DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-234-247
УДК 504.06

КОМПЛЕКСНОЕ ЭКОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ МАТЕРИКОВОЙ ЧАСТИ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ В КОНТЕКСТЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНА

О. С. Решетняк, А. А. Коваленко
Гидрохимический институт Росгидромета, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 11 октября 2022 г.

Рассмотрены основные методические подходы к экологическому районированию арктической территории, разработанные в России. Дифференциация Арктической зоны особенно актуальна в контексте реализации принципов устойчивого развития территорий. Предложен подход к выполнению комплексного районирования материковой части Арктической зоны по степени экологической напряженности территорий, основанной на эколого-гидрохимическом состоянии речных экосистем и плотности населения. Показано, что большинство речных экосистем Арктической зоны находится в относительно удовлетворительном или напряженном состоянии.

Ключевые слова: *экологическое районирование, Арктическая зона, качество воды, антропогенная нагрузка, устойчивость химического состава воды, степень экологической напряженности.*

Введение

Территория материковой (континентальной) суши российской Арктики занимает более 18% территории страны [1]. При этом Арктическая зона отличается от других регионов по природно-климатическим, геоморфологическим, гидрологическим и социально-экономическим признакам [2]. «Нарушенные территории здесь занимают всего 1—3% от общей площади суши... Однако, несмотря на очаговый характер антропогенных нарушений, здесь происходит активная деградация экосистем». В силу специфики и суровости природно-климатических условий арктические экосистемы, в том числе и водные, отличаются бедным видовым составом и «исключительной “чувствительностью” экосистем к различным антропогенным воздействиям» [1].

© Решетняк О. С., Коваленко А. А., 2023

Среди основных факторов, влияющих на современное состояние биоты и экосистем Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), выделяют природные и антропогенные. К природным факторам относятся [1]: глобальные и региональные изменения климата Арктики; трансформация климатических условий для наземной биоты, обусловленная изменениями циркуляции атмосферы и океанических течений; активные неотектонические процессы, приводящие в ряде случаев к современному поднятию суши и образованию новых участков для заселения биотой. К антропогенным факторам следует отнести: глобальное, региональное и локальное загрязнение среды; механическое нарушение почвенно-растительного покрова; разрушение растительного покрова в результате перевыпаса домашних оленей и нарушения традиционных норм и мест выпаса; браконьерство и нерегламентируемое исполь-

зование биоресурсов, снижающее их запасы, и др. Антропогенное освоение арктических территорий, безусловно, не было равномерным как во времени, так и в пространстве. Согласно «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года», намечено широкомасштабное хозяйственное освоение северных регионов, оборотной стороной которого будут резкое усиление антропогенного пресса на природную среду и в дальнейшем возможное серьезное ухудшение ее экологического состояния [3].

Все это обуславливает актуальность данного исследования, так как комплексное эколого-гидрохимическое районирование материковой части Арктической зоны России в контексте устойчивого развития региона позволит рационально планировать новые виды природопользования и реализовывать план мер, направленных на снижение социальных и экономических размеров ущерба в районах освоения ресурсов этого региона. Результаты комплексного экологического районирования Арктической зоны консолидируют разрозненную информацию отдельных исследований, описывающую состояние арктических экосистем по разным параметрам, и дают итоговую оценку экологического состояния территории, что может способствовать построению грамотной экологически обоснованной стратегии природопользования на территории АЗРФ в будущем.

Экологическое районирование — один из видов картографической оценки состояния природной среды в целях выявления путей и методов стабилизации и улучшения экологической обстановки на той или иной территории [4]. Иными словами, это процедура выделения иерархии элементарных участков с различной степенью интегрального изменения окружающей среды (состояния, состава и свойств ее компонентов) под воздействием природных и техногенных факторов.

Ранние работы по районированию территорий в России относятся к середине XX в. Первым составлять тематические карты и разрабатывать методологию районирования начал ученый и государственный деятель П. П. Семенов-Тян-Шанский [5]. Научные основы, заложенные в его работах, в дальнейшем были развиты учеными, создавшими отечественную школу экологического районирования территорий (Н. Н. Баранским, В. С. Тикуновым, В. И. Бланцуа, А. М. Трофимовым, В. Л. Каганским, Б. И. Кочуровым, Н. И. Коронкевичем, В. Е. Закруткиным и др.). Что касается АЗРФ, то в последние 20 лет исследованию экологических последствий освоения Арктики был посвящен обширный комплекс научно-исследовательских работ, особенно возросло число научных публикаций после Четвертого международного полярного года (2007—2008) и Года Арктики в России (2012), среди которых есть и работы по изучению эколого-гидрохимического режима арктических рек и оценке антропогенного воздействия на экосистемы [6—9]. Для оптимизации освоения северных и арктических территорий рассматриваются природные риски и безопасность хозяйствования с учетом природной специфики территории [10—13], рекомендуется установление «особого экологического режима для сохранения биоты и создания устойчивого развития Арктики» [1].

В практической деятельности используются различные варианты районирования в зависимости от целей и задач исследований. Так, известны два основных типа районирования — генетико-морфологическое (подразделяется на региональное, типологическое и смешанное) и оценочное. При первом типе на основе определенных критериев выделяют территориальные единицы разного порядка. При оценочном районировании в качестве классификационных признаков используются степень опасности процессов и явлений, степень благоприятности условий среды, степень пригодности территории для хозяйственной деятельности и др., а также стоимостные показатели [14].

Независимо от типа районирования сложны выбор классификационных признаков и определение степени их значимости. Чтобы избежать субъективности в решении этого вопроса, можно воспользоваться методом экспертных оценок.

В научных исследованиях применяются различные подходы к районированию: ландшафтно-гидрологическое районирование, учитывающее как генезис формирования водных объектов и особенностей функционирования их экосистем, так и воздействие на них антропогенных факторов [3]; мелкомасштабное районирование АЗРФ по степени антропогенной освоенности, выделение характерных типов освоения и присущих каждому из них спектров трансформации рельефа [15]; районирование территории арктического побережья по степени безопасности природопользования с учетом геоморфологических, гидрологических и социально-экономических признаков [2] и др.

При районировании различных территорий чаще всего используют методику балльной оценки, метод экспертных оценок или их сочетание. В случае использования только методики балльной оценки баллы присваиваются по различным показателям или критериям оценки состояния территории, объекта или экосистемы. При этом интегральная оценка экологического состояния территории по природным факторам (например, по показателям экологического потенциала ландшафтов и устойчивости экосистем) [22] представляет собой среднее арифметическое указанных показателей, а градация экологической обстановки может быть произведена на основе стандартной шкалы от наиболее благоприятной (1 балл) до неустойчивой (5 баллов).

Коллектив авторов под руководством Н. И. Алексеевского при комплексной оценке потенциальных рисков нарушения территории Арктической зоны

успешно применил оба метода [2]. Значимость тех или иных факторов, влияющих на степень безопасности природопользования в Арктике, определяли на основе экспертных оценок и балльной системы. «Вклад каждого фактора в дестабилизацию экологической и социально-экономической обстановки учитывается бо́льшим или меньшим баллом. Чем больше этот балл, тем значительнее роль этого фактора в нарушении геоэкологической безопасности территории» [2]. Итоговое районирование территории российской Арктики проводилось по набору признаков, критериев (демографический, промышленный, транспортный и экологический признаки), учитывающих уязвимость территории.

