

РАЗВИТИЕ ИДЕЙ В.И. ВЕРНАДСКОГО О ПРИРОДНЫХ ВОДАХ: БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И КАЧЕСТВО ВОД

© 2023 г. Т. И. Моисеенко*

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

**e-mail: moiseenko.ti@gmail.com*

Поступила в редакцию 02.03.2023 г.

После доработки 17.04.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

В статье рассматривается влияние возрастающих антропогенных нагрузок на воды суши. Дается анализ работ В.И. Вернадского о природных водах и подчеркнуто их значение в оценке современных биогеохимических процессов. Показаны масштабы поступления химических элементов и веществ в современную биосферу в результате эмиссии парниковых газов, рассеивания азота и фосфора, кислотообразующих газов, а также металлов. Отмечены ключевые изменения, охватывающие регионы и биосферу в целом. Приведены примеры последствий развития антропогенно-индуцированных процессов в водах суши на примере одного из удаленных регионов арктической зоны — Кольского Севера России: влияние потепления климата, закисления, эвтрофирования и обогащения вод металлами. В рамках концепции В.И. Вернадского о роли вод суши в жизнеобеспечении населения Планеты отражены подходы к оценке качества вод с позиций экологической парадигмы.

Ключевые слова: В.И. Вернадский, природные воды, биосфера, гидросфера, потепление климата, закисление, эвтрофирование, металлы, качество вод

DOI: 10.31857/S0016752523100084, **EDN:** VUZPIJ

ВВЕДЕНИЕ

Воды суши являются компонентом природы и интенсивно используются человеком. В ряде случаев антропогенная деятельность оказывает отрицательное влияние на водные экосистемы. В.И. Вернадский (2003, с. 20) отмечал, что “природная вода охватывает и создает всю жизнь человека, т. к. едва ли есть какое-нибудь другое природное тело, которое бы до такой степени определило его общественный уклад, быт, существование”. Преобразование водосборов, воздушные выпадения, промышленные и хозяйственно-бытовые прямые сбросы, диффузные потоки приводят к загрязнению водных систем и изменению биогеохимических циклов элементов в системе водосбор — водоем, закислению, эвтрофированию озер и рек, появлению в воде токсичных химических элементов и веществ, что в итоге снижает качество вод, биоразнообразие, оказывает негативное влияние на здоровье человека. Изъятие стока и потепление климата также находят отражение в изменениях гидрологических и биогеохимических циклов элементов и веществ. Очевидно, что современные биосферные процессы, которые происходят под влиянием человеческой деятельности находят отражение в состоянии вод суши, как конечных приемниках всех выбросов и стоков в

биосфере. Огромная роль учения В.И. Вернадского о биосфере в полной мере начала осознаваться в середине прошлого века, когда были оценены негативные последствия нашего вмешательства в природные процессы. Он отмечал, что человеческая деятельность резким и радикальным образом изменяет течение естественных процессов и преобразует то, что мы называем законами природы (Вернадский, 1991).

Современные биогеохимические процессы определяют качество вод. В процессе формирования вод ежеминутно протекает множество сложных биогеохимических процессов как на водосборе, так и в водоеме, вследствие которых формируются определенные свойства вод, характерные для того или иного водного объекта или региона в целом. Количество исследований антропогенных изменений биогеохимических процессов в системах Земли, включая воды суши, огромно (Ермаков, 2017, 2018; Clair et al., 2011; Bjerregaard, Andersen, 2014; Strock et al., 2017; Corman et al., 2018 и др.).

Практически каждый регион и виды производства сталкиваются с количественным и качественным истощением водных ресурсов. Наряду с множеством локальных изменений, в современных условиях происходит трансформация геохимии природных вод на континентах и в планетар-

ном масштабе. Масштабы возрастающего глобального рассеивания элементов в окружающей среде отражены в работах (Rockström et al., 2009; Моисеенко, 2017; Zang et al., 2020). Учитывая высокую значимость пресных вод в жизнеобеспечении населения планеты и сохранения ее видового разнообразия, очевидна высокая актуальность исследований водных ресурсов под воздействием возрастающих антропогенных нагрузок.

В.И. ВЕРНАДСКИЙ О ПРИРОДНЫХ ВОДАХ: “ВОДА И ЖИЗНЬ”

“Нет земного вещества, минерала, горной породы, живого тела, которое бы не включало воду. Нет природного тела, которое могло бы сравниться с водой по влиянию на ход основных, самых грандиозных геологических процессов” (Вернадский, 2003, с. 20). Теоретические воззрения В.И. Вернадского на водные системы исходят из рассмотрения воды как минерала. Он впервые разрабатывает классификацию природных вод, фундамент которой составляют минерализация природных вод, их физико-географическая приуроченность и геологические особенности водосборов. “Химия природных вод и есть минералогия” (Вернадский, 2003, с. 222). В основу положен принцип разделения вод на подгруппы, классы, царства, подцарства, семейства и виды минералов. Списки классификации, как он писал, охватывают лишь 20–30% существующих и встреченных нами тел. Его книга “История природных вод”, по собственному признанию В.И. Вернадского (2003, с. 15), “...является не только первой минералогией земных вод, но и охватывает ее в таком аспекте, в каком многочисленные исследователи вод к ней не подходили”. Он предсказывал, что изучение природных вод войдет в задачи минералогии. Однако этого не произошло до наших дней, уже в середине прошлого века наука о водах суши стала объектом исследований, преимущественно, географических наук. Подземные воды в части взаимодействия “вода-порода” оставались в спектре внимания геохимиков и в России сформировалась известная школа гидрогеохимиков.

Так, О.А. Алекиным (1970) разрабатывается упрощенная классификация поверхностных вод суши, в основу которой положен химический состав вод: солевой состав и состав анионов. Большой вклад в гидрохимию вносят работы А.М. Никанорова (2015). Исследования развиваются не только в оценке количественных показателей. Ученых также привлекают оценки качества вод. Они становятся объектом экологических и медицинских наук, разрабатываются различные биоиндикаторы качества вод (Абакумов и др., 1992). Однако интеграции гидрохимических и гидробиологических знаний в биогеохимию не проис-

ходит в силу разобщенности исследований в науках о Земле и Жизни.

Значение разработанных В.В. Вернадским понятий “вода и жизнь” огромно, особенно в современную эпоху глобальных экологических катастроф, поисков путей сохранения биосферы Земли и человеческой цивилизации в целом. Вся биосфера меняется деятельностью цивилизованного человечества, тот “вихрь элементов”, который характеризует живое вещество, вызываемая жизнью, — биогенная миграция атомов, в подавляющей части состоит из миграции атомов воды. Живые организмы не только способствуют миграции атомов воды, но и они вызывают синтез воды и ее разложение” (Вернадский, 2003, с. 80). “Биогенные миграции элементов, меняющая природные воды — одно из основных проявлений организованности биосферы” (В.И. Вернадский, 2003, с. 89). По образному выражению В.И. Вернадского, вода определяет и создает всю биосферу, является связующим, неотъемлемым звеном между живым и неживым. Из этого определения вытекает значимость исследований качества вод. Он отмечал, что человек с каждым десятилетием усиливает проявление своей активности, ибо он начинает углублять использование вод.

