

УДК 556.114.7:556.55

О.Н. Ерина¹, М.А. Терешина², Л.Е. Ефимова³, Д.И. Соколов⁴

СОВРЕМЕННЫЙ РЕЖИМ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В МОЖАЙСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

В работе изучается внутригодовая динамика содержания биогенных веществ в Можайском водохранилище в 2018/2019 гг. На основе ежемесячных измерений рассматриваются факторы сезонной изменчивости вертикального распределения соединений азота, фосфора и минерального кремния.

Режим биогенных элементов в Можайском водохранилище и соотношения их различных форм во многом определяются условиями формирования и продолжительностью плотностной стратификации водной толщи. В условиях гипоксии происходит восстановление соединений фосфора и аммонийного азота из донных отложений. В эпилимнионе к концу летнего периода нитраты и растворенный минеральный фосфор практически полностью потреблены водорослями; органический фосфор в течение вегетационного периода находится преимущественно во взвешенной форме в составе клеток фитопланктона. Минеральный кремний активно потребляется в мае в период развития диатомовых водорослей, тогда как в гиполимнионе его содержание стабильно в течение всего периода стратификации. Продольная неоднородность содержания биогенных веществ обусловлена не только условиями перемешивания, но и генезисом водной массы, присутствующей в том или ином районе водохранилища.

Показано, что за последние 30 лет в водохранилище возросла внутренняя биогенная нагрузка в результате увеличения продолжительности плотностной стратификации и, как следствие, периода аноксии. В то же время в результате изменения структуры землепользования произошло снижение поступления соединений азота и фосфора с речными водами.

Ключевые слова: качество воды, эвтрофирование, биогенные вещества, водохранилище

Введение. Биогенные вещества являются ключевым компонентом водной экосистемы, поскольку определяют интенсивность протекания продукционных процессов и, как следствие, трофический статус водных объектов.

Основными элементами, лимитирующими развитие фитопланктона, считаются азот и фосфор. Долгое время считалось, что в пресноводных экосистемах ключевым из них является фосфор [Sterner, 2008], однако исследования последних десятилетий наглядно показывают, что это не так, и азот в большинстве случаев ко-лимитирует «цветение» водорослей. Также значимую роль в функционировании сообществ фитопланктона играет кремний. Его доступность влияет на их видовой состав (кремний, в частности, необходим для развития диатомовых водорослей) и тем самым определяет условия эвтрофирования.

Интенсивное поступление соединений азота и фосфора в водотоки и водоемы со сточными водами и с сельскохозяйственных территорий в XX в. привело к обострению антропогенного эвтрофирования во всем мире. В России данная проблема остается актуальной вплоть до сегодняшнего дня, так как, несмотря на сокращение площади сельскохо-

зяйственных территорий, значительная доля коммунальных сточных вод продолжает поступать в водоемы недостаточно очищенной.

Однако даже при отсутствии существенного антропогенного поступления азота и фосфора в условиях климатических изменений все более значимым фактором эвтрофирования водоемов становится внутренняя биогенная нагрузка. В озерах и водохранилищах увеличивается продолжительность периода стратификации и, как следствие, гипоксии, во время которой формируются восстановительные условия среды, способствующие поступлению минерального азота и фосфора из донных отложений [Soranno et al., 1997; Wilhel, Adrian, 2008; North et al., 2014; Sahoo, Schladow, 2008]. При этом статистически значимо растет и повторяемость экстремальных погодных явлений в летний период, в результате которых происходит заглупление термоклина и высвобождение минеральных форм биогенных веществ, провоцирующих вспышки «цветения».

Для водохранилищ Москворецкого источника водоснабжения вспышки развития фитопланктона являются ключевой проблемой качества воды [Даченко, 2007]. Поэтому изучение режима биогенных веществ в данных водоемах особенно актуально, так

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Краснови́довская учебно-научная база, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* oxana.erina@geogr.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Краснови́довская учебно-научная база, инженер; *e-mail:* martereshina@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* ef_river@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Краснови́довская учебно-научная база, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* Dmitriy.Sokolov@yandex.ru

как связано с выявлением условий лимитирования первичной продукции в контексте борьбы с антропогенным эвтрофированием.

Материалы и методы исследования. Объектом настоящего исследования стало Можайское водохранилище [Комплексные ..., 1979], расположенное на западе Московской области в верховьях р. Москвы (рис. 1). Несмотря на высокий уровень гидрологической изученности водоема, режим биогенных веществ, особенно азота и кремния, не исследовался в нем на протяжении последних 30 лет, за которые произошли существенные изменения климата и структуры землепользования на его водосборе.

В 2018 году мониторинг Можайского водохранилища стал осуществляться по новой программе, основанной на ежемесячных наблюдениях на рейдовой вертикали в центральном районе водохранилища (см. рис. 1, станция IV). Данная станция является опорной на протяжении всей истории исследований водохранилища как наиболее репрезентативная (достаточно глубоководная и в то же время не испытывающая влияния близости гидротехнических сооружений). Поскольку производные процессы в водохранилище характеризуются значительной продольной неоднородностью [Соколов и др., 2016], в вегетационный период исследования проводились на пяти опорных станциях мониторинга, равномерно расположенных по длине водоема (см. рис. 1, станции I–V). Горизонты отбора проб устанавливались с учетом гидрологической структуры водоема в момент измерений. Всего за период с мая 2018 г. по апрель 2019 г. было отобрано и проанализировано более 100 проб воды.

Отобранные пробы анализировались в гидрохимической лаборатории Красновидовской учебно-научной станции МГУ. Содержание ортофосфатов и валового фосфора в фильтрованных (через мембранный фильтр диаметром пор 0,45 мкм) и нефилтрованных пробах определяли методом Морфи-Райли в соответствии с [РД 52.10.738-2010, РД 52.10.739-2010]. Методы определения соединений фосфора в морских водах были использованы ввиду того, что они обладают большей чувствительностью по сравнению с аналогичными для поверхностных и сточных вод. Содержание минерального кремния определяли фотометрическим методом в виде желтой кремнемолибденовой гетерополиокислоты [ПНД Ф 14.1:2:4.215-06].

