, 2).

Результаты оценки нагрузки по модулю химического стока для арктической зоны Восточной Сибири показали, что уровень антропогенной нагрузки по модулю стока азота аммонийного и нефтепродуктов меняется от «умеренного» к «малому», по модулю стока органических веществ – в основном оценивается как «умеренный».

Сравнение результатов оценки за два периода позволило выявить направленность в изменении уровня антропогенной нагрузки для исследуемых рек арктической зоны. В динамике для рек бассейна Печоры выявлено незначительное снижение антропогенной нагрузки по модулю стока азота аммонийного для реки Сулы и по стоку органических веществ также наблюдается незначительное ее снижение для рек Печора и Уса (до «высокой»). Стоит отметить стабилизацию уровня нагрузки для Сулы и Адзъвы по модулю стока нефтепродуктов и улучшение ситу-

ации (снижение нагрузки) на участках рек Печора, Колва и Уса, для последней в период после 2000 г. наблюдается резкое снижение антропогенной нагрузки по стоку нефтепродуктов (см. рис. 1, 2).

Для устьевых участков рек Арктики в Западной Сибири характерно снижения нагрузки почти для всех рек по модулю стока азота аммонийного, по

модулю стока органических веществ для Оби и Таза наблюдается незначительный рост, а для Енисея – снижение до уровня «умеренной» нагрузки. По модулю стока нефтепродуктов происходит снижение нагрузки для рек Обь, Надым, Таз и Енисей на фоне незначительного роста для устьевых участка р. Пур.

Таблица 2

**Временная изменчивость максимальных значений модуля стока (т/км<sup>2</sup>) растворенных химических веществ на устьевых участках рек арктической зоны России**

<b>Европейская Россия</b>					
Временной период	Печора, г. Нарьян-Мар	Адзьва, д. Харута	Колва, с. Хорей-Вер	Сула, д. Коткино	Уса, с. Усть-Уса
<i>Модули стока азота аммонийного</i>					
1980–1999	0,06–0,09	0,60–1,47	0,80–2,32	0,37–1,03	0,45–1,45
2000–2018	0,05–0,08	0,38–1,15	0,16–0,40	0,08–0,22	0,11–0,33
<i>Модули стока ЛОВ (по БПК<sub>5</sub>)</i>					
1980–1999	1,20–2,74	6,18–12,5	9,3–11,2	3,33–6,92	5,18–6,42
2000–2018	1,64–1,83	2,66–8,86	4,10–8,37	2,43–7,98	1,95–6,12
<i>Модули стока нефтепродуктов</i>					
1980–1999	0,07–0,40	0,17–0,89	0,29–0,60	0,12–0,25	0,32–0,49
2000–2018	0,03–0,09	0,17–0,30	0,09–0,24	0,13–0,34	0,04–0,10
<b>Западная Сибирь</b>					
Временной период	Обь, г. Салехард	Надым, г. Надым	Пур, с. Самбруг	Таз, пос. Красноселькуп	Енисей, г. Игарка*
<i>Модули стока азота аммонийного</i>					
1980–1999	0,16–0,20	0,33–0,63	0,40–0,64	0,25–0,62	0,25–0,62
2000–2018	0,11–0,17	0,14–0,30	0,24–0,30	0,22–0,30	0,08–0,18
<i>Модули стока ЛОВ (по БПК<sub>5</sub>)</i>					
1980–1999	0,28–0,36	0,54–1,09	0,72–1,28	0,92–1,01	0,89–2,00
2000–2018	0,37–0,63	–**	–	0,72–1,24	0,42–0,60
<i>Модули стока нефтепродуктов</i>					
1980–1999	0,08–0,21	0,45–0,50	0,12–0,27	0,15–0,50	0,21–0,50
2000–2018	0,10–0,15	0,19–0,28	0,15–0,43	0,12–0,30	0,09–0,11
<b>Восточная Сибирь</b>					
Временной период	Анабар, с. Саскылах	Лена, с. Кюсюр	Яна, п.ст. Юбилейная	Индиگیرка, пос. Чокурдах	Колыма, с. Колымское
<i>Модули стока азота аммонийного</i>					
1980–1999	0,01–0,04	0,07–0,12	0,05–0,07	0,02–0,06	0,05–0,11
2000–2018	0,05–0,08	0,03–0,05	0,02–0,03	0,02–0,05	0,006–0,013
<i>Модули стока ЛОВ (по БПК<sub>5</sub>)</i>					
1980–1999	0,48–0,64	0,62–0,95	0,67–0,76	0,45–0,86	0,46–0,66
2000–2018	0,74–0,95	0,74–0,98	0,64–0,88	0,75–0,88	0,06–0,10
<i>Модули стока нефтепродуктов</i>					
1980–1999	0,29–0,44	0,05–0,09	0,02–0,04	0,05–0,08	0,03–0,04
2000–2018	0,02–0,05	0,04–0,05	0,02–0,03	0,01–0,03	0,03–0,04

Примечания. \* Для р. Енисей (г. Игарка) расчеты проведены за период до 2007 г.

\*\* На рр. Надым и Пур после 1991 г. определение БПК<sub>5</sub> не проводилось.