Идеи В.И. Вернадского о роли воды в истории и развитии планеты Земля, о тесной связи живого вещества и важной роли воды в появлении и развитии жизни на Земле, об основополагающей роли воды в геологических и гидрохимических процессах на Земле должны играть ведущую роль в решении глобальных планетарных экологических проблем.

Развитие концепции В.И. Вернадского по изучению вод требуют в первую очередь высокоточных измерений их химического состава, как особых жидких минеральных образований. Основное свойство природных вод — это скорость протекания биогеохимических реакций в водных системах, в которых одномоментно протекает множество взаимодействий, т.е. воды суши представляют собой достаточно динамичную систему в отличие от минералов. Вода нужного объема и необходимого качества является необходимым условием сохранения здоровья населения, биоразнообразия, эстетического и рекреационного потенциала природы, производства пищевой и технической продукции, т.е. играет важную роль в жизнеобеспечении растущего по численности населения Земли.

БИОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВОДЫ СУШИ АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ

Глобальное использование пресных вод человеком на Планете оценивается в 2.600 км^3 в год, в

доиндустриальную эпоху эти значения составляли 415 км³ в год (Rockström et al., 2009). Согласно оценкам (Zhang et al., 2020), допустимый порог изъятия воды в планетарном масштабе составляет 4.000 км³ в год и пока не превышен. Воды суши в пределах Планеты, включая Россию, распределены неравномерно. Наибольший дефицит водных ресурсов не только в количестве, но и в водном качестве испытывают засушливые южные регионы Планеты с высокой плотностью населения. От дефицита питьевой воды страдает более 40% мирового населения. Согласно статистике, практически пятая часть населения мира живёт в районах, в которых наблюдается острая нехватка питьевой воды (Данилов-Данильян, Рейф, 2016). Согласно исследованиям (UN World Water, 2021), примерно к 2030 г. 47% населения планеты будут существовать под угрозой водного дефицита. Все более остро встает вопрос о неудовлетворительном качестве вод, что делает ее употребление во многих странах опасным для здоровья человека. Следует отметить, что Россия обеспечена водными ресурсами, средний многолетний суммарный речной сток — 4258.6 км³ в год, что составляет около 10% речных вод всего Земного шара (при занимаемой площади 11.5% и населения 2.6%). Суммарный объем вековых запасов пресной воды в озерах России составляет 26 500 тыс. км³. (в том числе в озерах: Байкале — 23 000 тыс. км³, Ладожском — 903 км³, Онежском — 295 км³) (Эдельштейн, 2023). Вода становится важным ресурсом для жизнедеятельности человека. “Мы не можем оставить без внимания надвигающуюся, меняющую историю и состав природных вод силу” (Вернадский, 2003, с. 88).

Большая группа ученых (Rockstrom et al., 20093) проанализировали исторические эпохи кризисных состояний, предприняли попытку определить допустимые (границные) нагрузки по ключевым антропогенным нагрузкам, т.е. определить способности экосистем и биосферы в целом усваивать антропогенные потоки химических элементов и веществ без ущерба для обитателей Планеты. По мнению ученых, в настоящее время превышен порог допустимости повышения CO₂, по потокам фосфора и другим факторам. Однако сложно сказать, насколько приемлемо определение пределов глобальных ограничений по отношению к конкретным водным экосистемам. Многие водные объекты нашей Планеты испытывают сильное загрязнение различными видами стоков, однако существуют огромные пространства, не затронутые деятельностью человека. Сложно охватить все прямые и опосредованные последствия антропогенных воздействий на водные ресурсы. Блок схема основных антропогенных воздействий на воды суши, по нашему обобщению, представлена на рис. 1. В работе сфокусировано

внимание на проблемах, которые появились вследствие потепления климата и эвтрофирования вод, их засоления, выпадения кислот и закисления вод, рассеивания металлов.

Северо-восточная часть Скандинавского щита (Кольский Север) испытывает антропогенную нагрузку более 80 лет. Воды суши этого региона чувствительны ко всем антропогенным нагрузкам в силу низкого уровня масс и энергообмена в холодных широтах. На примере этого региона рассмотрено развитие антропогенно-индуцированных процессов в водах суши, поскольку здесь имеются результаты многолетних исследований (Moiseenko et al., 2015; Moiseenko, Sharov, 2019; Moiseenko et al., 2018, 2019, 2022). В природных условиях воды региона характеризуются низкой минерализацией и малым содержанием биогенных элементов. Озера арктического бассейна в природном состоянии — ультрапресные и олиготрофные. Отметим, что показатели химического состава вод этого региона, как и антропогенные нагрузки, характерны для многочисленных озер арктической зоны.

Потепление климата и связанные с ним процессы в водных системах

Наибольшее внимание ученых в последние годы сосредоточено на изучении влияния потепления климата, как глобального процесса. С 1980 г. средняя температура воздуха Планеты увеличилась на 0.5 градуса по Цельсию, и Земля продолжает нагреваться примерно на 0.16 градуса за десятилетие с вариабельностью на разных участках Планеты. Доказанными эффектами потепления биосферы являются: неустойчивость погоды, изменение осадков и нарушение гидрологических циклов — увеличение засушливых периодов и опустынивание в теплом климате, увеличение осадков и обводнение в гумидных зонах. Основной причиной потепления климата является возросшая эмиссия парниковых газов, в особенности CO₂. Сегодня в атмосфере содержится на 42% больше CO₂, чем в начале индустриальной эры (AR, 2014). Последний отчет МГЭИК показывает, что выбросы парниковых газов продолжают нарастать (AR, 2022).

Глобальное потепление увеличивает интенсивность биогеохимического круговорота элементов в гидросфере, создавая обратные связи и изменяя окружающую среду, ландшафты, экосистемы и человеческое общество. Повышение температуры воздуха, особенно летом и ранней осенью, означает, что атмосфера может удерживать больше воды (Water Security, 2022). Изменение климата приводит к переносу большего количества влаги из более низких широт к полюсу. Это способствует увеличению количества осадков в