Содержание валового азота определяли спектрофотометрическим методом в ультрафиолетовом

диапазоне после персульфатного окисления в щелочной среде [Аналитические ..., 2017]. Содержание нитратов и ионов аммония определялось методом ионной хроматографии [ПНД Ф 14.1:2:4.132-98], при этом методики были модифицированы для большей чувствительности. Кроме того, вместо отечественных хроматографических колонок, рекомендуемых методиками, изложенными в руководящих документах, нами были использованы для определения содержания нитратов – колонка американского производства Concise IC Sep An2, а для определения иона аммония – колонка японского производства Shodex IC YS-50. В сочетании с увеличением аликвоты анализируемой пробы это позволило достичь нижнего предела определения концентрации нитратов 10 мкг/л (2,2 мкг/л в пересчете на азот нитратов), а для ионов аммония – 3 мкг/л (2,3 мкг/л в пересчете на аммонийный азот). Результаты определения концентраций нитратов и ионов аммония усовершенствованной методикой показали полную сходимость с данными мониторинга Можайского водохранилища, проводимого сотрудниками ФГБНУ «ВНИРО» с использованием наиболее чувствительных методов определения азотных соединений из существующих в российской и международной практике.

Результаты исследований и их обсуждение.

Содержание *минерального кремния* в Можайском водохранилище в зимний меженьный период 2018 и 2019 гг. составляло в среднем 2,8–3,4 мг/л, хотя в придонном слое его концентрация могла увеличиваться до 6,5 мг/л (рис. 2 А). Увеличение содержания кремния с глубиной в меженьный период хорошо согласуется с увеличением электропроводности, что позволяет объяснить его прохождением более минерализованных грунтовых вод по русловой ложбине. За летний период кремний, поступающий с грунтовыми водами, накапливается в придонных слоях, где его концентрации достигают к концу лета 5,6 мг/л.

В отличие от других биогенных веществ для минерального кремния характерно значительное снижение концентрации в эпилимнионе с мая по август. В 2018 году его содержание в среднем находилось в пределах 0,9–1,9 мг/л, по сравнению с зимней меженью снизившись более чем в два раза (в некоторых районах водохранилища до 0,7 мг/л). Это объясняется большой потребностью в кремнии диатомовых водорослей, доминирующих в видовом составе фитопланктона в начале вегетационного периода. Даже несмотря на постоянное поступление кремния с речными водами, при развитии диа-



Рис. 1. Схема Можайского водохранилища (римскими цифрами обозначены станции мониторинга)

Fig. 1. The Mozhaysk Reservoir (Roman figures indicate positions of monitoring stations)