С позиций антропоцентричного подхода районирование Арктической зоны выполняется по комфортности условий жизни населения. Это по сути «комплексный показатель, складывающийся по ряду наиболее важных природно-климатических, экономико-географических, социально-экономических и медицинских признаков» [16].

Отдельное внимание ряд авторов уделяет изучению устойчивости экосистем арктического региона. Важно учитывать воздействие «речных, морских и геолого-литодинамических факторов» риска, влияющих на экологическое состояние территории и устойчивость экосистем. Так, к числу речных факторов отнесены такие параметры, как изменчивость стока воды, стока наносов, уровень загрязненности речных вод, тепловой сток и др. [2]. «Все биомы Арктики обладают средней и слабой устойчивостью к климатическим изменениям и сопутствующим им абиотическим факторам среды — вечной мерзлоте» [17], аналогичная закономерность характерна и для водных экосистем. В условиях изменения климата происходит трансформация химического состава воды арктических рек, что снижает устойчивость экосистем в целом [18].

Арктические экосистемы уязвимы к происходящим глобальным изменениям, а механизмы устойчивости арктического региона к факторам антропогенного воздействия не особенно развиты в отличие от южных регионов, где некоторые из действующих антропогенных факторов имеют природные аналоги. С другой стороны, слабые механизмы устойчивости обусловлены ограниченным набором биоты, долгим восстановлением после природных и антропогенных нарушений почв (из-за мерзлотного режима), непродолжительным периодом активного функционирования арктических экосистем в годовом цикле [1].

В данном исследовании проведено эколого-гидрохимическое районирование Арктической зоны России по таким показателям, как степень загрязненности воды, устойчивость химического состава воды рек, уровень антропогенной нагрузки на устьевые участки, а также выполнено комплексное районирование материковой части по степени экологической напряженности. Для оценки степени экологической напряженности арктической территории выбраны показатели, характеризующие состояние речных экосистем (качество воды, антропогенная нагрузка, устойчивость химического состава воды) и уровень демографической нагрузки (плотность населения).

Материалы и методы исследования

Информационной основой для проведения исследования и комплексного районирования материковой части АЗРФ стали многолетние (с 1980 по 2019 гг.) данные государственной системы наблюдений Росгидромета.

Объективность результатов наших исследований обусловлена использованием многолетней гидрологической и гидрохимической информации о реках арктического региона, которая была получена на основе единых методов отбора и анализа проб; широким охватом водных объектов на сети наблюдений; оптимизированными внутри- и межгодовыми сроками отбора проб, необходимыми для оценки временно́й изменчивости качества воды и состояния водных экосистем; достаточным набором показателей, определяемых при проведении наблюдений.

В качестве объектов исследования выбраны арктические участки 18 рек (23 пункта наблюдений), включенные в государственную систему наблюдений и имеющие наиболее полные и представительные ряды наблюдений за гидрологическим и гидрохимическим режимами, а также качеством воды.

Районирование материковой части АЗРФ по степени загрязненности воды проведено на основе комплексной оценки качества воды нижних и/или устьевых участков арктических рек с использованием интегрального комплексного показателя — удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) [19].

Районирование материковой части АЗРФ по устойчивости химического состава воды проведено на основе условной оценки устойчивости химического состава речных вод по методике, представленной в [20]. Суть этого подхода заключается в оценке устойчивости химического состава воды на основе балльной оценки границ модальных интервалов концентраций приоритетных химических веществ для конкретного участка реки. Оценивается кратность превышения ПДК по максимальным значениям модальных интервалов концентраций приоритетных загрязняющих веществ, выделенных за многолетний период. Относительная устойчивость химического состава оценивается в баллах и определяется как среднеарифметическое значение условных баллов по каждому компоненту (при более высоких превышениях ПДК балл выше). Соответственно чем ниже средний балл, тем выше устойчивость химического состава воды рек и тем более устойчивым будет состояние экосистемы в целом.

Градации устойчивости речных экосистем по изменчивости химического состава воды сопоставлены с градациями состояния, приведенными в реко-

Таблица 1. Шкала оценки степени устойчивости химического состава водной среды рек (по [20] с изменениями)

Средний балл	Характеристика степени устойчивости химического состава воды	Состояние экосистемы
От 1,0 до 1,5	Высокая устойчивость	Экологически благополучное
Свыше 1,5 до 2,0	Относительная устойчивость	Слабо нарушенное
Свыше 2,0 до 3,0	Слабая устойчивость	Переходное состояние
Свыше 3,0 до 4,0	Неустойчивое	Антропогенно нарушенное
Свыше 4,0 до 5,0	Крайне неустойчивое	Сильно нарушенное

мендациях Р 52.24.776-2012 [21], и представлены в табл. 1.

Районирование материковой части АЗРФ по уровню антропогенной нагрузки на устьевые участки проведено на основе оценки изменчивости модулей стока отдельных химических веществ [21]. Антропогенная нагрузка на устьевые области рек обуславливается в основном поступлением химических веществ со стоком рек. Оценку антропогенной нагрузки целесообразно проводить по модулю стока химических веществ в замыкающем створе, отражающем суммарный эффект речного переноса и трансформации химического стока по длине реки.

Согласно [21] оценка уровня антропогенной нагрузки на устьевые экосистемы рек проводится по максимальным значениям модуля стока легкоокисляемых органических веществ (по $БПК_5$ — биохимическому потреблению кислорода за пять суток), азота аммонийного и нефтепродуктов. Использование модуля химического стока (отношения среднегодового объема химического стока к площади водосбора) позволяет не только оценивать антропогенную нагрузку, но и сравнивать химический сток рек с различными объемами водного стока и площадями водосбора.

Комплексное районирование материковой части АЗРФ проведено по степени экологической напряженности территории с учетом трех положений [22]:

- критерии (показатели) степени экологической напряженности должны быть типичными для всех частей Арктической зоны независимо от их географического положения и отражать эффект воздействия неблагоприятных экологических факторов;
- все этапы районирования материковой части АЗРФ проводятся на основе единой балльной оценки;
- при прочих равных условиях более напряженным в экологическом отношении будет считаться тот речной участок, где отмечается более высокая плотность населения.

Для оценки степени экологической напряженности арктической территории России выбраны показатели, характеризующие состояние речных экосистем (качество воды, антропогенная нагрузка, устойчивость химического состава воды) и демографическую нагрузку на территорию (плотность населения). По трем показателям, характеризующим гидрохимическое состояние речных экосистем, необходимо провести обобщенную оценку, которая характеризует устойчивость речных экосистем АЗРФ и экологическое состояние прилегающей территории (устьевого или нижнего участка реки, устьевую область и т. п.).

Критерии обобщенной балльной оценки показателей, характеризующих состояние речных экосистем, приведены в табл. 2. Рассчитывается средний балл по устойчивости экосистемы $Б_1$, и участку реки может быть присвоена определенная оценка состояния по аналогии со шкалой табл. 1.