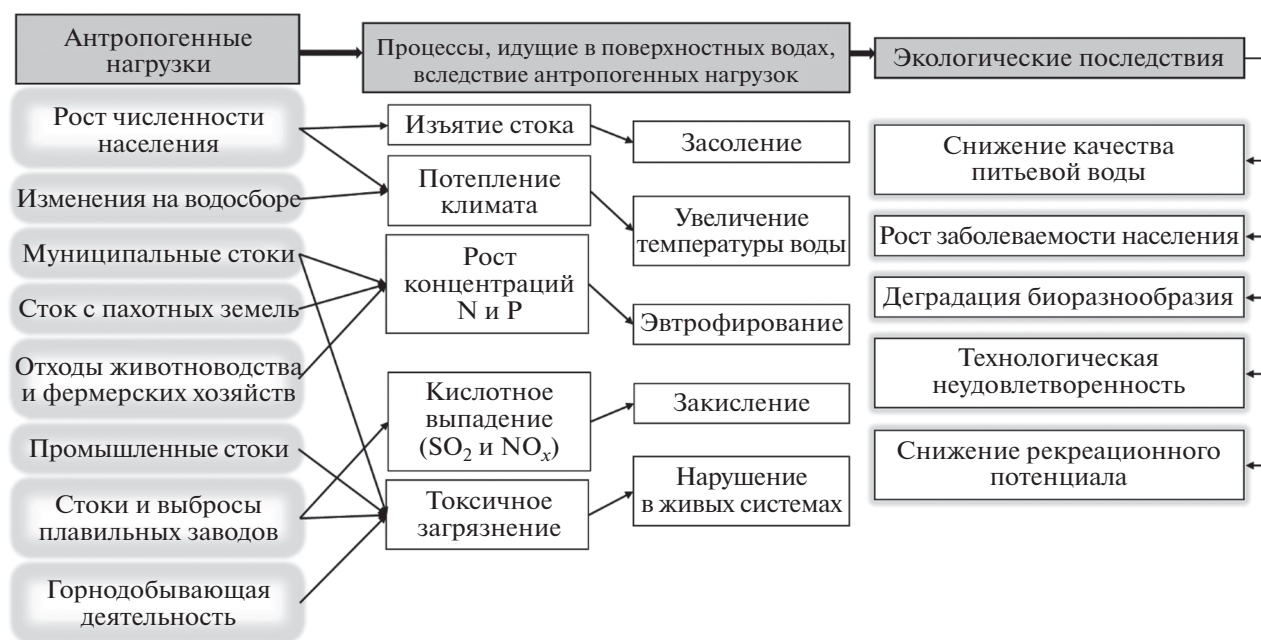


Рис. 1. Основные антропогенные нагрузки на воды суши, приводящие к развитию неблагоприятных процессов.

Арктике, выпадающих либо в виде дождя, либо в виде снегопадов. Во многих частях региона увеличилась доля осадков, выпадающих в виде дождя, а не снега, период снежного покрова стал короче (AMAP, IASC, 2016).

Влияние потепления климата проявляется в изменениях поверхностного стока вод. Увеличение количества осадков, речного стока и поступление вод тающих ледников и ледовых щитов приводит к тому, что растущие объемы пресной воды направляются в Северный Ледовитый океан: речной сток увеличился до $4200 \text{ км}^3 (\pm 420 \text{ км}^3)$ в 2000–2010 гг. с $3900 \text{ км}^3 (\pm 390 \text{ км}^3)$ в 1980–2000 гг. Прогнозируется, что эти изменения продолжатся: моделирование предполагает, что речной сток к 2071–2100 гг., может увеличиться на 25–50% на большей части арктического региона (AMAP, IASC, 2016). На примере крупных рек Сибири — Оби (замыкающий створ Салехард), Енисея (Игарка) и Лены (Кюсюр) показано, что повышение стока этих рек сопряжено во времени с началом современного повышения температуры воздуха. Показано, что долговременные фазы изменений стока синхронны с соответствующими фазами изменений температуры воздуха и макромасштабной атмосферной циркуляцией (Георгиади и др., 2019).

Наиболее опасным феноменом является влияние потепления на многолетнемерзлые породы (ММП), которые широко распространены в континентальной части Западной Сибири. Их площадь составляет около 700 тыс. км^2 , что более пятой части региона. Растепление мерзлых торфя-

ников севера Западной Сибири может привести к росту выделения метана и других парниковых газов в атмосферу, увеличению объемов воды рек и озёр и количества озер, расширению их площадей (Xiang, 2013; Grosse et al., 2016; Malkova et al., 2022).

Зимний снежный покров является основным источником годового стока в северных регионах и определяет динамику экспорта питательных веществ и растворенного органического углерода (DOC). Трансформация гидрологических циклов неизбежно приведет к изменению концентрации и выноса химических элементов в водах, включая органические и биогенные элементы, а также к изменению минерализация и/или выноса DOC в ручьи. При потеплении климата с учетом прогнозов изменятся сроки и интенсивность снеготаяния, что повлияет на сток вод в озера и в окраинные моря. Может увеличиться частота осенних штормов и паводков (Meingast et al., 2020). Точно неизвестно, как эти факторы могут соответствовать изменениям выноса растворенных веществ с водосборов. Однако очевидно, что изменятся биогеохимические циклы в системе: водосбор — водоем. В литературе появляется все больше свидетельств, указывающих на влияние климатического фактора, приводящее к изменчивости химического состава вод (de Wit et al., 2021). Нарастание органического вещества может быть связано с возросшим поступлением биогенных элементов с водосбора — DOC, нитратов и фосфатов, как следствие потепления климата (Moiseenko et al., 2022).

Таким образом, характер влияния температуры на водные ресурсы, прежде всего, определяет-

ся через изменение гидрологических условий формирования вод и биогеохимических циклов, т.е. количеством осадков, наличием снежного покрова, состоянием подстилающих пород на водосборе почв, степени насыщения или истощения вод обменными основаниями и накоплением в историческом интервале на водосборе, а также микробиологической активностью, ускорением роста растительности и, возможно, стоков биогенных элементов.

В работе (Moiseenko et al., 2013) было промоделировано влияние повышения температуры на химический состав вод различных природно-климатических зон (от арктических до степных), которое показало, что наибольшее влияние повышение температуры окажет на эвтрофирование вод. Были рассчитаны трехпараметрические зависимости показателей химического состава вод от климатических характеристик, твердости подстилающих пород на водосборе и плотности населения. Построенные прогностические модели позволили предсказать возможные изменения минерализации и содержаний фосфора в водах суши в различных природно-климатических зонах России при потеплении на 0.5, 1.0, 1.5 и 2°C. Согласно рассчитанным зависимостям, по прогнозу при повышении температуры на 0.5 и 1°C интенсивность процессов химического выветривания не приведет к значимому росту минерализации в северных регионах. Однако ощутимый рост суммы ионов (на около 25%) будет в средних и южных регионах Европейской части России при росте температур на 2°C. Значительный рост содержаний общего фосфора (увеличение на 50%) в воде озер будет наблюдаться практически повсеместно (за исключением зон тундры и лесотундры) уже при повышении среднесуточных температур на 0.5°C. Таким образом, с потеплением климата изменятся не только гидрологические условия формирования вод, но и условия формирования химического состава вод в направлении увеличения минерализации и изменения солевого состава, а также повышения концентраций биогенных элементов, что особенно ярко проявится в южных регионах и затронет также и приарктические регионы.

Следствием потепления климата в южных регионах является усиление засоления озер под влиянием потепления климата, которое проявляется в засушливых и полузасушливых районах за счет усиления испарительной концентрации. Это явление установлено для ряда озер аридных зон Северной Америки, Казахстана, юга России, Ирана (озеро Урмия) и других водоемов (Tussupova et al., 2020; Rudneva et al., 2022). Крымские озера России на западном побережье полуострова расположены в аридной климатической зоне, представляют собой типичные гиперсолёные водоемы и летом пересыхают при высоких температурах

воздуха и воды. Динамика изменения их экологического состояния в течение сезона года может отражать процесс трансформации экосистем в период экстремально жарких условий в летний период с последующим восстановлением нормального функционирования в осенне-зимний период (Руднева и др., 2020). Из анализа научных работ можно заключить, что последствия потепления климата наиболее драматичны будут в водах суши южных регионов.