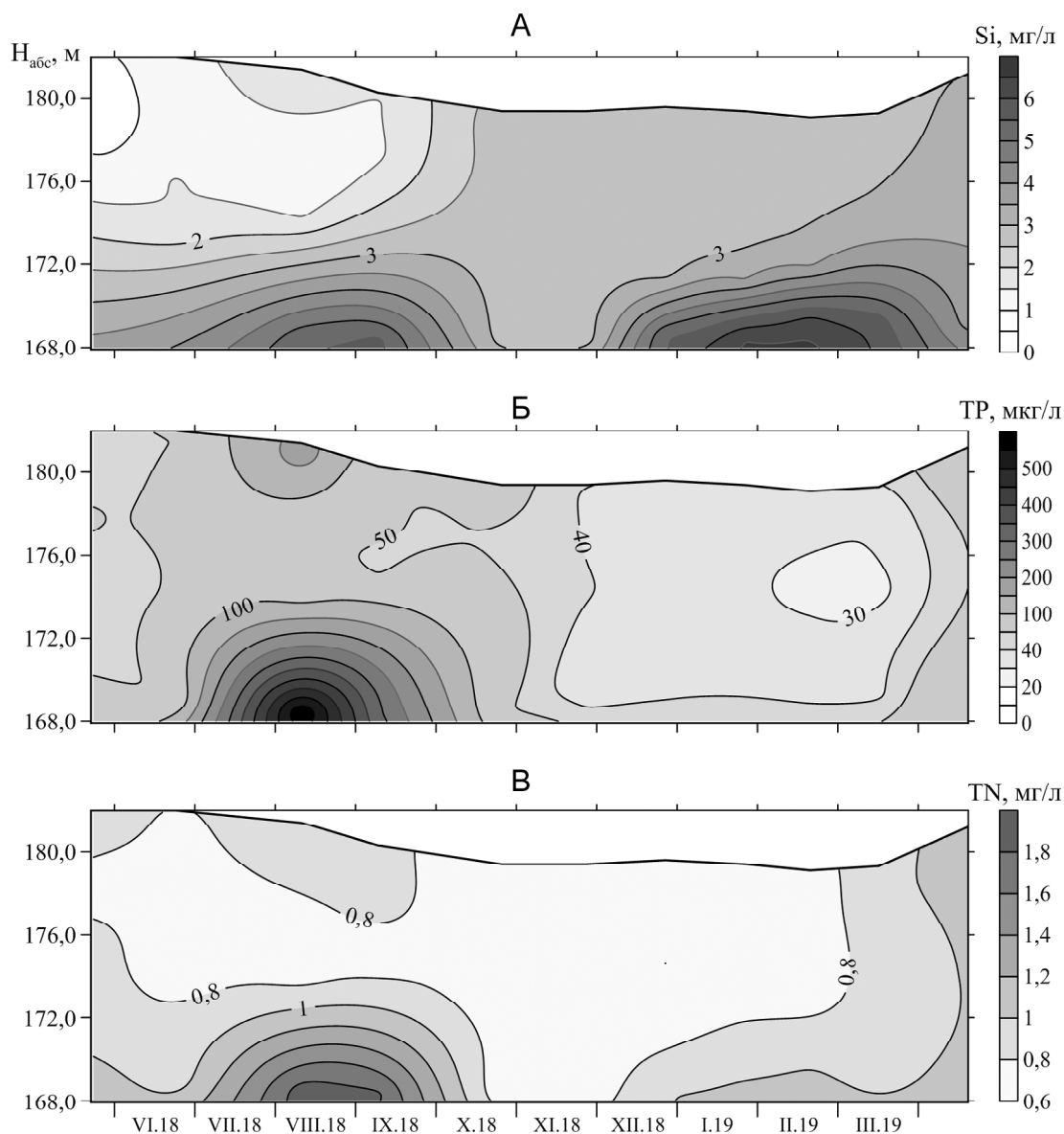


Рис. 2. Изменение вертикального распределения минерального кремния Si (А), общего фосфора TP (Б) и общего азота TN (В) на станции IV с мая 2018 г. по апрель 2019 г.

Fig. 2. Changes in the vertical distribution of mineral silicon Si (A), total phosphorus TP (Б) and total nitrogen TN (B) at the IV station in May 2018–April 2019

томой образуется локальный минимум содержания кремния, охватывающий почти весь эпилимнион в течение нескольких месяцев. С августа в видовом составе фитопланктона начинают преобладать синезеленые и другие водоросли, в результате чего запас кремния снова восполняется, и его концентрации возвращаются к фоновым значениям (примерно 3 мг/л).

Содержание валового фосфора в водохранилище за счет его высокой вовлеченности в биогеохимические циклы имеет выраженную сезонную динамику и может значительно изменяться между различными частями и горизонтами водохранилища. В основном концентрации фосфора в воде составляют несколько десятков мкг/л, максимальное за исследуемый период значение было отмечено в кон-

це августа 2018 года и составило более 600 мкг/л (см. рис. 2 Б).

Весной 2018 года в водохранилище наблюдалось равномерное распределение содержания валового фосфора с относительно малыми концентрациями: к маю они не превышали 80 мкг/л, в среднем составляя около 50 мкг/л. Возможными факторами, повлиявшими на весеннее содержание фосфора, могли стать низкое половодье и достаточно интенсивный режим сбросов воды Можайского гидроузла, что в совокупности могло привести к формированию в водохранилище однородной трансформированной зимне-весенней водной массы. Об отсутствии выраженного притока фосфора с половодьем свидетельствует также то, что распределение фосфора по длине водохранилища в мае было

почти полностью однородным, хотя при характерных для Можайского водохранилища скоростях водообмена ядро половодья может проследиваться в течение нескольких месяцев.

В эпилимнионе более высокие концентрации валового фосфора отмечались только во второй половине лета: в августе в поверхностном слое его содержание достигало 143 мкг/л, что можно объяснить перекачкой вод р. Колочи Колочским гидроузлом. В гипolimнионе при истощении кислорода в летний период содержание общего фосфора также возрастало за счет восстановления из донных отложений, в результате чего его концентрации достигали сотен мкг/л. Максимальная концентрация валового фосфора (более 600 мкг/л) была отмечена в августе 2018 года в центральной части водохранилища (станция IV). В целом на более глубоких станциях наблюдалось более высокое содержание фосфора у дна, за исключением приплотинного плеса (станция V), где вертикальная структура водных масс нарушалась вследствие динамического воздействия гидротехнических сооружений.

После осеннего перемешивания во всей водной толще водохранилища снова установилось достаточно однородное распределение содержания общего фосфора: с октября 2018 года по март 2019 года его концентрация находилась в пределах от 30 до 56 мкг/л.

Существование *различных форм фосфора* в воде Можайского водохранилища определяется генетической структурой притока, динамическими и синоптическими условиями, из-за чего их соотношение и распределение по водохранилищу может значительно меняться во времени. В весенний и летний периоды при развитии фитопланктона минеральный фосфор может почти полностью потребляться организмами и достигать концентраций менее 10 мкг/л во всем эпилимнионе (рис. 3 А). Доля органического фосфора таким образом возрастает до 70% и более. При этом за счет включения в тела планктонных организмов более половины фосфора оказывается во взвешенной форме. В период зимней межени, наоборот, 60–70% общего фосфора находится в минеральном виде, и почти весь он – в растворенной форме. Фосфор, выделяющийся из донных отложений в период аноксии, почти полностью минеральный, причем большая его часть задерживается мембранным фильтром 0,45 мкм даже на горизонтах, удаленных от дна. Вероятно, речь идет не о взвешенной, а о коллоидной форме, но для подтверждения этой гипотезы необходимо расширение методики анализа.

Содержание *общего азота* в целом подчинялось тем же закономерностям, что и валового фосфора. В зимнюю межень он достаточно однородно распределен по всему водохранилищу, характерные концентрации составляли в среднем 0,7 мг/л, у дна содержание азота могло возрастать до 1 мг/л (см. рис. 2 В). Летом 2018 г. максимальная концентрация общего азота у поверхности зафиксирована во время паводка и превысила 0,9 мг/л. В придонном же слое содержание общего азота возрастало до

1,8–1,9 мг/л за счет восстановления азота из донных отложений, причем интенсивность этого процесса на всех станциях была примерно одинакова.