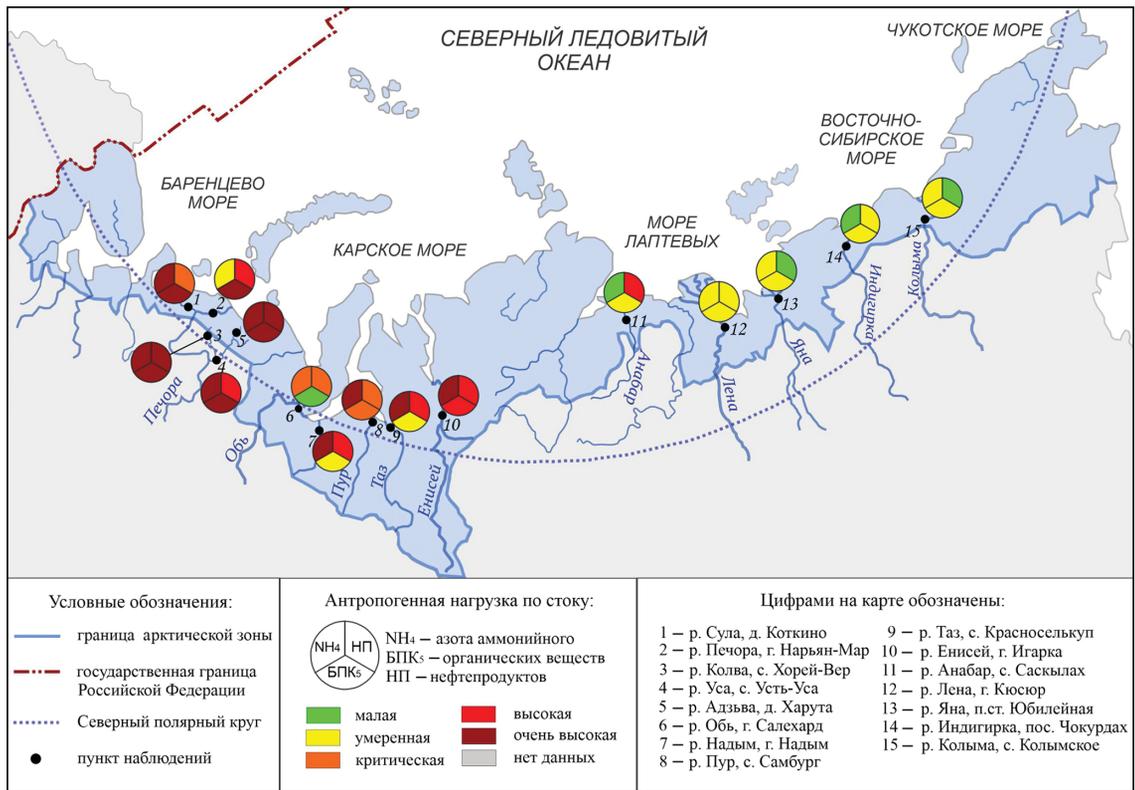


Рис. 1. Пространственная изменчивость уровня антропогенной нагрузки на устьевые участки арктических рек России (1980–1999)

Fig. 1. Spatial variability of the level of anthropogenic load over the river mouth areas in the Russian Arctic (1980–1999)

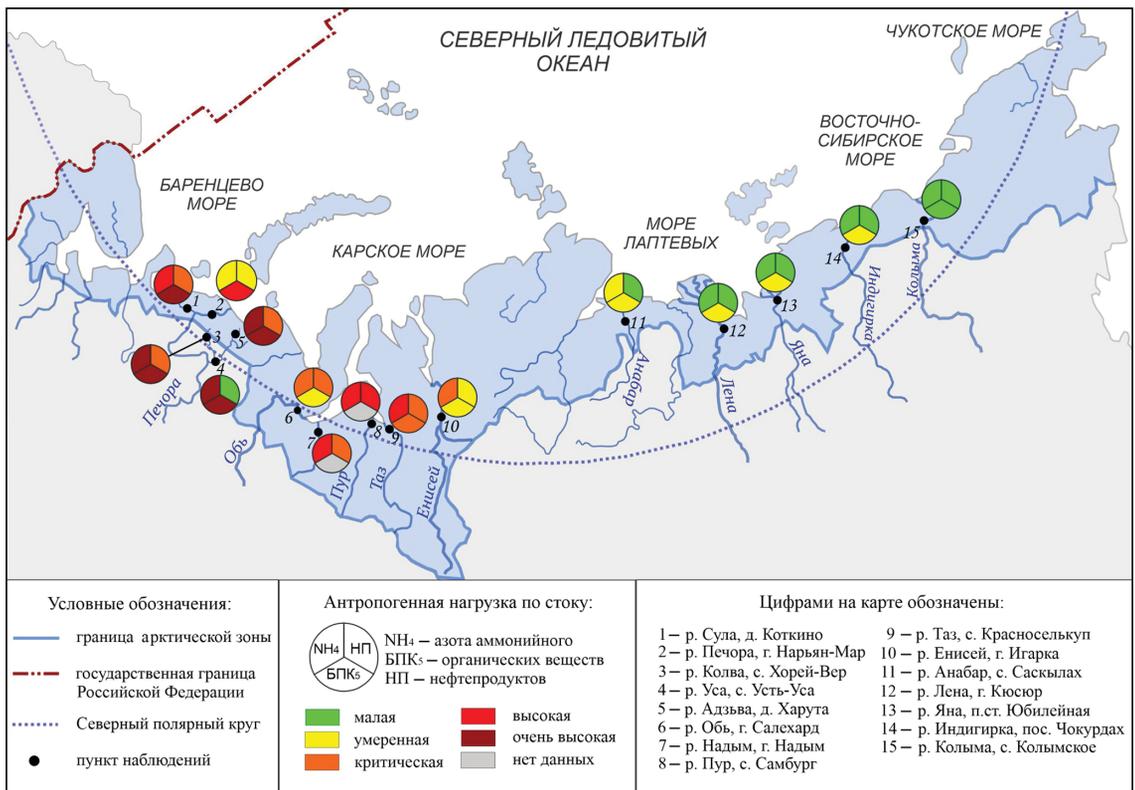


Рис. 2. Пространственная изменчивость уровня антропогенной нагрузки на устьевые участки арктических рек России (2000–2018)

Fig. 2. Spatial variability of the level of anthropogenic load over the river mouth areas in the Russian Arctic (2000–2018)

Для устьевых участков всех исследуемых арктических рек в Восточной Сибири уровень антропогенной нагрузки по модулям стока азота аммонийного и нефтепродуктов имеет тенденцию снижения. Для рек Лена, Яна и Индигирка нагрузка по модулю стока органических веществ не меняется за исключением Колымы (см. рис. 1, 2).

Таким образом, за последние десятилетия для большинства изученных участков крупных рек арктической зоны России антропогенная нагрузка снизилась. При таком снижении антропогенной нагрузки вполне очевидно может происходить и снижение степени загрязненности воды.