Проведенная таким образом обобщенная оценка экологического состояния речной экосистемы и прилегающей территории (устьевого или нижнего участка реки, устьевой области и т. п.) в пределах Арктической зоны России является предварительной, так как не позволяет в полной мере судить о степени опасности той или иной экологической обстановки, поскольку не учитывает численность населения, подвергающегося воздействию неблагоприятных экологических факторов. Поэтому далее оценка степени экологической напряженности территории проводится с учетом приоритетности антропоцентрического подхода, т. е. с использованием показателя демографической нагрузки — плотности населения.

Для исследуемой материковой части АЗРФ плотность населения по субъектам Федерации варьирует в широком диапазоне от 0,04 чел./км^2 в Республике Саха (Якутия) до 5,23 чел./км^2 в Мурманской области [23]. Плотность населения по городским округам, поселениям, районам или улусам также существенно варьирует: от 0,03 чел./км^2 в районе поселка Чокурдах (Аллаиховский улус) до 565,8 чел./км^2 в городском округе Нарьян-Мар, где на площади всего 45,13 км^2 проживают 25 536 человек (по данным на начало 2021 г.).

В среднем по разным источникам средняя плотность расселения населения для Арктической зоны России составляет 0,60—0,64 чел./км^2. С учетом этого значения данные ранжированы и разделены на пять диапазонов (пять градаций

Таблица 2. Критерии обобщенной балльной оценки состояния речной экосистемы с учетом эколого-гидрохимических показателей

Признак (показатель)	Значение	Обобщенная оценка состояния, баллов
Качество воды (класс качества воды)	1-й класс качества	1
	2-й класс качества	2
	3-й класс качества	3
	4-й класс качества	4
	5-й класс качества	5
Антропогенная нагрузка по химическому стоку (обобщенная)	Малая	1
	Умеренная	2
	Критическая	3
	Высокая	4
	Очень высокая	5
Устойчивость химического состава воды	Устойчивое	1
	Относительно устойчивое	2
	Переходное	3
	Неустойчивое	4
	Крайне неустойчивое	5

Таблица 3. Шкала плотности населения для комплексной оценки степени экологической напряженности АЗРФ

Уровень плотности населения	Интервал плотности населения, чел./км²	Оценка плотности населения, баллов
Очень низкий	Менее 0,60	1
Низкий	0,61—2,00	2
Средний	2,01—3,40	3
Высокий	3,41—4,60	4
Очень высокий	Свыше 4,60	5

уровня плотности населения для исследуемой территории), каждый из которых получил соответствующее количество баллов от 1 до 5 (табл. 3).

Итоговая оценка степени экологической напряженности $Б_и$ исследуемых участков арктических рек производится по формуле [22]

$$Б_и = \sqrt{Б_1 Б_2},$$

где $Б_1$ — предварительная балльная оценка экологической ситуации на участке реки; $Б_2$ — балльная оценка плотности населения на данном участке реки.

Округленные до целых чисел результаты (итоговые баллы) позволяют оценить степень экологической напряженности территории по следующей градации [22]: относительно удовлетворительная — 1 балл, напряженная — 2, критическая — 3, кризисная — 4, катастрофическая — 5 баллов.

Результаты и обсуждение

Районирование материковой части АЗРФ по степени загрязненности воды устьевых участков арктических рек

Комплексная оценка степени загрязненности и качества воды арктических рек проводится ежегодно, данные помещаются в отдельной главе «Ежегодника качества поверхностных вод Российской Федерации». При районировании материковой части Арктической зоны можно использовать данные за конкретный год или обобщенные за определенные периоды. На сайте Гидрохимического института в рамках ГИС-проекта «Реки Арктической зоны РФ» представлены результаты районирования материковой части по степени загрязненности воды арктических рек с 2017 по 2019 гг. [24].

В последние годы качество воды рек европейской части АЗРФ меняется в границах 3-го (загрязненная и очень загрязненная вода) и 4-го (грязная и очень грязная вода) классов качества, западно-сибирской части — 4-го и 5-го классов качества (грязная и очень грязная и экстремально грязная вода соответственно), а в восточно-сибирской части варьирует в основном в градации 3-го класса качества [25].

Наиболее загрязненные участки рек, степень загрязненности которых стабильно соответствует 4-му классу качества — «грязная» и «очень грязная», расположены в западно-сибирской части АЗРФ. Это участки рек Обь и Полуй в районе Салехарда, а также Пура (поселок Самбург и поселок городского типа Уренгой). Наиболее благополучная ситуа-

ция наблюдается на реках Кольского полуострова и Карелии.

Районирование материковой части АЗРФ по устойчивости химического состава воды на устьевых участках арктических рек

Различные природные факторы формирования химического состава и качества воды рек, неравномерность освоенности территории и уровня антропогенной нагрузки предопределяют различную устойчивость речных экосистем. Наиболее отчетливо это проявляется в изменении модальных интервалов значений концентраций химических веществ (т. е. наиболее часто встречаемых значений). Значения концентраций химических веществ внутри модальных интервалов характеризуют реальное их содержание в водной среде за многолетний период. Значения границ модального интервала концентраций можно рассматривать как «антропогенно измененный природный фон» для участка реки или водосбора в целом [26].

Для отдельных участков рек материковой части АЗРФ рассчитаны модальные интервалы значений концентраций приоритетных химических веществ за многолетний период (с 2000 по 2019 гг.). Как показано ранее, для уязвимых водных экосистем Арктики таковыми являются органические вещества (по показателю БПК$_5$), фенолы, нефтепродукты, соединения азота аммонийного и азота нитритного, соединения железа, меди и цинка [6; 9]. По кратности превышения ПДК верхней границей модального интервала для данных веществ определен средний балл, по которому с использованием критериев, представленных в табл. 1, проведена оценка состояния экосистем арктических рек по устойчивости химического состава воды (табл. 4).

Условная балльная оценка состояния экосистем рек по устойчивости химического состава воды показала, что большинство (70,4%) речных участков АЗРФ функционирует при относительной устойчивости химического состава воды и в целом их состояние можно оценить как слабо нарушенное.

Таблица 4. Состояние речных экосистем материковой части АЗРФ по устойчивости химического состава воды

Река, пункт наблюдений	Средний балл	Состояние экосистемы по степени устойчивости химического состава воды
Европейская часть		
Адзьва, деревня Харута	1,50	Относительная устойчивость (слабо нарушенное)
Кола, поселок Выходной	1,38	Высокая устойчивость (экологически благополучное)
Кола, устье	1,50	Относительная устойчивость (слабо нарушенное)
Колва, Хорей-Вер	1,88	
Лотта, устье	1,38	Высокая устойчивость (экологически благополучное)
Печенга, поселок Корзуново	1,63	Относительная устойчивость (слабо нарушенное)
Печенга, станция Печенга	1,63	
Печора, выше Нарьян-Мара	1,88	Относительная устойчивость (слабо нарушенное)
Печора, ниже Нарьян-Мара	1,86	
Сула, деревня Коткино	1,75	Относительная устойчивость (слабо нарушенное)
Ура, село Ура-Губа	1,50	
Уса, поселок Усть-Уса	2,00	
Западно-сибирская часть		
Енисей, выше Игарки	2,00	Относительная устойчивость (слабо нарушенное)
Енисей, ниже Игарки	1,88	
Обь, к западу от Салехарда	2,13	Слабая устойчивость (переходное состояние)
Обь, ниже Салехарда	2,38	
Пур, поселок Самбург	2,71	Слабая устойчивость (переходное состояние)
Таз, поселок Красносельпуп	2,38	