Эвтрофирование вод

Повышение продуктивности водных систем является следствием наложения двух факторов — потепления и обогащения вод биогенными элементами — фосфором и азотом. Основной причиной стремительного развития эвтрофирования пресных вод является увеличение антропогенных нагрузок азота и фосфора в окружающую среду, которое многократно возросло в последние годы в глобальном масштабе. Общий сток реактивного фосфора в океаны, по оценкам ученых, увеличился в 9–10 раз по сравнению с доиндустриальным периодом (Zhang et al., 2020). На полях или в виде минеральных удобрений используют более 20 млн т фосфора, из них 10.5 млн т усваивается растениями, остальные объёмы внесённого на поля фосфора, смываются в реки и океан (8.5–9.5 млн т фосфора), рассеивается с пылевыми частицами, что приводит к обогащению гидросферы Земли этим химическим элементом, повышению продуктивности наземных и водных экосистем. По данным ряда моделей, глобальные нагрузки фосфора на водные ресурсы колеблются от 0.16 до 5 TgP год⁻¹ (Bouwman et al., 2017). Антропогенная деятельность приводит к модификации потоков в биосферу цикла другого важного элемента питания — азота, который конвертируется в реактивный азот вследствие 4 процессов: индустриальная фиксация (80 мегатонн N в год); сельскохозяйственная фиксация путем культивирования бобовых (40 мегатонн N в год); сжигание отводящих газов (20 мегатонн N в год) и горение биомассы вследствие пожаров (10 мегатонн N в год) (Gruber, Gallovey, 2008).

Основное назначение производства и использования фосфора и азота — это повышение продуктивности сельхозугодий, поэтому человечество пока не может отказаться от их использования. В настоящее время не представляется возможным ограничить внесение удобрений в почву, поскольку повышение продуктивности полей необходимо для обеспечения продовольствием все возрастающего населения Планеты. Эвтрофирование вод представляет собой угрозу для воды, используемой в качестве питьевого водоснабжения, рыбодства, рекреации, промышленности, поскольку оно вызывает усиленный рост цианобактерий,

выделяющих в воду токсины, и водных макрофитов. Следствием является низкое содержание кислорода в воде, гибель и разложение водной флоры и фауны. Состояние тысяч озер, устьев водохранилищ и водно-болотных угодий по всему миру вблизи крупных населенных пунктов ухудшается из-за повышения уровня азота и фосфора (Abid, Gill, 2014).

Эвтрофирование вод Арктического бассейна практически не освещено в современной научной литературе. В отчете АМАР (2016) эта проблема не обозначена. Северные территории нашей Планеты располагают огромным фондом малых олиготрофных озер, не подверженных каким-либо прямым воздействиям человеческой деятельности. Если исходить из классификации озер по содержаниям фосфора на Кольском Севере, то за последние 30 лет количества озер с низкими концентрациями фосфора уменьшилось. Однако увеличилось число озер, которые по концентрации фосфора более соответствуют мезотрофным и эвтрофным. В работе Stoddard et al. (2016) отмечают, что в Америке практически не осталось олиготрофных озер даже в тех случаях, когда озера не затронуты человеческой деятельностью. Для арктических водоемов роль питательных веществ в эвтрофировании вод существенно выше за счет увеличения уязвимости водных сообществ, связанной с продолжительным периодом существования ледового покрова. Поэтому, несмотря на относительно низкие температуры и скорости расхода O_2 , к окончанию зимнего периода развивается явление аноксии у дна водоемов. В местах эвтрофирования озер арктического бассейна возрастает доля зеленых, криптофитовых и синезеленых в общей биомассе фитопланктона (Moiseenko, Sharov, 2019).

Кислотообразующие вещества и особенности закисления вод

Человеческая деятельность в прошлом веке, главным образом от сгорания мазута, каменного угля и в процессе выплавки металлических руд, привела к огромному количеству выбросов в атмосферу кислотообразующих газов (SO_2 , NO_x , NH_3), способных конвертироваться как в атмосфере, так и в экосистемах в кислоты, приводя к антропогенному закислению вод. Уровень эмиссии антропогенной серы в Европе и Северной Америке быстро нарастал в начале прошлого века и к его середине достиг максимальных значений (Graedel et al., 1995). Закисление вод проявилось в кислото-уязвимых регионах, водосборы которых преимущественно сложены гранитными и песчаными формациями. Во многих странах это усилилось к 60-м годам прошлого столетия и продолжало интенсифицироваться до 70–90-х годов. Было выявлено большое количество малых озер с

низким значением pH в Скандинавских странах и Восточной Америке, которые стали безжизненными.

Принятие ряда международных решений в 1980-е годы по сокращению выбросов кислотообразующих газов, включая Россию, привело к снижению нагрузки кислот на водосборы в центральной Европе и Северной Америке (Kvaeven et al., 2001). Поверхностные воды во многих регионах стали частично восстанавливаться от закисления в ответ на уменьшение эмиссии SO_2 и NO_3 . В последние 50 лет, несмотря на существенное снижение выбросов SO_2 в Северной Америке и Европе, а также в Китае, выпадения кислот на водосборы пока превышают уровень доиндустриального периода. В 2025 г. оценивается до 6.6 млн т-экв, по прогнозам в дальнейшем будут нарастать к 2050 г. до 8.2, и к 2100 г. — до 9.1 млн т-экв относительно природных значений, оцениваемых в 1.4 млн т-экв. (Graedel et al., 1995).

Кислотные осадки изменяют транспортные потоки химических элементов в оболочках Земли, ускоряют химическое выветривание основных катионов и металлов, изменяют биогеохимические циклы элементов в литосфере и пресноводной гидросфере, приводят к гибели видов, чувствительных к низким pH. Интенсивность закисления вод определяется двумя основными факторами: уровнем аэротехногенной нагрузки кислотообразующих веществ на водосборы с учетом продолжительности действия и природной чувствительностью территории по геологическим, ландшафтно-географическим и климатическим условиям. Если структура водосбора и слагающие ее почвы кислые, то закисление вод будет развиваться достаточно стремительно, поскольку ионы H^+ и Al^{3+} будут сопровождать подвижные анионы SO_4^{2-} и NO_3^- в формируемых с водосбора потоках вод. При более высокой буферной емкости развитие закисления зависит от объемов накопления кислотообразующих агентов на водосборах. В России на Европейской территории и в Западной Сибири, были выявлены закисленные озера (Moiseenko et al., 2018) даже в случае отдаленного влияния локальных производств. Было высказано предположение о влиянии сжигания попутного газа при добыче углеводородов.

Снижение эмиссии кислот в Планетарном и региональном масштабах привело к восстановлению закисленных вод на всех континентах, включая Россию. Отмечается три сценария развития ситуации пролонгированного изменения водной химии при снижении выпадения кислот: 1) развивается дальнейшее закисление вод; 2) pH и щелочность не изменяются; 3) происходит восстановление кислото-нейтрализующей способности вод (ANC) (Moiseenko et al., 2015). Поступление основных катионов (BC) с водосбора играет веду-

щую роль в формировании различий в процессе восстановления буферной емкости вод.