Качество воды на замыкающих створах арктических рек России также представлено для двух периодов: 1980–1999 (табл. 3) и 2000–2018 гг. (табл. 4).

Качество воды рек арктической зоны европейской части и Восточной Сибири меняется в пределах 3-го («загрязненная и очень загрязненная» вода) и 4-го («грязная и очень грязная» вода) классов качества, Западной Сибири – 4-го и 5-го классов качества («грязная и очень грязная» и «экстремально грязная» вода, соответственно).

Наиболее загрязненные участки рек со степенью загрязненности воды от «грязной» в 1980-х гг. до «очень грязной» и «экстремально грязной» в период с середины 1990-х до середины 2000-х гг. и последующим незначительным улучшением ситуации в последние годы расположены в арктической зоне Западной Сибири. Это участки рек Обь в районе г. Салехарда, Пур (п. Самбург), Таз (п. Красноселькуп) и Надым (г. Надым).

Такая степень загрязненности воды обусловлена повышенными концентрациями (нередко превышающими ПДК в несколько раз) с высокой частотой повторяемости случаев нарушения качества воды по содержанию приоритетных загрязняющих веществ [Реки материковой..., 2016]:

- органических веществ, нефтепродуктов, соединений железа и меди практически для всех исследуемых участков рек;

- соединений азота аммонийного и нитритного для рек Сула, Уса, Индигирки и всех участков арктической зоны Западной Сибири;

- соединений цинка и фенолов по всем замыкающим створам.

В целом изменения качества воды исследуемых арктических рек за многолетний период носят разнонаправленный характер.

В последние годы (после 2000-х гг.) можно отметить следующие основные направления изменения качества воды и степени ее загрязненности:

- улучшение качества воды от «грязной» к «очень загрязненной» и «загрязненной» характерно для участков рек Адзья (д. Харута), Колва (с. Хорей-

- Вер), Уса (с. Усть-Уса), Анабар (с. Саскылах), Индигирка (п. Чокурдах), Колыма (с. Колымское);

- ухудшение качества воды от «очень загрязненной» к «грязной» на участке реки Сулы у д. Коткино.

Для отдельных рек качество воды остается постоянным на определенном уровне загрязненности:

- «загрязненная» и «очень загрязненная» (3-й класс качества воды) для участков рек Лена (с. Кюсюр), Печора (д. Оксина) и Яна (п.ст. Юбилейная);

- «грязная» и «очень грязная» (4-й класс качества воды) – на участке реки Енисей (г. Игарка).

И даже для самых загрязненных участков рек Западной Сибири наблюдается незначительное улучшение качества воды с 5-го на 4-й класс (рр. Надым, Обь, Пур, Таз).

Для подтверждения выявленной выше направленности изменения качества воды проведен корреляционный анализ значений УКИЗВ соответствующих определенному классу качества воды за каждый год. Для этого рассчитан ранговый коэффициент корреляции Кендалла, характеризующий меру линейной связи между годом и значением УКИЗВ для конкретного участка реки (использован ППП Statistica 13.3). Результаты представлены в таблице 5.

Статистически значимое улучшение качества воды подтверждено для 44,4% исследуемых участков рек – это участки на замыкающих створах притоков Печоры, рек Енисей, Анабар, Индигирка и Колыма. Для остальных исследуемых участков рек также проявляется тенденция снижения значений УКИЗВ (т. е. улучшение качества воды), но с более низкой статистической значимостью.

## ВЫВОДЫ

Интенсивное освоение арктической зоны и устьевых областей крупных рек может привести к нарушению экологического благополучия в уязвимых арктических экосистемах. Дополнительное поступление химических веществ с речным стоком, в том числе загрязняющих, оказывает влияние на состояние биотической и абиотической компоненты устьевых экосистем рек и прибрежных частей морских акваторий. Поэтому исследования химического стока рек важны не только на региональном уровне, но и в глобальном масштабе.

Сравнительный анализ уровня антропогенной нагрузки по модулям стока азота аммонийного, органических веществ и нефтепродуктов для замыкающих створов крупных арктических рек показал значительные отличия. Так, наименьшую суммарную антропогенную нагрузку («малую» или «умеренную») испытывают устьевые участки рек Восточной Сибири, а более значительная антропогенная нагрузка («высокая» или «очень высокая»)

Временная изменчивость качества воды на замыкающих створах рек арктической зоны РФ в 1980–1998 гг.

№ п/п	Река	Пункт наблюдений	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
<i>Европейская Россия</i>																					
1	Адзья	д. Харута	3Б	3Б	3Б	4А	3Б	4А	3Б	4А	3Б	4А	4А	4А	3Б	4А	3А	3Б	4А	4А	–
2	Кольва	с. Хорей-Вер	3Б	4А	4А	4А	4А	4А	3Б	4А	3Б	4А	4А	4А	4А	3Б	–	–	–	–	–
3	Печора	д. Океино	3Б	4А	4А	3Б	3Б	3Б	3Б	4А	3Б	4А	3А	3А	3Б						
4	Сула	д. Коткино	4А	4А	4Б	3Б	3Б	4А	3Б	3Б	–	–	3Б								
5	Уса	с. Усть-Уса	–	–	–	–	–	–	4А	3А	4А	3Б	3А	3А							
<i>Западная Сибирь</i>																					
6	Енисей	г. Игарка	4А	4А	4А	4Б	4А	4А	3Б	4А	4А	4А	4А	4А	4А	–	3Б	–	4А	4А	4А
7	Надым	г. Надым	4Б	4А	4А	4Б	4Б	4Б	–	–	–	–	4Б	–	–						
8	Обь	г. Салехард	4Б	4В	4Б	5	4Б	4Б	5	4В											
9	Пур	п. Самбург	4Б	4Б	4Б	4Б	5	4Б	4Б	4Б	4В	4А	4А	5	4В	–	–	–	–	–	–
10	Таз	п. Красноселькуп	4А	4Б	4А	4А	4А	4Б	4А	4Б	4Б	4А	4Б	4Б	4Б	4Б	4Б	4Г	4А	–	–
<i>Восточная Сибирь</i>																					
11	Анабар	с. Саскылах	4А	4А	4А	–	–	4А	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	3Б	–	3Б	–	3Б	3Б	–	3А
12	Индигирка	п. Чокурдах	3А	3Б	4А	4Б	3Б	4А	4А	3Б	4А	3Б	3Б	4А							
13	Кольма	с. Кольмское	4А	3Б	4А	4А	4А	3Б	4А	3А	4А	4А	4А	4А	4А	4Б	3Б	3А	–	3А	4А
14	Лена	с. Кюсюр	–	3Б	4А	4А	3Б	3Б	3Б	3А	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	4Б	3Б	4А	3Б	3Б	3Б
15	Яна	п.ст. Юбилейная	3Б	4А	3Б	4А	4В	4А	3Б	4А	3Б	3Б									