Соотношение между *различными формами минерального азота* также значительно изменялось в течение года. В период зимней межени при низкой интенсивности продукционно-деструкционных процессов не только в речной, но и в водохранилищной водной массе преобладали нитраты: концентрация нитратного азота зимой 2018–2019 г. составляла 0,2–0,4 мг/л, что превышало содержание аммонийного азота в несколько раз, а иногда и на порядок (см. рис. 3 Б, В). Таким образом, доля нитратов в общем азоте в это время достигала 50%, а в минеральном – более 90%. Летом нитраты начинали активно потребляться планктонными организмами, их концентрации снижались до 0,01–0,1 мг/л, а доля органического азота возрастала до 70–90% и более. За счет протекающего параллельно процесса отмирания и разложения организмов, относительная доля аммонийного иона становилась выше, часто в 2–3 раза превышая содержание нитратов. Кратковременные изменения соотношения между нитратным и аммонийным азотом позволили проследить процессы интенсивного развития и отмирания планктона. В период аноксии в гипolimнионе почти не было нитратов, так как все они восстанавливались до аммонийного азота, но большая часть азота (около 70%) все еще была представлена органической формой.

Значительное снижение концентраций биогенных веществ в летний период поднимает вопрос о роли каждого из них в *лимитировании развития фитопланктона*. Дж. Хатчинсон приводил следующие критические концентрации, при которых элементы становятся лимитирующими: для фосфора – 10 мкг/л, для неорганического азота – 0,3 мг/л, для кремния – 0,5 мг/л [Hutchinson, 1967]. Содержание кремния в Можайском водохранилище за исследуемый период всегда находилось выше критического значения, но и фосфор, и азот часто оказывались ниже установленных Хатчинсоном и другими учеными пределов, что позволяет сделать вывод об ограничении развития фитопланктона в водохранилище недостаточным содержанием этих элементов. Существуют различные количественные критерии, позволяющие выделить лимитирующий элемент для водоема. Наиболее часто используется отношение общего азота к общему фосфору (TN:TP), при величине которого <10 развитие водорослей лимитирует азот, а при величине >17 – фосфор [Smith, 1982]. В вегетационный период 2018 г. отношение TN:TP в эпилимнионе составляло обычно 11–25, то есть наблюдалось лимитирование по фосфору или ко-лимитирование. В отдельных случаях (поверхностные слои водохранилища в августе 2018 г.), когда происходило почти полное потребление минерального азота, это соотношение снижалось до 5.

Если оценивать лимитирование с использованием минеральных форм веществ, наиболее доступных для микроорганизмов, т. е. использовать соот-

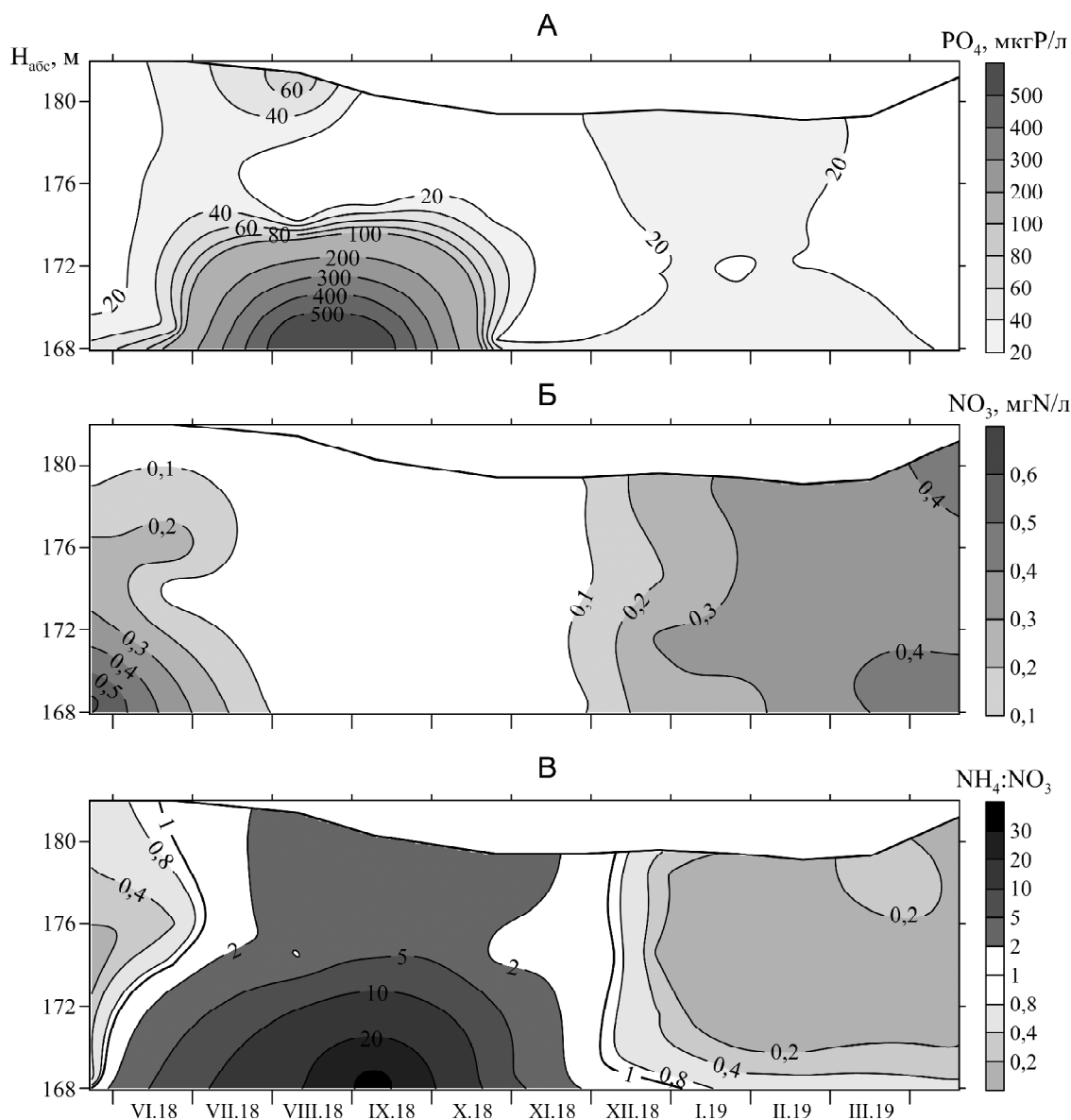


Рис. 3. Изменение вертикального распределения фосфора фосфатов PO₄ (А), азота нитратов NO₃ (Б) и соотношения между аммонийным и нитратным азотом NH₄:NO₃ (В) на станции IV с мая 2018 г. по апрель 2019 г.