В условиях восстановления и потепления климата отмечаются общие тенденции изменения ряда других показателей водной химии при снижении выпадения кислот: увеличение содержания растворенного органического углерода (DOC), азота и фосфора (Corman et al., 2018). Этот феномен получил название “Brownifications” и проявился в водах ряда регионов Северной Америки и Европы, включая Кольский Север России. Несколько гипотез для объяснения нарастаний содержаний органического вещества гумусовой природы в водных системах было предложено учеными. Montaith et al. (2007) объясняет этот феномен повышением роли притока гумусовых кислот при восстановлении химического состава вод озер после закисления, однако многие ученые в последние годы объясняют это явление потеплением климата (Clark et al., 2010; Strock et al., 2017; Corman et al., 2018; de Vit et al., 2021). Нашими исследованиями доказано, что совместное влияние потепления и снижения выпадений кислот приводят к необратимой эволюции озер в направлении обогащения их DOC, P и N, и, как следствие, — эвтрофированию (Moiseenko et al., 2022).

Рассеивание металлов и увеличение их концентрации в водах суши

Металлы поступают в водные артерии в составе стоков и выбросов в атмосферу различных производств, диффузных источников, выщелачиваются из минеральных пород кислотными осадками. Рассеивание элементов тесно связано с добычей и производством металлов. Уже в 1934 г. Ферсман (1934) отмечал стремительный рост использования химических элементов, примерно в 100 раз за 30 предыдущих лет. К концу XX столетия объемы годовой их добычи значительно возросли, изменились и приоритеты их использования человеком. Анализ имеющихся данных по добыче и использованию элементов (Минеральные ресурсы мира, 2002 гг.) показал, что по сравнению с 70-ми годами прошлого века в настоящее время возрастает добыча и использование таких опасных элементов как Pb, Cr, Cu, Ni, Zn, Mo и др. Водные системы являются коллекторами всех распространённых в окружающей среде химических элементов и веществ с токсичными свойствами с еще до конца не выявленными отдаленными экологическими последствиями их влияния на живые системы в низких концентрациях. Особенно это касается таких опасных неэссенциальных металлов, как Hg, Cd и Pb. За счет природных источников их поступление в окружающую среду оценивается: Hg — 3, Cd — 4,6, Pb — 180 тыс. т/год (Bryan, 1976), а за счет антропогенных источников — Hg —

5—10, Cd — 43 и Pb — 360—440 тыс. т /год, соответственно (Moore, Ramamurthy, 1987).

Поступая в водные системы, токсичные элементы и вещества могут циркулировать в окружающей среде и накапливаться по мере продвижения по пищевым цепям (Newman, Clements, 2009; Vasseus et al., 2021). Ряд загрязняющих веществ появляется в окружающей среде в результате техногенных катастроф, например, разливы нефти, массовые сбросы (утечки) токсичных веществ, разломы дамб на хвостохранилищах (Bjerregaard, 2014).

Изучение территориального распределения химических элементов и коэффициентов их водной миграции в малых озерах на Европейской территории России и Западной Сибири подтвердил, что вследствие техногенного рассеивания элементов в глобальном (региональном) масштабе и выщелачивания кислотными осадками существует тенденция обогащения вод такими опасными элементами, как Pb, Cd, Al, Cr, As и Se (Moiseenko et al., 2019). Токсичные свойства металлов усиливаются при условиях сопутствующего эвтрофирования или закисления вод. Кислотные воздушные аэрозоли способствуют интенсивному выщелачиванию металлов из слагающих пород, что усиливает опасные свойства металлов в кислых водах. В условиях сопутствующего эвтрофирования и развития кислородного дефицита в полярных регионах десорбция металлов из донных отложений формирует высокий градиент дозы их токсичного воздействия для фауны в течение длительного периода полярной зимы. Механизм редокс-цикла хорошо изучен для Mn и Fe. В растворенной восстановленной форме эти химические элементы поднимаются до границы оксиклина, в слои, обогащенные O₂, где они снова окисляются, переходят в нерастворимую форму и осаждаются на дно, в бескислородных условиях по описанному циклу опять восстанавливаются. Исследования послойного распределения элементов в толще воды субарктического озера выявили, что градиент концентраций возникает не только для железа и марганца, но также для большой группы микроэлементов: Cd, Hg, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn, Cr, Co, Ba, Ga, U.

Наибольшее внимание мировая научная общественность уделяет таким опасным химическим элементам, как Hg, Cd и Pb. В воде исследованных арктических регионов содержания Hg были очень низкими, тогда как накопление этого элемента в органах и тканях рыб свидетельствует о глобальном загрязнении региона ртутью. Pb в озерах в большей части представлен в ионной форме (более 70%), которая обладает высокой проникающей способностью в организм рыб. Этот химический элемент накапливается во всех системах организма рыб в зависимости от общей

концентрации в воде. Cd накапливается во всех системах организма рыб, но в наиболее высоких — в почках рыб (Моисеенко и др., 2020).

КАЧЕСТВО ВОД: ПОНЯТИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ

Какие бы совершенные технологии не внедрялись, прямо или косвенно человек своей деятельностью будет воздействовать на воды суши. Свойства природных вод формируются в результате сложных биогеохимических процессов на водосборе и в водоеме: 1) физико-химических — химическое выветривание химических элементов, их взаимодействие, фильтрация, миграция, адсорбция, десорбция элементов, атмосферное выпадение и эвапорация с поверхности; 2) биологических — биохимических, микробиологических, биофильтрационных, физиологических. Относительная природная стабильность свойств вод и сезонная их изменчивость в природном состоянии поддерживается за счет динамического равновесия и цикличности природных процессов. Антропогенный фактор оказывает огромное влияние на воды суши в локальном, региональном и глобальном масштабах, изменяя их химический состав и свойства, как показано в данной работе. В процессе жизнедеятельности организмы, используя воду как ресурс и среду обитания, активно влияют на ее свойства, в ряде случаев играют определяющую роль, поэтому вода является биокосным телом.

В.И. Вернадский предопределил исследования и разработку методов оценки качества вод, “нужные человеку свойства вод выдвинуты самой жизнью” (Вернадский, 2003, с. 224). Если абстрагироваться от субъективных требований к качеству вод отдельных водопотребителей, то более универсальным определением будет характеристика качества вод с позиций экологической парадигмы: качество вод — это свойства вод, сформированные в процессе химических, физических и биологических процессов, как на водосборе, так и водосборе; благоприятное качество вод в конкретном водоеме наблюдается в том случае, если отвечает требованиям сохранения здоровья организма и воспроизводства **наиболее чувствительных видов**, адаптированных в процессе эволюционного развития к существованию в условиях этого водоема (Моисеенко, 2008).

Предлагаются ряд критериев, по которым мы можем определять экотоксичные эффекты загрязнения и для человека. Наиболее информативную картину дают биоиндикаторы — показатели здоровья рыб. Было доказано, что многие физиологические системы организма рыб, накопление металлов в органах и тканях и их токсичное воздействие сопоставимы с влиянием на

организм человека (Moiseenko et al., 2020; Gashkina et al., 2022).