*Примечание.* Цветовое обозначение ККВ и степени загрязненности воды:

- 3 ККВ («А» и «Б») – загрязненная и очень загрязненная;
- 4 ККВ (разряды «А» и «Б») – грязная;
- 4 ККВ (разряды «В» и «Г») – очень грязная;
- 5 ККВ – экстремально грязная.

Временная изменчивость качества воды на замыкающих створах рек арктической зоны РФ в 1999–2018 гг.

№ п/п	Река	Пункт наблюдений	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<i>Европейская Россия</i>																						
1	Адзья	д. Харута	3Б	3А	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	4А	3А	3А	3Б	3А	3Б	3А	3А	3А	4А	3А	3А	3А
2	Колва	с. Хорей-Вер	3Б	3Б	3А	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	4А	4А	3Б	3А	3А	3Б	3Б	3Б	3Б	3А	3А	3А
3	Печора	д. Оксина	3Б	3Б	3Б	3Б	3Б	4А	3Б	4А	3Б	3Б	3Б									
4	Сула	д. Коткино	4А	3Б	4А	3Б	3Б	3Б	3Б	3Б	4А	3Б	4А	4А								
5	Уса	с. Усть-Уса	3А	3Б	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	4А	3Б	3Б	3А	3Б	3А	3А	3Б	4Б	4А	4А	3Б	4А
<i>Западная Сибирь</i>																						
6	Енисей	г. Игарка	4А	4А	3Б	4А	4Б	4А	4А	4А	4А	4А	4А	3Б	4А	4А	4А	3Б	3Б	4А	3А	3А
7	Надым	г. Надым	–	5	4В	4Б	4Б	4Г	5	5	5	4В	5	4Б	4В	4Б	5	4Б	4Б	4Б	4А	4Б
8	Обь	г. Салехард	4Б	5	4В	4В	5	4Б	4В	5	5	4В	4В	4В	4В	4А	4Б	4А	4Б	4Б	4Б	4В
9	Пур	п. Самбург	–	–	–	–	–	–	3Б	5	4В	4В	4Б	4В	4Б	4Б	4А	4В	4Б	4Б	4Б	4Б
10	Таз	п. Красноселькуп	–	4Г	4Б	4Б	4Б	4В	4В	4Б	5	4Б	4Б	4Б	4В	4Б	4В	4А	4Б	4А	4А	4А
<i>Восточная Сибирь</i>																						
11	Анабар	с. Саскылах	3Б	4А	4А	3Б	3Б	3А	4А	4А	4Б	4А	3Б	4А	3Б	3Б	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	3Б
12	Индигирка	п. Чокурдах	4А	4А	3Б	3А	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	3А	4А	3Б	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	3А	3Б	3А
13	Кольма	с. Кольмское	–	–	–	–	3А	4А	3А	3А	3А	3А	3Б	3А	3Б	3А						
14	Лена	с. Кюстюр	4А	4А	4А	3Б	3Б	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	3А	3Б	3Б	3А	3Б	3А	3Б	3Б	3Б	3Б
15	Яна	п.ст. Юбилейная	4А	3Б	4А	4А	4А	4А	3Б	3А	3Б	4А	4А	3Б								

*Примечание.* Цветовое обозначение ККВ и степени загрязненности воды:

- 3 ККВ («А» и «Б») – загрязненная и очень загрязненная;
- 4 ККВ (разряды «А» и «Б») – грязная;
- 4 ККВ (разряды «В» и «Г») – очень грязная;
- 5 ККВ – экстремально грязная.

характерна для устьев рек бассейна Печоры и рек Западной Сибири (в силу большей освоенности территории и, соответственно, более высокой техногенной нагрузки). В период с 2000 по 2018 гг. уровень нагрузки снизился для большинства рек.

Качество воды рек арктической зоны Европейской России и Восточной Сибири меняется в пределах 3-го и 4-го классов качества, Западной Сибири – 4-го и 5-го классов. В целом изменения качества воды исследуемых арктических рек за многолетний период носят разнонаправленный характер с тенденцией улучшения после 2000-х гг., что согласуется с результатами оценки антропогенной нагрузки и ее изменчивости на устьевых участках исследуемых рек.

Большая часть изученных рек бассейна Северного Ледовитого океана отличается устьевыми областями большой протяженности, сложными дельтовыми участками и устьевыми взморьями, на которых вследствие смешения речных и морских вод продолжается трансформация химического стока. Устьевые участки рек являются «промежу-

точными» и очень специфическими природными системами, геохимическими барьерами, на которых происходит основная потеря химических веществ, выносимых реками. Поэтому по величине химического стока на замыкающих створах рек можно лишь косвенно судить о выносе загрязняющих веществ в прибрежные акватории арктических морей.

С учетом того что выявленный уровень антропогенной нагрузки на устьевые участки арктических рек в последние десятилетия снижается, влияние химического стока на прибрежные морские акватории будет незначительным.

В дальнейшем полученные данные могут быть использованы для подготовки прогнозных оценок по изменчивости качества воды на устьевых участках и влиянии речного стока на морские акватории арктических морей. Это будет способствовать повышению экологической безопасности в регионе и экологической обоснованности природоохранных мероприятий на устьевых участках рек арктической зоны России.