Fig. 3. Changes in the vertical distribution of phosphate phosphorus PO₄ (A), nitrate nitrogen NO₃ (Б) and the ratio between ammonium and nitrate nitrogen NH₄:NO₃ (B) at the IV station in May 2018–April 2019

ношение нитратов и минерального фосфора (фосфатов), то результаты свидетельствуют о более выраженном лимитировании азотом. Отношение NO₃:PO₄ в водоеме за летний период 2018 г. составляло от 0,3 до 12, что может говорить о недостаточности минерального азота для оптимальной продуктивности фитопланктона.

Распределение характеристик по длине водохранилища часто оказывалось неравномерным из-за различных термических и динамических условий (рис. 4). Только весной при поступлении большого объема талых вод и активном динамическом перемешивании распределение биогенных веществ по длине водохранилища выравнивалось почти полностью, в теплый же период можно было выделить два участка, на которых происходили наиболее су-

щественные изменения. Первый участок находился между станциями II и III, где в летний период обычно располагается фронтальный раздел между речной и основной водохранилищной водными массами. За счет перехода к более благоприятным для развития фитопланктона условиям (отсутствие значительных скоростей течения, большая глубокководность), ниже фронтальной зоны содержание минерального азота в августе падало почти на 0,1 мг/л, содержание кремния – на 0,2–0,5 мг/л. Содержание азота между речной и основной водными массами изменялось незначительно.

Второй примечательный участок в продольном разрезе водохранилища – приплотинный (станция V). Здесь за счет сбросов воды снова усиливалось динамическое воздействие, в результате чего разви-

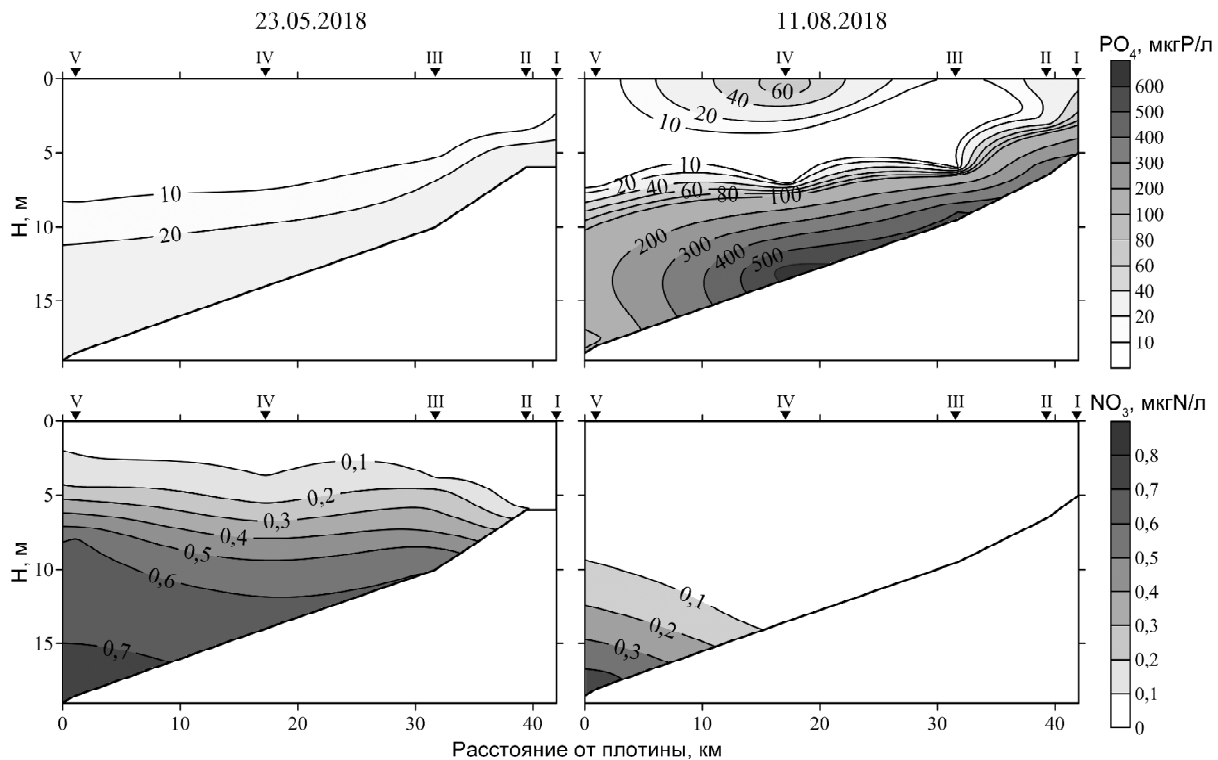


Рис. 4. Распределение концентрации фосфора фосфатов PO_4 и азота нитратов NO_3 по продольному профилю Можайского водохранилища в мае и августе 2018 г.

Fig. 4. Distribution of phosphate phosphorus PO_4 and nitrate nitrogen NO_3 concentrations along the longitudinal profile of the Mozhaysk reservoir in May and August 2018

тие планктонных организмов происходило не так интенсивно. Поэтому около плотины количество органического азота и фосфора значительно снижалось, за счет чего происходило уменьшение и валового содержания этих элементов. При этом в придонных горизонтах концентрации биогенных веществ могли оставаться значительными за счет их постоянного накопления.