В силу высокой научной и практической значимости проблема оценки качества вод привлекает большое количество исследователей. Не ново мнение, что система ограничений поступления загрязняющих веществ, основанная на данных о предельно допустимых концентрациях (ПДК) вредных веществ в воде, не совершенна, не дает адекватной оценки качества вод и не охраняет в полной мере водные экосистемы от деградации. Предлагается ряд классификационных схем, позволяющих с определенной долей условности по физико-химическим или гидробиологическим показателям отнести водный объект к определенному классу качества вод (Перечень..., 1990). От арктической до степной зоны используются один и тот же подход — сопоставления с требованиями ПДК, хотя действие опасных загрязняющих веществ на организмы зависит от химических свойств вод и очень различается.

Критерии качества вод водопотребителей различны в зависимости от цели использования: промышленные нужды, питьевое водоснабжение, естественное или искусственное воспроизводство рыб. Критический анализ современных методов оценки качества вод, используемых в России, представлен в работе (Моисеенко, 2019). Очевидно, что для оценки качества вод необходимо понимание формирования интегральной дозы воздействия и соответствующих эффектов ее последствий для живых организмов, т.е. определения доза-эффектных зависимостей, формирования и оценки биодоступности элементов и веществ, их экотоксичности, т.е. в какой форме элементы проникают в организм и оказывают повреждающие действие на живые системы (органы-мишени).

В настоящее время управленческие организации в сфере охраны окружающей среды заявили о необходимости включения методов определения биодоступности в оценке рисков загрязнения вод металлами и в экологическое регулирование качества вод (Väänänen et al., 2018). Например, принятая Водная рамочная директива по качеству вод в ЕС подчеркивает необходимость включения в стандарты качества вод Ni и Pb в их биодоступных формах (European Commission, 2013). Агентство по охране окружающей среды США уже внедрило инструмент оценки биодоступности Cu в нормирование загрязнения вод этим микроэлементом (U.S. EPA, 2007). В основе моделей лежит определение количества ионов металлов, которые обладают высокой проникающей способностью в живые организмы, т.е. биодоступностью. Если нормативы по Hg в России сопоставимы с западными странами, то — по Pb и

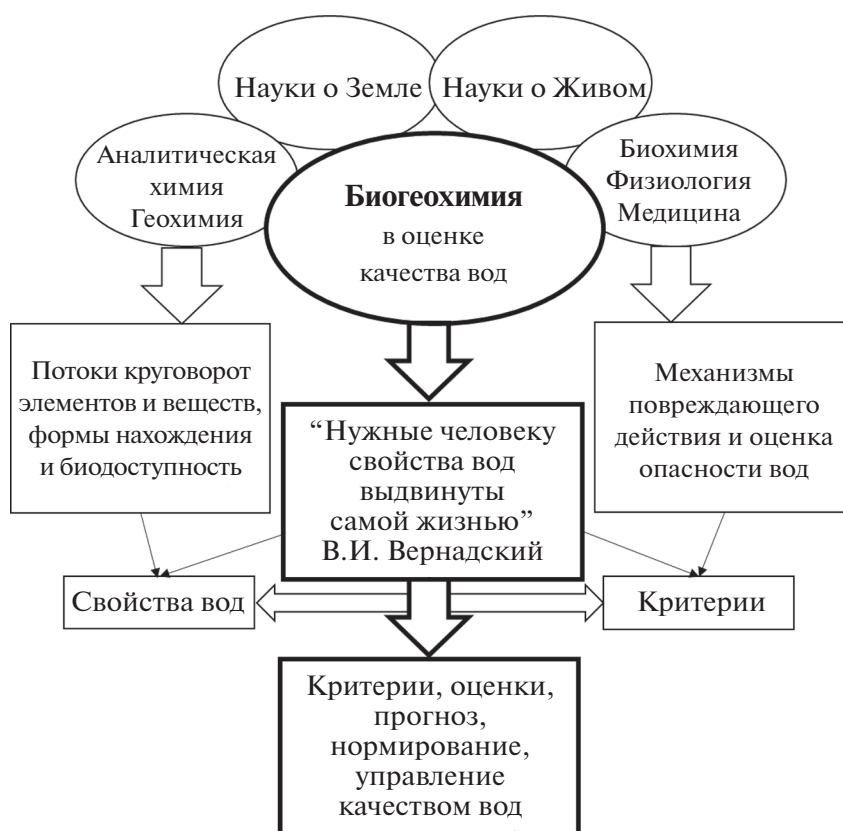


Рис. 2. Схема конвергенции наук о Земле и Живом в изучении и оценке качества вод (может быть “и Жизни”?).

Cd они значительно более жесткие в Европе и Америке (Moiseenko et al., 2020).

Исходя из предложенного понятия “качества вод”, очевидно, методы его оценки (в экспериментальных или натурных условиях) должны опираться на фундаментальные разработки в области наук о Земле и о Жизни, т.е. на биогеохимические исследования, такие как: 1) закономерности миграции, трансформации, седиментации и поведения антропогенно-привнесенных элементов, их взаимодействие с природными факторами, формы нахождения и их биодоступность; 2) закономерности антропогенной изменчивости экосистем, устойчивость и пределы адаптации, “норма и патология” живых организмов или пограничные состояния биологических систем. Без достаточно глубокого изучения формирования свойств вод в современных условиях антропогенных нагрузок и ответных реакций живых систем на антропогенное загрязнение невозможно обосновать систему критериев оценки качества вод и нормирования, соответственно — сохранить воды России чистыми. Блок схема процедуры установления показателей качества вод представлена на рис. 2. Развитие методологии оценки качества вод в рамках идей В.И. Вернадского о природных водах и жизни, является всеобъемлющей и направ-

лена на сохранение жизнеобеспечивающих условий человека на Планете.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Книга В.И. Вернадского “История природных вод” впервые была издана в 1933 г. и предопределила направленность исследований о природных водах, рассматривая воду как минерал. В.И. Вернадский отмечал, что нет на Земле горной породы, природного тела, живого организма, которое не включало бы воду, более бы значимо влияло на ход исторических событий на Земле. В современную эпоху, антропогенная нагрузка на воды суши возрастает, несмотря на значительные усилия по сокращению выбросов в атмосферу и сбросов промышленных и сельскохозяйственных сточных вод. Потепление климата в сочетании с рассеиваем биогенных элементов приводит к повсеместному эвтрофированию вод, как глобального процесса. Возрастает содержание органического вещества и биогенных элементов в водах суши, что приводит к повсеместному сокращению олиготрофных озер и ухудшению качества вод даже в холодных широтах.

Сокращается содержание техногенных сульфатов в водах суши в результате снижения выбро-

сов диоксида серы и, как следствие — повышается кислотонейтрализующая способность вод озер. Однако биогеохимические циклы не возвращаются к природным показателям, одновременно нарастает содержание органического вещества и биогенных элементов, изменяется круговорот веществ в системе водосбор—водоем, как следствие глобального рассеивания элементов.