Таблица 5

**Значения коэффициента корреляции, характеризующего меру линейной связи между годом и значением УКИЗВ для устьевых участков крупных рек арктической зоны РФ**

№ п/п	Река, пункт наблюдений	Коэффициент Кендалла	№ п/п	Река, пункт наблюдений	Коэффициент Кендалла
<i>Европейская Россия</i>			<i>Западная Сибирь</i>		
1	Печора, д. Оксина	0,18	10	Надым, г. Надым	-0,01
2	Печора, г. Нарьян-Мар	0,24	11	Пур, п. Самбург	-0,23
3	Уса, с. Усть-Уса	<b>-0,31</b>	<i>Восточная Сибирь</i>		
4	Адзъва, д. Харута	<b>-0,34</b>	12	Лена, с. Кюсюр	-0,16
5	Колва, с. Хорей-Вер	<b>-0,47</b>	13	Лена, п.ст. Хабаровова	-0,13
6	Сула, д. Коткина	<b>-0,12</b>	14	Анабар, с. Саскылах	-0,26
<i>Западная Сибирь</i>			15	Индибирка, п. Чокурдах	<b>-0,28</b>
7	Обь, г. Салехард	-0,21	16	Яна, п.ст. Юбилейная	-0,14
8	Енисей, г. Игарка	<b>-0,36</b>	17	Колыма, с. Колымское	-0,19
9	Таз, п. Красноселькуп	-0,03	18	Колыма, п. Черский	-0,34

*Примечание.* Статистически значимые ранговые коэффициенты корреляции при  $p < 0,05$  и выше выделены жирным шрифтом, знак «минус» означает убывающую тенденцию.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60165.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамова Е.А. Оценка уровня антропогенной нагрузки на бассейн реки Оки в пределах Московской обла-

сти // Вестн. Моск. гос. обл. ун-та. Сер. География. 2011. № 2. С. 20–26.

- Гелашивили Д.Б., Королев А.А., Басуров В.А. Зонирование территории по степени нагрузки сточными водами с помощью обобщенной функции желательности // Поволжский экологический журнал. 2006. № 2/3. С. 129–138.
- ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. Введен 01.01.1975, переиздание, август 1988. М.: Изд-во стандартов, 1988.
- Заличева И.Н., Волков И.В. К вопросу о регламентировании антропогенной нагрузки биогенными веществами на водные экосистемы в таежной природно-климатической зоне // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 6. С. 674–679.
- Королев А.А., Розенберг Г.С., Гелашивили Д.Б., Панютин А.А., Иудин Д.А. Экологическое зонирование территории Волжского бассейна по степени нагрузки сточными водами на основе бассейнового принципа (на примере Верхней Волги) // Известия Самарского научного центра РАН. 2007. Т. 9. № 1. С. 265–269.
- Моисеенко Т.И. Антропогенно-индуцированные процессы в водах суши арктических регионов и критерии их оценки // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 4. С. 421–432. DOI: 10.1134/S032105961804017X.
- Моисеенко Т.И. Критерии оценки качества вод и нормирование загрязнения. Тезисы докладов 4-й Международной конф., посвященной памяти проф. Г.Г. Винберга «Современные проблемы гидроэкологии» (Санкт-Петербург, 11–15 окт. 2010 г.). 2010. С. 125.
- Национальный атлас Арктики. М.: Роскартография, 2017. 496 с.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Косменко Л.С., Кондакова М.Ю., Решетняк О.С. Антропогенная нагрузка на устья рек Российской Арктики // Полярная криосфера и воды суши. М.; СПб.: Paulsen Editions, 2011. С. 288–303.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Решетняк О.С. Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций. Ростов на/Д.: НОК, 2012. 310 с.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А. Реки России. Ч. I: Реки Кольского Севера (гидрохимия и гидроэкология). Ростов на/Д.: НОК, 2009. 200 с.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А. Реки России. Ч. II: Реки Европейского Севера и Сибири (гидрохимия и гидроэкология). Ростов на/Д.: НОК, 2010. 296 с.
- Никаноров А.М., Иванов В.В., Брызгалов В.А. Реки Российской Арктики в современных условиях антропогенного воздействия. Ростов на/Д.: НОК, 2007. 280 с.
- Одессер С.В. Территориальная дифференциация в экономико-географических типологиях // Известия АН СССР. Серия географическая. 1991. № 6. С. 61–69.
- Петрова М.И., Власов Б.П. Интегральная оценка техногенной нагрузки на озера от локальных источников // Вестник БГУ. Сер. 2. 2008. № 3. С. 112–115.
- РД 52.24.776–2012. Рекомендации. Оценка антропогенной нагрузки и риска воздействия на устьевые области рек с учетом их региональных особенностей. Ростов на/Д.: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2012. 32 с.
- РД 52.24.819–2014. Рекомендации. Оценка антропогенной нагрузки на речные экосистемы с учетом их региональных особенностей. Ростов на/Д.: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2014. 38 с.
- РД 52.24.309-2016. Руководящий документ. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. Ростов на/Д.: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2016. 104 с.
- РД 52.24.643–2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов на/Д.: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2002. 49 с.
- Реки материковой части Российской Арктики / А.М. Никаноров, В.А. Брызгалов, Л.С. Косменко, А.О. Даниленко. Ростов на/Д.: Изд-во Южного федерального университета, 2016. 276 с.
- Решетняк О.С. Антропогенная нагрузка на водные экосистемы реки Колымы // География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 47–52.
- Рыбкина И.Д., Стояцева Н.В. Оценка антропогенной нагрузки на водосборную территорию Верхней и Средней Оби // Мир науки, культуры и образования. 2010. № 6(25). Ч. 2. С. 295–299.
- Рыбкина И.Д., Стояцева Н.В., Куретина Н.Ю. Методика зонирования территории речного бассейна по совокупной антропогенной нагрузке (на примере Обь-Иртышского бассейна) // Водное хозяйство России. 2011. № 4. С. 42–52.
- Сапрыкина К.М. Современное экологическое состояние арктической зоны РФ и возможная динамика развития // Территория «Нефтегаз». 2015. № 5. С. 86–90.
- Селезнева А.В. Антропогенная нагрузка на реки от точечных источников загрязнения // Известия Самарского научного центра РАН. 2003. № 2. Т. 5. С. 268–277.
- Стояцева Н.В. Оценка антропогенной нагрузки на водные объекты Западной Сибири. Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура. Международная научно-практическая конференция, посвященная 20-летию Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (Кызыл, 14–15 окт. 2015 г): материалы. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2015. С. 295–297.
- Третьяков М.В., Брызгалов В.А., Румянцева Е.В. Устьевые участки рек как индикаторы антропогенных изменений геоэкологического состояния устьевых областей рек арктической зоны Российской Федерации // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2020. Т. 17. Вып. 3. С. 311–323. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-311-323.
- Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние / В.А. Брызгалов, А.М. Никаноров, Л.С. Косменко, О.С. Решетняк. Ростов на/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. 164 с.
- Черногаева Г.М., Лихачева Э.А., Кошкарёв А.В., Широкова В.А., Чеснокова И.В. Потенциальные экологические риски в арктической зоне РФ в условиях изменяющегося климата // Астраханский вестник экологического образования. 2019. № 1(49). С. 4–13.
- Щерба В.А., Абрамова Е.А. Оценка нагрузки сточными водами на водотоки бассейна реки Москвы // Методы экологических исследований. 2011. № 6. С. 116–124.
- Экологический атлас Ростовской области / под ред. В.Е. Закруткина. Ростов на/Д., 2000. 120 с.
- Entekhabi D., Asrar Ch., Betts A.K. et al. An agenda for land surface hydrology research and call for the second international hydrological decade. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1999, vol. 80, no. 10, p. 269–293.
- Hoekstra A.Y., Mekonnen M.M. The water footprint of humanity, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, no. 109(9), p. 3232–3237, DOI: 10.1073/pnas.1109936109.

- Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y. Global anthropogenic phosphorus loads to freshwater and associated grey water footprints and water pollution levels: A high-resolution global study, *Water Resources Research*, 2018, no. 54, p. 345–358, DOI: 10.1002/2017WR020448.
- Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y. Global gray water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads to fresh water, *Environmental Science and Technology*, 2015, no. 49(21), p. 12860–12868, DOI: 10.1021/acs.est.5b03191.
- The water footprint assessment manual: Setting the global standard.* A.Y. Hoekstra, A.K. Chapagain, M.M. Aldaya, M.M. Mekonnen (eds.), London, UK, Earthscan, 2012, 202 p.
- Tong Y., Wei Zhang et al. Decline in Chinese lake phosphorus concentration accompanied by shift in sources since 2006, *Nature Geoscience*, vol. 10, 2017, p. 507–511, DOI: 10.1038/NGEO2967.
- Электронный источник  
GEMI – Integrated Monitoring Initiative for SDG 6. Step-by-step monitoring methodology for indicator 6.4.2, Version: 4 February 2019 rev., URL: <https://www.unwater.org/publications/step-step-methodology-monitoring-water-stress-6-4-2/> (access date 19.04.2021).

Поступила в редакцию 02.01.2021  
После доработки 20.09.2021  
Принята к публикации 22.11.2021

## ANTHROPOGENIC LOAD AND WATER QUALITY AT THE MAIN-STREAM SECTIONS OF RIVERS IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA

O.S. Reshetnyak<sup>1</sup>, L.S. Kosmenko<sup>2</sup>, A.A. Kovalenko<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> *Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Laboratory of remote and chemical-biological methods of monitoring the state and pollution of water bodies*

<sup>1</sup> *Southern Federal University, Rostov-on-Don, Institute of Earth Sciences, Department of Geocology and Applied Geochemistry, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: olgarel@mail.ru*

<sup>1</sup> *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: o.reshetnyak@gidrohim.com*

<sup>2</sup> *Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Chemistry; e-mail: l.kosmenko@gidrohim.com*

<sup>3</sup> *Research laboratory assistant; e-mail: arinaa.kov@gmail.com*

The ongoing anthropogenic impact on the Russian Arctic river ecosystems leads to an anthropogenic transformation of their ecological state, which makes it necessary to assess the anthropogenic load and compare it with the degree of water pollution in the Arctic river mouth areas. The scientific practice uses various approaches to assess the anthropogenic pressure on water bodies. The main approach is to develop a methodology for ecological standardization and determination of critical levels of pressure on aquatic ecosystems. The study deals with the assessment of the level of anthropogenic load on river mouth sections using runoff rates of chemical substances, namely readily oxidizable organic matter, ammonia nitrogen and oil products, which are integral indicators of the quality of the aquatic environment.

The paper presents the results of assessing the anthropogenic load on river mouth sections and water quality data for the Russia Arctic rivers for the periods from 1980 to 1999 and from 2000 to 2018. The objects of research are large rivers, such as Pechora, Ob, Pur, Taz, Yenisei, Anabar, Lena, Yana, Indigirka and Kolyma.

In the process of comparative analysis of the anthropogenic load in terms of the runoff rates of ammonia nitrogen, organic matter, and oil products significant differences were revealed. The rivers of the Pechora River basin and Western Siberia showed higher level of anthropogenic pressure, while the Eastern Siberia rivers are characterized by the lowest total anthropogenic load. The anthropogenic load demonstrates the decreasing dynamics according to most of the estimated indicators for most of the studied large rivers of the Russia Arctic zone. At the same time, water quality of the rivers of the European and East Siberian parts of the Russia Arctic zone varies in between the 3rd and 4th quality classes, while in the West Siberian part in the range of the 4th and 5th classes. Generally, multidirectional tendencies of water quality changes were revealed for the studied rivers. The trend of improving water quality for the studied tributaries of the Pechora River and mouth sections of the Yenisei, Anabar, Indigirka and Kolyma rivers was statistically confirmed based on the correlation analysis.

The results of the study could be useful for the elaboration of environmentally-sound water protection measures to increase the environmental safety in fragile mouth areas of the Arctic rivers.