Изменение биохимических условий по длине водохранилища и их внутригодовую динамику достаточно хорошо иллюстрирует соотношение нитратного и аммонийного азота. В мае почти по всей длине водохранилища сохранялось преобладание нитратов, т. е. в целом наблюдались окислительные условия. В придонных горизонтах приплотинной части это преобладание еще больше усиливалось за счет накопления нитратов, а в верховьях водохранилища соотношение двух форм минерального азота приближалось к равновесному за счет низкого содержания нитратов в меженных речных водах. В августе в условиях интенсификации продукционно-деструкционных процессов в эпилимнионе и значительного истощения запасов кислорода в гиполимнионе картина принципиально менялась. Почти во всей толще воды в это время отмечалось существенное преобладание аммонийного азота: в придонных слоях его концентрации превышали содержание нитритов в 15 и более раз, в поверхностных слоях – обычно в 2–3 раза. В верховьях водохранилища доля аммонийного азота была еще выше.

Окислительные условия сохранялись лишь на небольшом участке водохранилища в поверхностном горизонте, а также на приплотинной вертикали: здесь низкая степень развития фитопланктона позволяла поступающим органическим и минеральным соединениям азота нитрифицироваться, в результате чего в минеральном азоте снова преобладала нитратная форма.

Большой интерес представляет сопоставление полученных данных с историческим периодом. Несмотря на огромную важность подобных работ в гидроэкологических исследованиях водоемов, за весь период существования Можайского водохранилища подробные съемки, направленные на изучение внутригодовой динамики биогенных веществ, проводились лишь несколько раз. Последние наиболее подробные данные относятся к 1984 г., когда по длине водохранилища ежемесячно отбирали пробы, в которых определяли содержание минерального и общего фосфора, нитратного, нитритного, аммонийного и общего азота [Комплексные исследования ..., 1979].

В таблице сопоставлены данные съемок 1984 г. с результатами наших работ, проведенных в 2018 г. Несмотря на близкую водность обоих лет, в динамике биогенных веществ наблюдаются существенные различия.

Содержание как валового, так и минерального фосфора в оба года в основном было почти одинаково: в поверхностном слое содержание минераль-

Т а б л и ц а

Содержание биогенных веществ в центральном районе Можайского водохранилища (станция IV) в 1984 и 2018 гг.

Показатель	Год	Концентрации, мг/л				
		февраль	май	июнь	август	сентябрь
поверхностный слой						
P _{мин}	1984	0,054	0,037	0,038	0,036	0,063
	2018	0,042	0,002	0,028	0,075	0,004
P _{общ}	1984	0,049	0,048	0,050	0,049	0,110
	2018	0,055	0,040	0,051	0,173	0,055
NO ₃	1984	0,64	0,33	0,49	0,01	0,08
	2018	0,29	0,07	–	0,02	0,05
NH ₄	1984	0,31	0,22	0,13	0,14	0,32
	2018	0,12	0,04	0,17	0,06	0,18
N _{общ}	1984	2,25	2,94	2,65	2,98	3,12
	2018	–	0,82	0,78	0,91	0,84
придонный слой						
P _{мин}	1984	0,027	0,029	0,095	0,326	0,044
	2018	0,052	0,036	0,048	0,642	0,600
P _{общ}	1984	0,011	0,033	0,120	0,343	0,054
	2018	0,076	0,062	0,056	0,642	0,600
NO ₃	1984	0,35	0,28	0,46	0,00	0,13
	2018	0,22	0,63	–	0,03	0,02
NH ₄	1984	0,99	0,23	0,57	1,30	0,26
	2018	0,04	0,10	–	0,51	0,63
N _{общ}	1984	2,54	2,58	2,06	3,12	2,17
	2018	–	1,07	0,90	1,91	1,83

ного фосфора составляло до 63 мкг/л, валового – до 173 мкг/л. Разница отмечается только в более полном потреблении минерального фосфора в мае и сентябре 2018 г. по сравнению с соответствующими месяцами 1984 г. В 2018 г. его концентрации опускались ниже 5 мкг/л, в то время как в 1984 г. содержание фосфатов составляло не менее 20 мкг/л в течение всего года. В придонном слое в оба года наблюдалось значительное повышение содержания минерального и общего фосфора в летний период, связанное с его восстановлением из донных отложений. Различными были величины результирующей внутренней фосфорной нагрузки: если в 1984 г. максимальная измеренная концентрация фосфора в придонном слое составляла 343 мкг/л, то в 2018 г. это значение было почти вдвое выше – 642 мкг/л. По всей видимости, это связано с более продолжительной и устойчивой стратификацией в 2018 г., в результате чего обмен придонных слоев с другими частями водохранилища был более затруднен. Так-

же более продолжительным в 2018 г. был период придонной аноксии: в отличие от 1984 г., в сентябре еще не произошло перемешивания водной толщи, в результате чего дольше происходило дополнительное поступление фосфора из донных отложений в придонные воды.

Значительные изменения коснулись и содержания азота и его отдельных форм. Среднее содержание минерального азота в воде Можайского водохранилища в 1984 г. составляло около 0,5 мг/л, в 2018 г. – менее 0,3 мг/л. В отдельные периоды 2018 г. содержание минерального азота было до 4,7 раз ниже по сравнению с 1984 г. Концентрация валового азота в 2018 г. оказалась в среднем в 3,5 раза ниже в поверхностном слое и в 1,2–2,4 раза в придонном. Таким образом, можно заключить, что в 1984 г. внешнее поступление азота в водоем – как минерального, так и органического – было значительно выше. Наиболее вероятной причиной этого представляется изменение в структуре земледель-

зования на водосборе Можайского водохранилища. За последние десятилетия в центральной части Европейской территории России произошло сокращение площадей пашни и посевных земель, сопровождаемое значительным снижением использования минеральных и органических удобрений [Мухин, 2012]. Результатом этого стало уменьшение смыва азота с сельскохозяйственных земель. При этом снижение внешней азотной нагрузки на Можайское водохранилище несколько компенсировалось повышением внутренней, так как усиление стратификации повлияло на придонные концентрации азота так же, как на концентрации фосфора.