Многие озера и реки стали более чистыми относительно содержания опасных веществ в воде. Например, наблюдается олиготрофикация ряда крупных озер мира, снижение количества закисленных малых озер, снижение потока токсичных веществ в озера и реки. Вместе с тем, возврата к природным показателям не происходит, экосистема и биогеохимические циклы приобретают новые состояния, отличные от природных.

Развитие методологии оценки качества вод в рамках идей В.И. Вернадского о природных водах и жизни, является всеобъемлющей и направлена на сохранение жизнеобеспечивающих условий человека на Планете. Целевые показатели качества вод должны быть определены, исходя из всестороннего и глубокого понимания преобразования косного и живого вещества во взаимосвязи под влиянием человеческой деятельности.

Автор благодарен профессору, научному редактору В.В. Ермакову и главному редактору журнала, академику Ю.А. Костицыну за организацию спецвыпуска журнала, посвященного развитию идей В.И. Вернадского в современном мире.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абакумов В.А., Тальских В.Н., Попченко В.И., Булгаков Г.П., Свирская Н.Л., Кринева С.В., Попченко И.И., Семин В.А., Хромов В.М., Распопов И.М., Марголина Г.Л., Воронова Л.Д., Пушкарь И.Н. (1992) *Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем*. Гидрометеиздат, Санкт-Петербург, 320 с.
- Алекин, О.А. (1970) Основы гидрохимии, 2-е издание. Гидрометеорологическое издательство, 444с.
- Вернадский В.И. (1991) *Научная мысль как планетное явление*. М.: Наука, 270 с.
- Вернадский В.И. (2003) *История природных вод*. В.И. Вернадский; отв. ред. С.Л. Шварцев, Ф.Т. Яншина. М.: Наука, 750 с.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Кашутин Е.А., Милукова И.П. (2019) О вкладе климатических и антропогенных факторов в изменения стока крупных рек русской равнины и Сибири. *ДАН*. **488**(5), 539-544.
- Данилов-Данильян В.И., Рейф И.Е. (2016) *Биосфера и цивилизация*. М.: Энциклопедия, 432 с.
- Ермаков В.В. (2017) Концепция биогеохимических провинций А.П. Виноградова и ее развитие. *Геохимия*. (10), 875-890.
- Ermakov V.V. (2017) A.P. Vinogradov's concept of biogeochemical provinces and its development. *Geochem. Int.* **55**(10), 872-886.
- Ермаков В.В., Ковальский Ю.В. (2018) Живое вещество биосферы: масса и химический элементный состав. *Геохимия*. (10), 931-944.
- Ermakov V.V., Kovalsky Y.V. (2018) Living matter of the biosphere: mass and chemical elemental composition. *Geochem. Int.* **56**(10), 969-981.
- Минеральные ресурсы мира. (2002) Статистический справочник (издание официальное) МПР РФ ФГУНПП "Аэрогеология". Информационно-аналитический центр "Минерал", Москва
- Моисеенко Т.И. (2017) Эволюция биогеохимических циклов в современных условиях антропогенных нагрузок: пределы воздействий. *Геохимия*. (10), 841-862.
- Moiseenko T.I. (2017) Evolution of biogeochemical cycles under anthropogenic loads: limits impacts. *Geochem. Int.* **55**(10), 841-860.
- Моисеенко Т.И. (2019) Биодоступность и экотоксичность металлов в водных системах: критические уровни загрязнения. *Геохимия*. **64**(7), 675-688.
- Moiseenko T.I. (2019) Bioavailability and Ecotoxicity of Metals in Aquatic Systems: Critical Contamination Levels. *Geochem. Int.* **57**(7), 737-750.
- Моисеенко Т.И. (2008) Концепция "здоровья" экосистемы в оценке качества вод. *Экология*. **6**, 411-419.
- Никаноров А.М. (2015) Фундаментальные и прикладные проблемы гидрохимии и гидроэкологии. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 572 с.
- Перечень рыбохозяйственных нормативов предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение* (1999) М.: Изд-во ВНИРО, 304 с.
- Руднева И.И., Залевская И.Н., Шайда В.Г., Меметлаева Г.Н., Щерба А.В. (2020) Биогенная миграция азота и фосфора в соленых озерах Крыма: сезонные аспекты. *Геохимия*. **65**(10), 984-997.
- Rudneva I.I., Zalevskaya I.N., Shaida V.G., Memetlaeva G.N., Scherba A.V. (2020) Biogenic Migration of Nitrogen and Phosphorus in Crimean Hypersaline Lakes: A Seasonal Aspect *Geochem. Int.* **58**(10), 1123-1134.
- Ферсман А.П. (1934) *Геохимия*. Т. 2. Ленинград: ОНТИ-ХИМТЕОРЕТ, 354 с.
- Эдельштейн К.К. (2023) *Гидрология материков*. М.: Юрайт, 297 с.
- Abid A.A., Gill S.S. (2014) *Eutrophication: Causes, Consequences and Control* Volume 2. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 262 pp.
- AMAP. IASC (2016) Arctic Freshwater System in a Changing Climate, WCRP CliC Project. CliC/AMAP/IASC. <http://www.amap.no/documents/doc/The-Arctic-Freshwater-System-in-a-Changing-Climate/1375>.
- AR5 Synthesis Report: Climate Change, 2014. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/Ar5/ar5.html>
- AR6 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change — IPCC. Sixth Assessment Report, 2022. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report>.
- Bjerregaard P., Andersen O. (2014) Ecotoxicology of Metals — Sources, Transport, and Effects in the Ecosystem; In