Окончание табл. 4

Река, пункт наблюдений	Средний балл	Состояние экосистемы по степени устойчивости химического состава воды
Восточно-сибирская часть		
Анабар, село Саксылах	1,88	Относительная устойчивость (слабо нарушенное)
Колыма, выше Среднеколымска	2,00	Относительная устойчивость (слабо нарушенное)
Колыма, ниже Среднеколымска	1,50	
Колыма, село Колымское	1,38	Высокая устойчивость (экологически благополучное)
Колыма, поселок Черский	1,29	Высокая устойчивость (экологически благополучное)
Лена, село село Кюсюр	1,63	Относительная устойчивость (слабо нарушенное)
Лена, полярная станция Хабарова	1,63	
Индигирка, поселок Чокурдах	1,75	Относительная устойчивость (слабо нарушенное)
Яна, станция Юбилейная	1,88	

Наиболее благоприятная ситуация наблюдается в европейской и восточно-сибирской частях АЗРФ, где на устьевых участках Колы, Лотты и Колымы отмечается экологическое благополучие с точки зрения устойчивости химического состава речных вод (см. табл. 4). И только в наиболее освоенном реги-

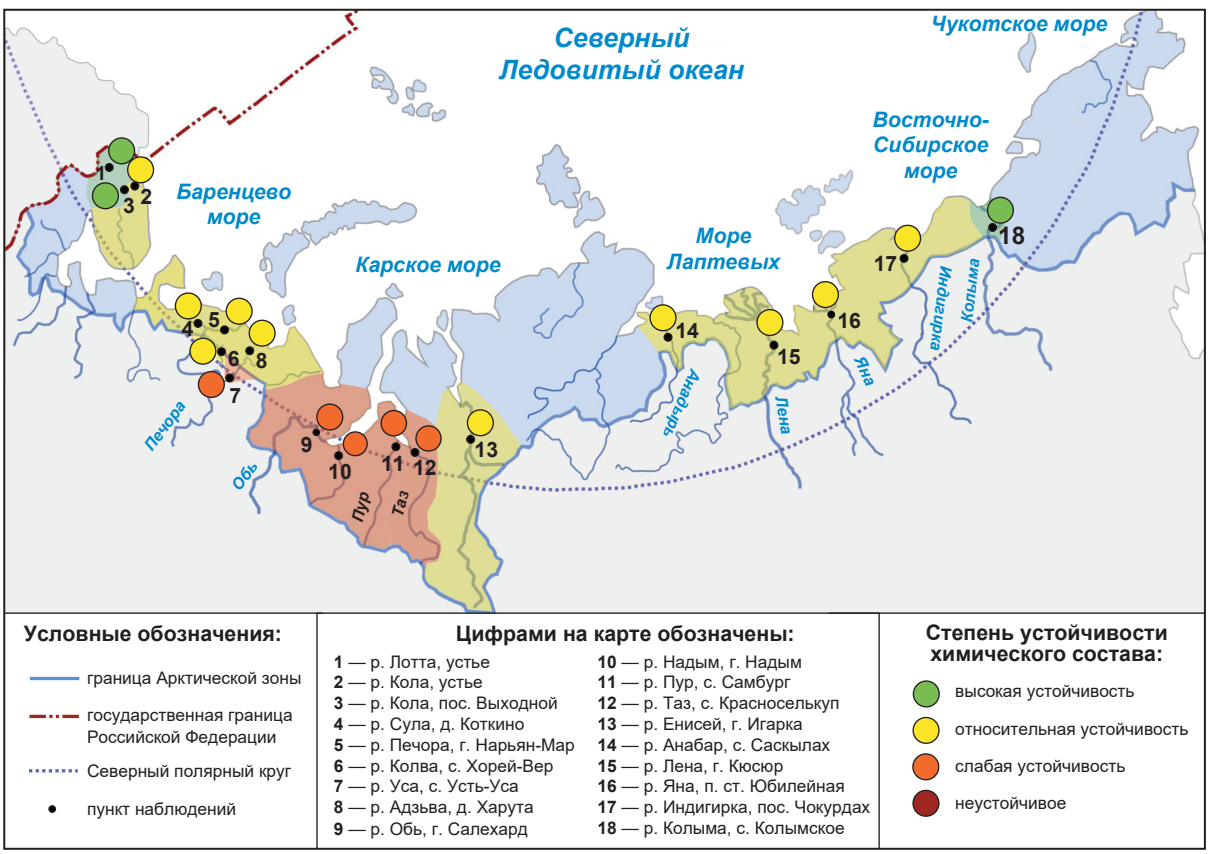

Рис. 1. Схематичное районирование материковой части АЗРФ по устойчивости химического состава речных вод. Составлено авторами

Fig. 1. Schematic zoning of the mainland part of the Russian Arctic zone according to the stability of the chemical composition of the river waters. Compiled by the authors