Выводы:

– в летний период более 70% минерального фосфора и азота потребляется микроорганизмами (концентрации фосфатов и нитратов могут снижаться вплоть до аналитического нуля), в результате чего оба элемента лимитируют первичную продукцию в водоеме. В зимний межледный период оба элемента представлены преимущественно растворенной минеральной формой, их содержание в воде возрастает;

– в летний период для водохранилища характерна значительная неоднородность в распределении биогенных веществ, обусловленная различием гидродинамических условий. Ниже фронтального раздела между речной и основной водохранилищной водными массами за счет перехода к более благоприятным для развития фитопланктона условиям (отсутствие значительных скоростей течения, большая глубокководность) в течение всего лета усиливается вертикальная неоднородность содержания минерального фосфора и кремния. В приплотинном участке из-за сбросов воды в нижний бьеф создаются неблагоприятные условия для планктонных организмов, что приводит к значительному сниже-

нию концентраций органического азота и фосфора и, как следствие, уменьшению и валового содержания биогенных веществ;

– с мая по август в результате интенсификации продукционно-деструкционных процессов в эпилимнионе и значительного истощения запасов кислорода в гиполимнионе в водохранилище происходит постепенная смена окислительных условий на восстановительные, меняется соотношение содержания нитратного и аммонийного азота. Окислительные условия сохраняются у плотины, где низкая степень развития фитопланктона способствует нитрификации поступающих органических и минеральных соединений азота;

– в вегетационный период 2018 г. отношение TN:TP в эпилимнионе свидетельствовало о лимитировании продуктивности по фосфору или ко-лимитировании фосфора с азотом. Если оценивать лимитирование с использованием наиболее доступных для микроорганизмов минеральных форм веществ, то отношение $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ свидетельствовало о недостаточности минерального азота для оптимальной продуктивности фитопланктона в водохранилище;

– сравнение с данными 1984 г. показало значительное снижение концентрации минерального азота в водохранилище, что связано с уменьшением его смыва с сельскохозяйственных земель на водосборе. В то же время, современные данные указывают на более интенсивное восстановление биогенных элементов из донных отложений, связанное с большей устойчивостью стратификации и увеличением продолжительности придонной аноксии. Таким образом, внутренняя биогенная нагрузка в настоящее время становится более важным фактором формирования качества воды в источниках питьевого водоснабжения г. Москвы по сравнению с внешней.

Благодарности. Полевые работы и лабораторные определения выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30004), оценка влияния речного притока на режим биогенных веществ в водохранилище выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00087 а), анализ многолетних колебаний режима биогенных элементов выполнен при финансовой поддержке проекта РГО «Москва-река от истоков до устья: гидролого-геохимическая оценка экологического состояния».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / под ред. П.А. Лозовика, Н.А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.

Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.

Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3. Можайское водохранилище. М.: МГУ, 1979. 467 с.

Мухин Г.Д. Эколого-экономическая оценка трансформации сельскохозяйственных земель европейской территории России в 1990–2009 гг. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2012. № 5. С. 1–27.

ПНД Ф 14.1:2:4.132-98. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионов: нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и

фосфата в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии.

ПНД Ф 14.1:2:4.215-06. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации кремниевой кислоты (в пересчете на кремний) в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом в виде желтой кремнемолибденовой гетерополикислоты.

РД 52.10.738-2010. Массовая концентрация фосфатов в морских водах. Методика измерений фотометрическим методом.

РД 52.10.739-2010. Массовая концентрация общего фосфора в морских водах. Методика измерений фотометрическим методом после окисления персульфатом калия.

Соколов Д.И., Ерина О.Н., Эдельштейн К.К. Изменчивость гидролого-гидрохимических показателей в стратифицирован-

ном водохранилище // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 5. С. 61–68.

Hutchinson G.F. A Treatise of Limnology. Vol. 2. Introduction to Lake Biology and Limnoplankton. N.Y.: Wiley, 1967. 115 p.

Soranno P.A., Carpenter S.R., Lathrop R.C. Internal phosphorus loading in Lake Mendota: response to external loads and weather. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, vol. 54(8), p. 1883–1893.

North R.P., North R.L., Livingstone D.M., Köster O., Kipfer R. Long term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Global change biology*, 2014, vol. 20(3), p. 811–823.

Sahoo G.B., Schladow S.G. Impacts of climate change on lakes and reservoirs dynamics and restoration policies. *Sustainability Science*, 2008, vol. 3(2), p. 189–199.

Smith V.H. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: an empirical and theoretical analysis. *Limnol. Oceanogr.*, 1982, vol. 23, p. 1248–1255.

Sterner R.W. On the phosphorus limitation paradigm for lakes. *International Review of Hydrobiology*, 2008, vol. 93(4–5), p. 433–445.

Wilhelm S., Adrian R. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton. *Freshwater Biology*, 2008, vol. 53(2), p. 226–237.

Поступила в редакцию 12.08.2019

После доработки 20.09.2019

Принята к публикации 20.12.2019

**O.N. Erina¹, M.A. Tereshina²,
L.E. Efimova³, D.I. Sokolov⁴**

ACTUAL DYNAMICS OF NUTRIENTS IN THE MOZHAYSK RESERVOIR

The paper deals with the seasonal dynamics of nutrients in the Mozhaysk reservoir in 2018/2019. The factors of seasonal variability of the vertical distribution of nitrogen, phosphorus and mineral silicon compounds are considered basing of monthly measurements.