- Handbook on the Toxicology of Metals* (Eds. Nordberg G.F., Fowler B.A., Nordberg M.), Amsterdam: Elsevier.
- Bouwman A.F., Beusen A.H.W., Lassaletta L., van Apeldoorn D.F., van Grinsven H.J.M., Zhang J., van Ittersum M.K. (2017) Lessons from temporal and spatial patterns in global use of N and P fertilizer on cropland. *Scientific Reports*. **7**(1), 40366.
<https://doi.org/10.1038/srep40366>
- Bryan G.W. (1976) *Heavy metal contamination in the sea. Marine Pollution* (R. Johnston, ed.), p. 185-302.
- Clair T.A., Dennis I.F., Vet R. (2011) Water chemistry and dissolved organic carbon trends in lakes from Canada's Atlantic Provinces: no recovery from acidification measured after 25 years of lake monitoring. *J. Fish. Aquat. Sci.* **68**, 663-674.
- Clark J.M., Bottrell S.H., Evans C.D., Monteith D.T., Bartlett R., Rose R., Newton R.J., Chapman P.J. (2010) The importance of the relationship between scale and process in understanding long-term DOC dynamics. *Sci. Total Environ.* **408**, 2768.
- Corman J.R., Bertolet B.L., Casson N.J., Sebestyen S.D., Kolka R.K., Stanley E.H. (2018) Nitrogen and phosphorus loads to temperate seepage lakes associated with allochthonous dissolved organic carbon loads. *Geophysical Research Letters*. **45**, 5481-5490.
- De Wit H.A., Stoddard J.L., Monteith D.T., Sample J.E., Austnes K., Couture S., Fölster J., Higgins S.N., Houle D., Hruška J., Krám P., Kopeček J., Paterson A.M., Valinia S., Van Dam H., Vuorenmaa J., Evans C.D. (2021) Cleaner air reveals growing influence of climate on dissolved organic carbon trends in northern headwaters. *Environ. Res. Lett.* **16**, 104009.
- European Commission. Directive 2013/39/EC Amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as Regards Priority Substances in the Field of Water Policy. 2013/39/EC; 2013.
- Gashkina N.A., Moiseenko T.I., Shuman L.A., Koroleva I.M. (2022) Biological responses of whitefish (*Coregonus lavaretus* L.) to reduced toxic impact: Metal accumulation, haematological, immunological, and histopathological alterations. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. **239**, 113659.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113659>
- Graedel T.E., Benkovitz C.M., Keene W.C., Lee D.S., Marland G. (1995) Global emission inventories of acid-related compounds. *Water, Air and Soil Pollut.* **85**, 25-36.
- Grosse G., Goetz S., McGuire A.D., Romanovsky V.E., Schuur E.A. (2016) Changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth system. *Environ Res Lett.* **11**, 040201.
- Gruber N., Galloway J.N. (2008) An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*. **451**, 293-296.
- Kvaeen B., Ulstein M.J., Skjelkvåle B.L. (2001) ICP Waters – An international program for surface water monitoring. *Water Air Soil Pollut.* **130**, 775-780.
- Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., Gravis A., Kraev G., Korostelev Y., Nikitin K., Orekhov P., Ponomareva O., Romanovsky V. et al. (2022) Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic. *Energies*. **15**, 2311.
<https://doi.org/10.3390/en15072311>
- Meingast K.M., Kane E., Coble A.A., Marcarelli A.M., Toczydlowski D. (2020) Climate, snowmelt dynamics and atmospheric deposition interact to control dissolved organic carbon export from a northern forest stream over 26 years. *Environ Res Lett.* **15**, 104034.
- Moiseenko T.I., Dinu M.I., Gashkina N.A., Kremleva T.A. (2019) Aquatic environment and anthropogenic factor effects on distribution of trace elements in surface waters of European Russia and Western Siberia. *Environ Res Lett.* **14**, 065010.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab17ea>
- Moiseenko T., Sharov A. (2019) Large Russian lakes Lado-ga, Onega, and Imandra under strong pollution and in the period of revitalization: a review. *Geosciences*. **9**(12), 492.
<https://doi.org/10.3390/geosciences9120492>
- Moiseenko T.I., Gashkina N.A., Dinu M.I. (2020) Metal bioavailability in northern low-salinity water: Case study of lakes in the Kola region, Russia. Case study of lakes in the Kola region. *Environ Res Lett.* **15**, 095005.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9b40>
- Moiseenko T.I., Bazova M.M., Gashkina N.A. (2022) Development of Lake from Acidification to Eutrophication in the Arctic Region under Reduced Acid Deposition and Climate Warming. *Water*. **14**, 3467.
<https://doi.org/10.3390/w14213467>
- Moiseenko T.I., Dinu M.I., Bazova M.M., Heleen A. de Wit. (2015) Long-term changes in the water chemistry of subarctic lakes as a response to reduction of air pollution: case study in the Kola North, Russia. *Water, Air, & Soil Pollution*. **226**(98), 1-12.
- Moiseenko T.I., Skjelkvåle B.L., Gashkina N.A., Shalabodov A.D., Khoroshavin V.Yu. (2013) Water chemistry in small lakes along a transect from boreal to arid ecoregions in European Russia: Effects of air pollution and climate change. *Applied Geochemistry*. **28**, 69-79.
- Moiseenko T.I., Dinu M.I., Gashkina N.A., Jones V., Khoroshavin V.Y., Kremleva T.A. (2018) Present status of water chemistry and acidification under nonpoint sources of pollution across European Russia and West Siberia. *Environ Res Lett.* **13**, 105007.
- Monteith D.T., Stoddard J.L., Evans C.D., de Wit H.A., Forsius M., Hogasen T., Wilander A., Skjelkvåle B.L., Jeffries D.S., Vuorenmaa J., Keller B., Kopacek J. and Vesely J. (2007) Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. *Nature*. **450**, 537-539.
- Moore J.W., Ramamurthy S. (1984) *Heavy metals in natural waters. Monitoring and impact assessment*. Springer, 288 p.
- Newman M.C., Clements W.H. (2009) *Aquatic Toxicology: Concepts, Practice, New Directions*. In book: General, Applied and Systems Toxicology.
<https://doi.org/10.1002/9780470744307.gat092>
- Rockström W., Noone S.K., Persson Å., Chapin III F.S., Lambin E.F., Lenton T.M., Scheffer M. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*. **461**, 472-475.
- Rudneva I.I., Gaisky P.V., Shaida V.G., Shaida O.V. (2023) Assessing Climate and Human Activity Effects on Hypersaline Lake Ecosystem: Case Study of Saki Lake, Crimea. *Water*. **15**, 456.
<https://doi.org/10.3390/w15030456>
- Stoddard J.L., Van Sickle J., Herlihy A.T., Brahney J., Paulsen S., Peck D.V. et al. (2016) Continental-scale in-

- crease in lake and stream phosphorus: Are oligotrophic systems disappearing in the United States? *Environ Sci Technol.* **50**, 3409–3415.
- Strock K.E., Theodore N., Gawley W.G., Ellsworth A.C., Saros J.E. (2017) Increasing dissolved organic carbon concentrations in northern boreal lakes: implications for lake water transparency and thermal structure. *J. Geophys Res Biogeosci.* **122**, 1022–35.
- Tussupova K., Hjorth A.P., Morave M. (2020) Drying lakes: A review on the applied restoration strategies and health conditions in contiguous areas. *Water.* **12**, 749.
- U.S. EPA. National Recommended Water Quality Criteria. Report 4304T. Office of Water, Office of Science and Technology. (EPA/600/4-91/002) Springfield, Virginia, 2007
- UN World Water Development Report: Valuing Water, 2021. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2021>
- Väänänen K., Leppänen M.T., Chen X., Akkanen J. (2018) Metal bioavailability in ecological risk assessment of freshwater ecosystems: from science to environmental management. *Ecotoxicol Environ Saf.* **147**, 430–446.
- Vasseur P., Masfaraud J.-F., Blaise C. (2021) Ecotoxicology, revisiting its pioneers. *Environ Sci. Pollut Res Int.* **28**(4), 3852–3857. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11236-7>
- Water Security Under Climate Change Editors: Asit K. Biswas Cecilia Tortajada Copyright: 2022 Published: 29 September 2021. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2022, 830 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-5493-0>
- Xiang G. (2013) Permafrost degradation and methane: low risk of biogeochemical climate-warming feedback. *Environ Res Lett.* **8**, 035014.
- Zhang X., Davidson E.A., Zou T., Lassaletta L., Quan Z., Li T., Zhang W. (2020) Quantifying nutrient budgets for sustainable nutrient management. *Global Biogeochemical Cycles.* **34**, e2018GB006060. <https://doi.org/10.1029/2018GB006060>