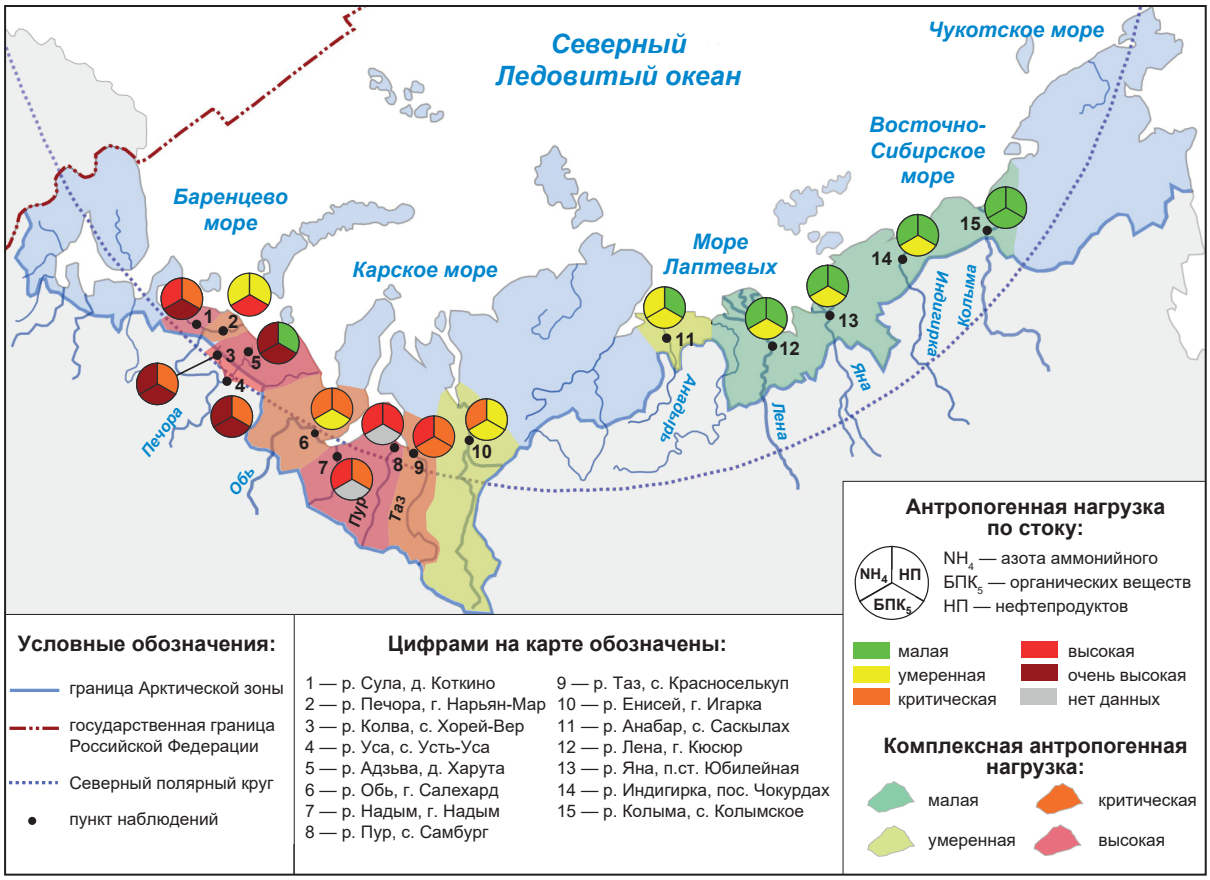

Рис. 2. Схематичное районирование материковой части АЗРФ по уровню антропогенной нагрузки [27]
Fig. 2. Schematic zoning of the mainland part of the Russian Arctic zone according to the anthropogenic load level [27]

оне Арктической зоны — в Западной Сибири большинство исследованных участков рек находятся в переходном состоянии (со слабой устойчивостью химического состава речных вод) из-за повышенной антропогенной нагрузки на экосистемы рек.

Результаты оценки состояния речных экосистем Арктической зоны по устойчивости химического состава воды стали основой для ее районирования по данному показателю и представлены на рис. 1 для отдельных участков рек.

Районирование материковой части АЗРФ по уровню антропогенной нагрузки на устьевые участки арктических рек

Исследования химического стока рек и оценка антропогенной нагрузки, обусловленной речным стоком, важны не только на региональном уровне, но и в глобальном масштабе. «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» [27].

Проведенный ранее сравнительный анализ уровня антропогенной нагрузки по модулям стока азота аммонийного, органических веществ и нефтепродуктов для замыкающих створов крупных арктических рек показал, что «наименьшую суммарную антропогенную нагрузку (“малую” или “умеренную”) испытывают устьевые участки рек Восточной Сибири, а более значительная антропогенная нагрузка (“высокая” или “очень высокая”) характерна для устьев рек бассейна Печоры и рек Западной Сибири (в силу большей освоенности территории и соответственно более высокой техногенной нагрузки). С 2000 по 2018 гг. уровень нагрузки снизился для большинства рек» [27]. Результаты оценки антропогенной нагрузки на устьевые участки рек Арктической зоны и районирование материковой части представлены на рис. 2. Шкала оценки антропогенной нагрузки включает пять градаций (на картосхеме они выделены цветом): малая, умеренная, критическая, высокая и очень высокая. В отдельных случаях нагрузка может быть переходной из одной градации в другую.

Результаты районирования также представлены на сайте Гидрохимического института в виде веб-приложения, созданного с использованием ArcGIS Instant Apps и состоящего из набора карт, которые представляют сведения о реках АЗРФ [24].

Таблица 5. Сводная таблица баллов для комплексной оценки эколого-гидрохимического состояния речных экосистем и степени экологической напряженности АЗРФ

Река, пункт наблюдений	Показатели эколого-гидрохимического состояния речных экосистем			Средний балл $Б_1$	Балл по плотности населения $Б_2$	Итоговый балл $Б_и$
	Устойчивость химического состава воды	Антропогенная нагрузка	Качество воды			
Европейская часть						
Адзьва, деревня Харута	2	5	3	3	1	1,73
Кола, Кола	1	1,7	2,7	2	2	2,00
Колва, Хорей-Вер	2	3,3	3	3	1	1,73
Лотта, устье	1	1,7	2	2	2	2,00
Печенга, станция Печенга	2	1,3	3,3	2	4	2,83
Печора, Нарьян-Мар	2	2,7	3	3	5	3,87
Сула, деревня Коткино	2	4	4	3	1	1,73
Ура, село Ура-Губа	2	2,5	2	2	2	2,00
Уса, поселок Усть-Уса	2	4,3	3,7	3	2	2,45
Западно-сибирская часть						
Енисей, Игарка	2	2	3	2	5	3,16
Обь, Салехард	3	2,7	4	3	5	3,87
Пур, поселок Самбург	3	4	4	4	1	2,00
Таз, поселок Красносселькуп	3	3,3	4	3	1	1,73
Восточно-сибирская часть						
Анабар, село Саксылах	2	2,7	3	3	1	1,73
Колыма, село Колымское	1	1	3	2	1	1,41
Лена, село Кюсюр	2	1,3	3	2	1	1,41
Индигирка, поселок Чокурдах	2	1,3	3	2	1	1,41
Яна, станция Юбилейная	2	1,3	3	2	1	1,41

Комплексное районирование материковой части АЗРФ по степени экологической напряженности территории

Территория материковой части АЗРФ неоднородна как по природно-климатическим условиям и комфортности проживания, так и по уровню социально-экономического развития и плотности размещения промышленных объектов. Именно по этим факторам чаще всего проводится природохозяйственное районирование Арктической зоны. В данном исследовании выполнено комплексное районирование материковой части Арктической зоны по степени экологической напряженности, которая рассмотрена через показатели, характеризующие эколого-гидрохимическое состояние речных экосистем (качество воды, антропогенная нагрузка, устойчивость химического состава воды) и демографическую нагрузку на территорию.

Использована методика балльной оценки. В табл. 5 даны промежуточные и средний баллы (для каждого показателя), а также итоговый балл для каждого исследуемого участка реки, по которому выполнена оценка степени экологической напряженности территории (устьевой области, устьевого участка и т. п.). Итоговые баллы варьируют от 1,41 до 3,87, и после округления данных получено,