**Keywords:** Arctic rivers, anthropogenic load level, water quality, flow module, ammonia nitrogen, oil products, organic matter

**Acknowledgments.** The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18–05–60165).

## REFERENCES

- Abramova E.A. Otsenka urovnya antropogennoi nagruzki na bassein reki Oki v predelakh Moskovskoi oblasti [Assessment of the level of anthropogenic load on the Oka River basin within the Moscow region], *Vestn. Mosk. gos. obl. un-ta, Ser. Geografiya*, 2011, no. 2, p. 20–26. (In Russian)
- Chernogaeva G.M., Likhacheva E.A., Koshkarev A.V., Shirokova V.A., Chesnokova I.V. Potentsial'nye ekologicheskie riski v arkticheskoi zone RF v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata [Potential Environmental Risks in the Arctic Zone of the Russian Federation Under Changing Climate], *Astrakhanskii vestn. ekologicheskogo obrazovaniya*, 2019, no. 1(49), p. 4–13. (In Russian)
- Ekologicheskii atlas Rostovskoi oblasti* [Ecological Atlas of the Rostov Region], V.E. Zakrutkin (ed.), Rostov-on-Don, 2000, 120 p. (In Russian)
- Entekhabi D., Asrar Ch., Betts A.K. et al. An agenda for land surface hydrology research and call for the second international hydrological decade, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1999, vol. 80, no. 10, p. 269–293.
- Gelashvili D.B., Korolev A.A., Basurov V.A. Zonirovanie territorii po stepeni nagruzki stochnymi vodami s pomoshch'yu obobshchennoi funktsii zhelatel'nosti [Territory zoning according to the degree of wastewater load using a generalized desirability function], *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal*, 2006, no. 2/3, p. 129–138. (In Russian)
- GOST 19179-73. Gidrologiya sushii. Terminy i opredeleniya* [State standard 19179-73. Land hydrology. Terms and Definitions], Introduced 01.01.1975, Reprinted, August 1988, Moscow, Publishing house of standards, 1988. (In Russian)
- Hoekstra A.Y., Mekonnen M.M. The water footprint of humanity, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, no. 109(9), p. 3232–3237, DOI: 10.1073/pnas.1109936109.
- Korolev A.A., Rozenberg G.S., Gelashvili D.B., Panyutin A.A., Iudin D.A. Ekologicheskoe zonirovanie territorii Volzhskogo basseina po stepeni nagruzki stochnymi vodami na osnove basseinovogo printsipa (na primere Verkhnei Volgi) [Ecological zoning of the Volga River basin territory according to the degree of wastewater load on the basin principal basis (case study of the Upper Volga River)], *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2007, no. 1, vol. 9, p. 265–269. (In Russian)
- Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y. Global anthropogenic phosphorus loads to freshwater and associated grey water footprints and water pollution levels: A high-resolution global study, *Water Resources Research*, 2018, no. 54, p. 345–358, DOI: 10.1002/2017WR020448.
- Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y. Global gray water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads to fresh water, *Environmental Science and Technology*, 2015, no. 49(21), p. 12860–12868, DOI: 10.1021/acs.est.5b03191.
- Moiseenko T.I. [Criteria for assessing water quality and regulation of pollution], *Tezisy dokladov 4-i Mezhdunarodnoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati prof. G.G. Vinberga "Sovremennye problemy gidroekologii"* [Abstracts of the 4th International Conf. dedicated to the memory of prof. G.G. Vinberg "Modern problems of hydroecology"], St. Petersburg Publ., 2010, 125 p. (In Russian)
- Moiseenko T.I. Anthropogenic processes in continental waters of Arctic regions and criteria for their assessment, *Water Resources*, 2018, vol. 45, no. 4, p. 578–588, DOI: 10.1134/S0097807818040176.
- Natsional'nyi atlas Arktiki* [National Atlas of the Arctic], Moscow, Roskartografiya Publ., 2017, 496 p. (In Russian)
- Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A. *Reki Rossii, chast' I, Reki Kol'skogo Severa (gidrokhimiya i gidroekologiya)* [Rivers of Russia, part I, Rivers of the Kola North (hydrochemistry and hydroecology)], Rostov-on-Don, NOK Publ., 2009, 200 p. (In Russian)
- Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A. *Reki Rossii, chast' II, Reki Evropeiskogo Severa i Sibiri (gidrokhimiya i gidroekologiya)* [Rivers of Russia, part II, Rivers of the European North and Siberia (hydrochemistry and hydroecology)], Rostov-on-Don, NOK Publ., 2010, 296 p. (In Russian)
- Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A., Kosmenko L.S., Kondakova M.Yu., Reshetnyak O.S. [Anthropogenic load on river mouths in the Russian Arctic], *Polyarnaya kriosfera i vody sushii* [Polar cryosphere and land waters], Moscow, St. Petersburg, Paulsen Editions Publ., 2011, p. 288–303. (In Russian)
- Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A., Reshetnyak O.S. *Reki Rossii v usloviyakh chrezvychainykh ekologicheskikh situatsii* [Rivers of Russia under the environmental emergencies], Rostov-on-Don, NOK Publ., 2012, 310 p. (In Russian)
- Nikanorov A.M., Ivanov V.V., Bryzgalov V.A. *Reki Rossiiskoi Arktiki v sovremennykh usloviyakh antropogennoi vozdeistviya* [Rivers of the Russian Arctic under current anthropogenic impact], Rostov-on-Don, NOK Publ., 2007, 280 p. (In Russian)
- Odesser S.V. Territorial'naya differentsiatsiya v ekonomiko-geograficheskikh tipologiyakh [Territorial differentiation in economic-geographical typologies], *Izvestiya AN SSSR, Ser. geograf.*, 1991, no. 6, p. 61–69. (In Russian)
- Petrova M.I., Vlasov B.P. Integral'naya otsenka tekhnogennoi nagruzki na ozera ot lokal'nykh istochnikov [Integral estimation of technogenic impact on lakes from point sources], *Vestn. BGU, Ser. 2*, 2008, no. 3, p. 112–115. (In Russian)
- R 52.24.776–2012. Rekomendatsii. Otsenka antropogennoi nagruzki i riska vozdeistviya na ust'evye oblasti rek s uchetom ikh regional'nykh osobennostei* [Recommendations. Assessment of anthropogenic load and risk of impact on the estuarine areas of rivers, taking into account their regional characteristics], Rostov-on-Don, Rosgidromet, FSBI "Hydrochemical Institute", 2012, 32 p. (In Russian)
- R 52.24.819–2014. Rekomendatsii. Otsenka antropogennoi nagruzki na rechnye ekosistemy s uchetom ikh regional'nykh osobennostei* [Recommendations. Assessment of anthropogenic load on river ecosystems taking into account their regional characteristics], Rostov-on-Don, Rosgidromet, FSBI "Hydrochemical Institute", 2014, 38 p. (In Russian)
- RD 52.24.309-2016. Organizatsiya i provedenie rezhimnykh nablyudenij za sostoyaniem i zagryazneniem poverhnostnykh vod sushii* [Organization and realization of routine observations of the state and pollution of surface continental waters], Rostov-on-Don, Rosgidromet, FSBI "Hydrochemical Institute", 2016, 104 p. (In Russian)