The regime of nutrients in the Mozhaysk reservoir and the ratio of their various forms is largely determined by the formation and duration of the density stratification of water. During hypoxia phosphorus and ammonium are recovered from the bottom sediments. By the end of summer nitrates and dissolved mineral phosphorus are almost completely consumed by algae in the epilimnion. During the growing season organic phosphorus occur mainly in suspended form within the phytoplankton cells. Mineral silicon is actively consumed in May during the development of diatoms, while in the hypolimnion its concentration is stable throughout the period of stratification. Longitudinal heterogeneity in the nutrient content is caused by both the mixing conditions, and the varying genesis of water mass in a particular area of the reservoir.

It is shown that over the past 30 years the internal nutrient load in the reservoir has increased as a result of increasing duration of density stratification and, as a consequence, the period of anoxia. At the same time, the input of nitrogen and phosphorus compounds to the reservoir with rivers has decreased as a result of land-use change.

Key words: water quality, eutrophication, nutrients, reservoir

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 19-77-30004), the Russian Foundation for Basic Research (project № 19-05-00087-a), and the Russian Geographical Society (project «The Moskva River from the source to the mouth: hydrological and geochemical assessment of the environmental state»).

REFERENCES

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике [Analytical, kinetic and calculational methods in hydrochemical practice]. Ed. P.A. Lozovik, N.A. Efremenko, St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2017, 272 p. (In Russian)

Datsenko Ju.S. Evtrofirovaniye vodohranilishh. Gidrologo-gidrohimiicheskie aspekty [Eutrophication of reservoir. Hydrological and chemical aspects], Moscow, GEOS Publ., 2007, 252 p. (In Russian)

Hutchinson G.F. A Treatise of Limnology. Vol. 2. Introduction to Lake Biology and Limnoplankton. N.Y.: Wiley, 1967, 115 p.

Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3. Можайское водохранилище [Comprehensive reservoir study. Vol. 3. The Mozhaysk Reservoir], Moscow, MGU Publ., 1979, 467 p. (In Russian)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Krasnovidovo Research Station, Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail:* oxana.erina@geogr.msu.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Krasnovidovo Research Station, Engineer; *e-mail:* martereshina@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail:* ef_river@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Krasnovidovo Research Station, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; *e-mail:* Dmitry.Sokolov@yandex.ru

Muhin G.D. Ekologo-ekonomicheskaja ocenka transformacii sel'skohozyajstvennyh zemel' evropejskoj territorii Rossii v 1990–2009 gg. [Ecological and economical assessment of the agricultural land transformation in European Russia in 1990–2009]. *Vestn. Mosk. un-ta.*, Ser. 5, Geogr., 2012, vol. 5, p. 1–27. (In Russian)

North R.P., North R.L., Livingstone D.M., Köster O., Kipfer R. Long term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Global change biology*, 2014, vol. 20(3), p. 811–823.

PND F 14.1:2:4.132-98. Kolichestvennyj himicheskij analiz vod. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj koncentracii anionov: nitrita, nitrata, hlorida, florida, sul'fata i fosfata v probah prirodnoj, pit'evoj i stochnoj vody metodom ionnoj hromatografii [Quantitative chemical analysis of water. Methods for measuring the mass concentration of anions: nitrite, nitrate, chloride, fluoride, sulfate and phosphate in samples of natural, drinking and waste water using ion chromatography]. (In Russian)

PND F 14.1:2:4.215-06. Kolichestvennyj himicheskij analiz vod. Metodika izmerenij massovoj koncentracii kremnekisloty (v pereschete na kremnij) v pit'evyh, poverhnostnyh i stochnyh vodah fotometričeskim metodom v vide zheltoj kremnemolibdenovoj geteropolikisloty [Quantitative chemical analysis of water. The method of measuring the mass concentration of silicic acid (in terms of silicon) in drinking, surface and waste water using photometric method in the form of yellow silicon-molybdenum heteropolyacid]. (In Russian)

RD 52.10.738-2010. Massovaja koncentracija fosfatov v morskijh vodah. Metodika izmerenij fotometričeskim metodom

[Mass phosphate concentration in seawater. Measurement technique using photometric method]. (In Russian)

RD 52.10.739-2010. Massovaja koncentracija obshhego fosfora v morskijh vodah. Metodika izmerenij fotometričeskim metodom posle okislenija persul'fatom kalija [Mass concentration of total phosphorus in seawater. Measurement technique using photometric method after oxidation with potassium persulphate]. (In Russian)

Sahoo G.B., Schladow S.G. Impacts of climate change on lakes and reservoirs dynamics and restoration policies. *Sustainability Science*, 2008, vol. 3(2), p. 189–199.

Smith V.H. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: an empirical and theoretical analysis. *Limnol. Oceanogr.*, 1982, vol. 23, p. 1248–1255.

Sokolov D.I., Erina O.N., Edel'shtejn K.K. Izmenchivost' gidrologo-gidrohimicheskijh pokazatelej v stratificirovannom vodohranilishhe [Variability of hydrological and chemical parameters in a stratified reservoir]. *Vestn. Mosk. un-ta.*, Ser. 5, Geogr., 2016, vol. 5, p. 61–68. (In Russian)

Soranno P.A., Carpenter S.R., Lathrop R.C. Internal phosphorus loading in Lake Mendota: response to external loads and weather. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, vol. 54(8), p. 1883–1893.

Sterner R.W. On the phosphorus limitation paradigm for lakes. *International Review of Hydrobiology*, 2008, vol. 93(4–5), p. 433–445.

Wilhelm S., Adrian R. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton. *Freshwater Biology*, 2008, vol. 53(2), p. 226–237.

Received 12.08.2019

Revised 20.09.2019

Accepted 20.12.2019