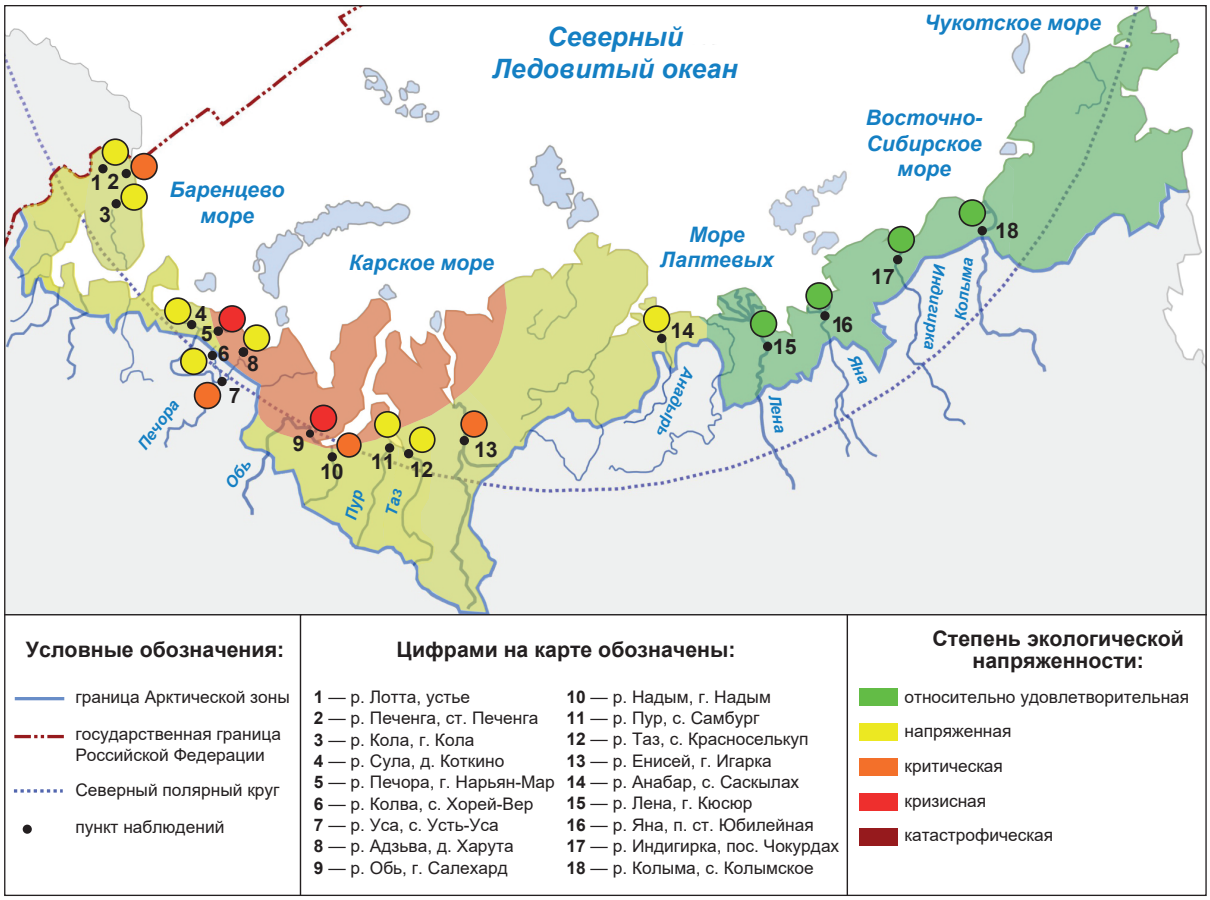

Рис. 3. Схематичное комплексное районирование материковой части АЗРФ по степени экологической напряженности. Составлено авторами
Fig. 3. Schematic complex zoning of the mainland part of the Russian Arctic zone according to the environmental tension degree. Compiled by the authors

что степень экологической напряженности территории соответствует изменению экологической обстановки от напряженной (2 балла) до кризисной (4 балла).

Результаты балльной оценки и районирования материковой части АЗРФ представлены на рис. 3. В европейской части Арктической зоны экологическая ситуация характеризуется как напряженная для большинства устьевых участков кроме рек Печенга (станция Печенга) и Уса (поселок Усть-Уса), где ситуация относится к категории «критическая», и реки Печора (Нарьян-Мар) — «кризисная». В пределах сибирской части Арктической зоны степень экологической напряженности характеризуется как:

- относительно удовлетворительная для всех устьевых участков рек восточно-сибирской части (кроме Анабара);
- напряженная для устьевых участков Пура, Таза в западной части и Анабара в восточной части Сибири;
- критическая для устьевых участков Енисея (Игарка) и кризисная для Оби (Салехард).

Таким образом, степень экологической напряженности на нижних участках рек АЗРФ чаще всего оценивается как напряженная (50% участков рек) или относительно удовлетворительная (22% речных участков).

Заключение

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Качество воды рек европейской и восточно-сибирской частей АЗРФ достаточно стабильно и соответствует 3-му классу качества. Наиболее загрязненными являются участки рек в западно-сибирской части Арктической зоны, качество воды в них соответствует 4-му классу качества (грязная и очень грязная вода).

Большинство устьевых экосистем арктических рек России функционирует в условиях относительной устойчивости химического состава воды, и в целом их состояние можно оценить как слабо нарушенное. Нарушение устойчивости речных экосистем связано с увеличением степени освоенности территории и ростом антропогенного воздействия на устьевых

участках рек, что проявляется на примере рек Западной Сибири.

На основе комплексной эколого-гидрохимической оценки выполнено районирование материковой части АЗРФ по степени экологической напряженности. В целом для большинства исследуемых речных экосистем экологическое состояние по степени экологической напряженности оценивается как относительно удовлетворительное (в 22% случаев) или напряженное (для 50% участков рек).

Результаты исследования могут быть в дальнейшем использованы при решении таких актуальных задач, как прогноз качества воды арктических рек и прибрежных акваторий в условиях происходящих климатических вариаций, разработка региональных критериев оценки качества воды и состояния водных экосистем, выявление трендов изменения химического состава речных вод и разработка экологически обоснованных водоохранных мероприятий, направленных на сохранение и восстановление уязвимых речных экосистем арктического региона.