- RD 52.24.643–2002. *Metod kompleksnoi otsenki stepeni zagryaznennosti poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam* [Method of comprehensive assessment of the degree of pollution of surface waters using hydrochemical indicators], Rostov-on-Don, Rosgidromet, FSBI "Hydrochemical Institute", 2002, 49 p. (In Russian)
- Reki materikovoï chasti Rossiiskoi Arktiki [Rivers of the mainland part of the Russian Arctic], A.M. Nikanorov, V.A. Bryzgalov, L.S. Kosmenko, A.O. Danilenko (eds.), Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2016, 276 p. (In Russian)
- Reshetnyak O.S. Antropogennaya nagruzka na vodnye ekosistemy reki Kolymy [Anthropogenic load on aquatic ecosystems of the Kolyma River], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2015, no. 2, p. 47–52. (In Russian)
- Rybkina I.D., Stoyashcheva N.V. Otsenka antropogennoi nagruzki na vodosbornuyu territoriyu Verkhnei i Srednei Obi [Assessment of anthropogenic load on the catchment area of the Upper and Middle Ob River], *Mir nauki, kul'tury i obrazovaniya*, 2010, no. 6(25), part 2, p. 295–299. (In Russian)
- Rybkina I.D., Stoyashcheva N.V., Kurepina N.Yu. Metodika zonirovaniya territorii rechnogo basseina po sovokupnoi antropogennoi nagruzke (na primere Ob'-Irtyskogo basseina [A method of zoning the territory of a river basin according to the aggregate anthropogenic load (case study of the Ob-Irtysk River basin)], *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2011, no. 4, p. 42–52. (In Russian)
- Saprykina K.M. Sovremennoe ekologicheskoe sostoyanie arkticheskoi zony RF i vozmozhnaya dinamika razvitiya [Current environmental state of the Arctic zone of the Russian Federation and possible development dynamics], *Territoriya "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]*, 2015, no. 5, p. 86–90. (In Russian)
- Selezneva A.V. Antropogennaya nagruzka na reki ot tochechnykh istochnikov zagryazneniya [Anthropogenic load on rivers from point sources of pollution], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2003, no. 2, vol. 5, p. 268–277. (In Russian)
- Shcherba V.A., Abramova E.A. Otsenka nagruzki stochnymi vodami na vodotoki basseina reki Moskvy [Assessment of the wastewater load on the watercourses of the Moskva River basin], *Metody ekologicheskikh issledovaniy*, 2011, no. 6, p. 116–124. (In Russian)
- Stoyashcheva N.V. [Assessment of the anthropogenic load on water bodies in Western Siberia], *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Regional'naya ekonomika: tekhnologii, ekonomika, ekologiya i infrastruktura"* [Materials of the International Scientific and Practical Conference "Regional Economy: Technologies, Economics, Ecology and Infrastructure"], 2015, p. 295–297. (In Russian)
- The water footprint assessment manual: Setting the global standard*, A.Y. Hoekstra, A.K. Chapagain, M.M. Aldaya, M.M. Mekonnen (eds.), London, UK, Earthscan, 2012, 202 p.
- Tong Y., Wei Zhang et al. Decline in Chinese lake phosphorus concentration accompanied by shift in sources since 2006, *Nature Geoscience*, 2017, vol. 10, p. 507–511, DOI: 10.1038/NGEO2967.
- Tret'yakov M.V., Bryzgalov V.A., Rumyantseva E.V. Ust'evye uchastki rek kak indikatory antropogennykh izmeneniy geoekologicheskogo sostoyaniya ust'evykh oblastei rek Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii [Estuarial river zones as indicators of anthropogenic changes of geo-ecological condition of the estuarial areas in the Arctic zone of the Russian Federation], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya*, St. Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., 2020, vol. 17, no. 3, p. 311–323, DOI: 10.20295/1815-588Kh-2020-3-311-323. (In Russian)
- Ust'evye ekosistemy krupnykh rek Rossii: antropogennaya nagruzka i ekologicheskoe sostoyanie [Estuary ecosystems of large rivers in Russia: anthropogenic load and ecological state], V.A. Bryzgalov, A.M. Nikanorov, L.S. Kosmenko, O.S. Reshetnyak (eds.), Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2015, 164 p. (In Russian)
- Zalicheva I.N., Volkov I.V. K voprosu o reglamentirovaniï antropogennoi nagruzki biogennymi veshchestvami na vodnye ekosistemy v taezhnoi prirodno-klimaticheskoi zone [On the regulation of anthropogenic nutrient load on aquatic ecosystems in the taiga natural-climatic zone], *Vodnye resursy*, 1994, vol. 21, no. 6, p. 674–679. (In Russian)
- Web source*  
GEMI – Integrated Monitoring Initiative for SDG 6. Step-by-step monitoring methodology for indicator 6.4.2, Version: 4 February 2019 rev., URL: <https://www.unwater.org/publications/step-step-methodology-monitoring-water-stress-6-4-2/> (access date 19.04.2021).

Received 02.01.2021

Revised 20.09.2021

Accepted 01.11.2021