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

Литература

1. *Тишков А. А.* «Арктический вектор» в сохранении наземных экосистем и биоразнообразия // Арктика: экология и экономика. — 2012. — № 2 (6). — С. 28-43.
2. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / Под ред. Н. И. Алексеевского. — М.: ГЕОС, 2007. — 585 с.
3. *Румянцев В. А., Измайлова А. В.* Районирование Арктической зоны РФ как основа разработки системы наблюдений за пресными водами // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2022. — Т. 68, № 2. — С. 173—190.
4. Гражданская защита: Энциклопедический словарь / Изд. 3-е, перераб. и доп.; под общей ред. В. А. Пучкова; МЧС России. — М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. — 664 с.
5. *Коробов В. Б., Кочуров Б. И., Тутыгин А. Г.* Методология районирования сложных географо-экологических объектов экспертно-статистическими методами // Проблемы регион. экологии. — 2020. — № 5. — С. 42—48. — DOI: 10.24412/1728-323X-2020-5-42-48.
6. *Никаноров А. М., Иванов В. В., Брызгало В. А.* Реки Российской Арктики в современных условиях антропогенного воздействия. — Ростов н/Д: НОК, 2007. — 280 с.
7. *Никаноров А. М., Брызгало В. А., Решетняк О. С.* Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций. — Ростов н/Д: НОК, 2012. — 310 с.
8. *Никаноров А. М., Решетняк О. С., Брызгало В. А. и др.* Экологически допустимые уровни воздействия на речные экосистемы Арктического региона // Метеорология и гидрология. — 2013. — № 3. — С. 85—93.
9. *Никаноров А. М., Брызгало В. А., Косменко Л. С. и др.* Реки материковой части Российской Арктики. — Ростов н/Д: Изд-во Юж. федер. ун-та, 2016. — 276 с.
10. *Дмитриев В. Г.* Полуэмпирический метод оценки экологического риска шельфовой и прибрежной Арктической зоны для ключевых арктических районов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2013. — № 4. — С. 96—103.
11. *Кожухов И. В., Фирсов Ю. Г., Гордиенко Н. Ю.* Северный регион Российской Федерации как зона экологического риска и новый технологический этап освоения Арктики // Эксплуатация мор. трансп. — 2013. — № 2. — С. 73—78.
12. *Большагин А. Ю., Вялышев А. И., Добров В. М. и др.* Комплексный мониторинг — неотъемлемая часть безопасности Арктической зоны Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 1. — С. 48—37.
13. *Кочуров Б. И., Зотова Л. И., Тумель Н. В.* Экодиагностика опасных геоэкологических ситуаций при хозяйственном освоении криолитозоны // Проблемы регион. экологии. — 2015. — № 4. — С. 157—164.
14. *Чернышов В. И.* Системные основы экологического менеджмента: учебное пособие. — М.: Изд-во РУДН, 2001. — 341 с.
15. *Бредихин А. В., Еременко Е. А., Харченко С. В. и др.* Районирование Российской Арктики по типам антропогенного освоения и сопутствующей трансформации рельефа на основе кластерного анализа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2020. — № 1. — С. 42—56.
16. *Селин В. С., Вышинская Ю. В.* Нормативное регулирование и комплексное природохозяйственное районирование Севера и Арктики // Труды Кар. науч. центра РАН. — 2013. — № 5. — С. 31—39.
17. *Тихонова Т. В.* Устойчивость природной среды Печоро-Уральской Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2012.— № 4 (8). — С. 16—25.
18. *Решетняк В. Н., Решетняк О. С.* Устойчивость речных экосистем Западно-Сибирской части Арктики на основе трендов содержания химических веществ // Региональные проблемы развития Дальнего Востока России и Арктики: Тезисы докладов I Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции, посвященной памяти камчатского ученого Р. С. Моисеева. — Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2019. — С. 64—67.
19. РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. — СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. — 49 с.

20. *Брызгало В. А., Никаноров А. М., Косменко Л. С. и др.* Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние. — Ростов н/Д: Изд-во Южного федер. ун-та, 2015. —164 с.
21. Р 52.24.776-2012. Рекомендации. Оценка антропогенной нагрузки и риска воздействия на устьевые области рек с учетом их региональных особенностей. — Ростов н/Д: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2012. — 32 с.
22. Экологический атлас Ростовской области / Под ред. В. Е. Закруткина. — Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. — 120 с.
23. *Фаузер В. В., Смирнов А. В.* Мировая Арктика: природные ресурсы, расселение населения, экономика // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 3 (31) — С. 6—22.
24. Реки Арктической зоны РФ: ГИС ресурсы / Гидрохим. ин-т. — URL: https://gidrohim.com/node/71.
25. *Решетняк О. С., Косменко Л. С., Даниленко А. О. и др.* Реки Арктической зоны Российской Федерации: многолетние тенденции качества и степени загрязненности речных вод // Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». — СПб.: Химиздат, 2019. — С. 735—738.
26. *Никаноров А. М., Брызгало В. А., Черногаева Г. М.* Антропогенно-измененный природный фон и его формирование в пресноводных экосистемах России // Метеорология и гидрология. — 2007. — № 11. — С. 62—79.
27. *Решетняк О. С., Косменко Л. С., Коваленко А. А.* Антропогенная нагрузка по модулю химического стока и качество воды на замыкающих створах рек арктической зоны России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2022. — № 3. — С. 3—17.

Информация об авторах

Решетняк Ольга Сергеевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Гидрохимический институт Росгидромета (344090, Россия, Ростов-на-Дону, просп. Стачки, д. 198), доцент, Южный федеральный университет (344006, Россия, Ростов-на-Дону, Б. Садовая ул., д. 105/42), e-mail: olgare1@mail.ru.

Коваленко Арина Андреевна, лаборант-исследователь, Гидрохимический институт Росгидромета (344090, Россия, Ростов-на-Дону, просп. Стачки, д. 198), аспирант, Южный федеральный университет (344006, Россия, Ростов-на-Дону, Б. Садовая ул., д. 105/42), e-mail: arinaa.kov@gmail.com.

Библиографическое описание данной статьи

Решетняк О. С., Коваленко А. А. Комплексное эколого-гидрохимическое районирование материковой части Арктической зоны России в контексте устойчивого развития региона // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 2. — С. 234—247. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-234-247.

COMPREHENSIVE ECOLOGICAL AND HYDROCHEMICAL ZONING OF THE MAINLAND PART OF THE RUSSIAN ARCTIC ZONE IN THE CONTEXT OF THE REGION SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Reshetnyak, O. S., Kovalenko, A. A.
Hydrochemical Institute of the Rosgidromet, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

The article was received October 11, 2022

Abstract

The authors consider the main methodological approaches developed in Russia to the ecological zoning of the Arctic territory. This is important in the context of implementing the concept of the territory sustainable development. The authors propose to implement an approach of the comprehensive zoning of the mainland part of the Arctic zone according to the environmental stress degree of the territory. To implement this, the authors chose indicators that characterize the water ecosystems condition and the demographic load level.

The water quality of the rivers in the European part of the Russia Arctic zone belongs to the 3rd and 4th quality classes, of the rivers in the West Siberian part — to the 4th and 5th classes and of the rivers in the East Siberian part — to the 3rd quality class. The researchers have carried out a conditional scoring of the state of river ecosystems according to the water chemical composition stability. It has proved that most stretches of the Arctic rivers function under conditions of relative stability of the water chemical composition (characterized as "slightly disturbed"). The anthropogenic load level has been evaluated according to the modules of the chemical runoff of ammonium nitrogen, organic substances and oil products. The evaluation has shown that the anthropogenic load is characterized as "low" or "moderate" for the rivers of Eastern Siberia and "high" and "very high" for the river mouths of the Pechora basin and the rivers of Western Siberia.

The authors have implemented a comprehensive zoning of the Russian Arctic zone according to the environmental stress degree. The map shows that most of the river ecosystems in the Arctic zone are in a "relatively satisfactory" or "stressed" condition.

The results are of great importance and will be useful for predicting water quality and developing environmentally sound water protection measures aimed at preserving and restoring vulnerable river ecosystems in the Arctic region.

Keywords: *ecological zoning, Arctic Zone, water quality, anthropogenic load, water chemistry stability, environmental stress degree.*

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 18-05-60165.

References

1. *Tishkov A. A.* "The Arctic Vector" in Conservation of Terrestrial Ecosystems and Biodiversity. Arctic: Ecology and Economy, 2012, no. 2, pp. 28—43. (In Russian).
2. Geoecological condition of the Arctic coast of Russia and environmental safety. Ed. by N. I. Alekseevsky. Moscow, GEOS, 2007, 585 p. (In Russian).
3. *Rumyantsev V. A., Izmailova A. V.* Zoning of the Arctic zone of the Russian Federation as the basis for the development of a system of freshwater observations. Problemy Arktiki i Antarktiki, 2022, vol. 68, no. 2, pp. 173—190. (In Russian).
4. Civil Protection: Encyclopedic Dictionary. Ed. by V. A. Puchkov. Moscow, FGBU VNII GOChS (FTs), 2015, 664 p. (In Russian).
5. *Korobov V. B., Kochurov B. I., Tutygin A. G.* Methodology of zoning of complex geographical and ecological objects by expert statistical methods. Problemy regional'noi ekologii, 2020, no. 5, pp. 42—48. DOI: 10.24412/1728-323X-2020-5-42-48. (In Russian).
6. *Nikanorov A. M., Ivanov V. V., Bryzgalo V. A.* Rivers of the Russian Arctic in modern conditions of anthropogenic impact. Rostov-na-Donu, NOK, 2007, 280 p. (In Russian).
7. *Nikanorov A. M., Bryzgalo V. A., Reshetnyak O. S.* Rivers of Russia in emergency environmental situations. Rostov-na-Donu, NOK, 2012, 310 p. (In Russian).
8. *Nikanorov A. M., Reshetnyak O. S., Bryzgalo V. A. et al.* Environmentally acceptable levels of impact on river ecosystems in the Arctic region. Meteorologiya i gidrologiya, 2013, no. 3, pp. 85—93. (In Russian).
9. *Nikanorov A. M., Bryzgalo V. A., Kosmenko L. S. et al.* Rivers of the mainland of the Russian Arctic. Rostov-na-Donu, Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2016, 276 p. (In Russian).
10. *Dmitriev V. G.* Semi-empirical method for assessing the environmental risk of the shelf and coastal Arctic zone for key Arctic regions. Problemy Arktiki i Antarktiki, 2013, no. 4, pp. 96—103. (In Russian).
11. *Kozhukhov I. V., Firsov Yu. G. Gordienko N. Yu.* The Northern Region of the Russian Federation as an environmental Risk Zone and a new technological stage

of Arctic development. Ekspluatatsiya morskogo transporta, 2013, no. 2, pp. 73—78. (In Russian).
12. *Bol'shagin A. Yu., Vyalyshev A. I., Dobrov V. M. et al.* Integrated monitoring is an integral part of the security of the Arctic zone of the Russian Federation. Arctic: Ecology and Economy, 2014, no. 1, pp. 48—37. (In Russian).
13. *Kochurov B. I., Zotova L. I., Tumel' N. V.* Ecodiagnostics of dangerous geoecological situations in the economic development of the cryolithozone. Problemy regional'noi ekologii, 2015, no. 4, pp. 157—164. (In Russian).
14. *Chernyshov V. I.* System fundamentals of environmental management: textbook. Moscow, Izd-vo RUDN, 2001, 341 p. (In Russian).
15. *Bredikhin A. V., Eremenko E. A., Kharchenko S. V. et al.* Zoning of the Russian Arctic by types of anthropogenic development and associated relief transformation based on cluster analysis. Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya, 2020, no. 1, pp. 42—56. (In Russian).
16. *Selin V. S., Vyshinskaya Yu. V.* Regulatory regulation and integrated natural and economic zoning of the North and the Arctic. Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAS, 2013, no. 5, pp. 31—39. (In Russian).
17. *Tikhonova T. V.* Sustainability of the natural environment of the Pechora-Ural Arctic. Arctic: Ecology and Economy, 2012, no. 4 (8), pp. 16—25. (In Russian).
18. *Reshetnyak V. N., Reshetnyak O. S.* Stability of river ecosystems of the West Siberian part of the Arctic based on trends in the content of chemicals. Regional'nye problemy razvitiya Dal'nego Vostoka Rossii i Arktiki. Tezisy dokladov I Natsional'noi (Vserossiiskoi) nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati kamchatskogo uchenogo R. S. Moiseeva. Petropavlovsk-Kamchatskii, Kamchatpress, 2019, pp. 64—67. (In Russian).
19. RD 52.24.643-2002. Methodical instructions. The method of complex assessment of the degree of contamination of surface waters of the land by hydrochemical indicators. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2003, 49 p. (In Russian).
20. *Bryzgalo V. A., Nikanorov A. M., Kosmenko L. S. et al.* Estuarine ecosystems of large rivers of Russia: anthropogenic load and ecological condition. Rostov-na-Donu, Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2015, 164 p. (In Russian).
21. R 52.24.776-2012. Recommendations. Assessment of anthropogenic load and risk of impact on estuaries of rivers, taking into account their regional characteristics. Rostov-na-Donu, Rosgidromet, FSBI "GKhI", 2012, 32 p. (In Russian).
22. Ecological Atlas of the Rostov region. Ed by V. E. Zakrutkin. Rostov-na-Donu, Izd-vo SKNTs VSh, 2000, 120 p. (In Russian).
23. *Fauzer V. V., Smirnov A. V.* The World Arctic: natural resources, population settlement, economy. Arctic: Ecology and Economy, 2018, no. 3 (31), pp. 6—22. (In Russian).
24. Rivers of the Arctic zone of the Russian Federation: GIS resources. Gidrokhimicheskii institute. Available at: https://gidrohim.com/node/71.
25. *Reshetnyak O. S., Kosmenko L. S., Danilenko A. O. et al.* Rivers of the Arctic zone of the Russian Federation: long-term trends in the quality and degree of pollution of river waters. Trudy III Vserossiiskoi konferentsii "Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya". St. Petersburg, Khimizdat, 2019, pp. 735—738. (In Russian).
26. *Nikanorov A. M., Bryzgalo V. A., Chernogaeva G. M.* Anthropogenic-altered natural background and its formation in freshwater ecosystems of Russia. Meteorologiya i gidrologiya, 2007, no. 11. pp. 62—79. (In Russian).
27. *Reshetnyak O. S., Kosmenko L. S., Kovalenko A. A.* Anthropogenic load in terms of chemical runoff and water quality at the outlets of the rivers of the Arctic zone of Russia. Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya, 2022, no. 3, pp. 3—17. (In Russian).

Information about the authors

Reshetnyak, Olga Sergeevna, PhD of Geography, Senior Researcher, Hydrochemical Institute (198, Stachki Ave., Rostov-on-Don, Russia, 344090), Associate Professor, Southern Federal University (105/42, B. Sadovaya St., Rostov-on-Don, Russia, 344006), e-mail: olgare1@mail.ru.

Kovalenko, Arina Andreevna, Research Laboratory Assistant, Hydrochemical Institute (198, Stachki Ave., Rostov-on-Don, Russia, 344090), Postgraduate, Southern Federal University (105/42, B. Sadovaya St., Rostov-on-Don, Russia, 344006), e-mail: arinaa.kov@gmail.com.

Bibliographic description of the article

Reshetnyak, O. S., Kovalenko, A. A. Comprehensive ecological and hydrochemical zoning of the mainland part of the Russian Arctic zone in the context of the region sustainable development. Arctic: Ecology and Economy, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 234—247. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-234-247. (In Russian).

© Reshetnyak O. S., Kovalenko A. A., 2023