

М.А. ТЕРЕШИНА, Л.Е. ЕФИМОВА, О.Н. ЕРИНА,
Е.А. ВИЛИМОВИЧ, В.А. ЕФИМОВ, Д.И. СОКОЛОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

СООТНОШЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ФОСФОРА В ВОДЕ ОЗЕР КЕРЖЕНСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

ВВЕДЕНИЕ

Керженский заповедник, расположенный в центральной части Нижегородской области, включает в себя уникальный комплекс среднетаежных лесов и сопутствующих им водно-болотных угодий, представляя огромный интерес для множества естественнонаучных исследований. В пределах долины р. Керженца, ограничивающей заповедник с запада, сформировался уникальный ландшафт, в пределах которого находится множество пойменных озер с различными геоморфологическими условиями, что определяет огромное разнообразие в их гидроэкологическом режиме. При этом нахождение этих озер в пределах охраняемой природной территории позволяет приравнивать их к объектам с фоновыми условиями. Эти водоемы можно считать репрезентативными для достаточно специфичных гидролого-гидрохимических условий центральной части ЕТР, характеризующихся высоким содержанием железистых соединений и органического вещества (Efimova et al., 2016).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В 2017 и 2018 гг. нами был проведен ряд гидролого-гидрохимических исследований на двух озерах заповедника – Круглом и Нижнем Рустайском, – расположенных соответственно в центральной и приустьевой частях пойменно-руслового комплекса р. Керженца. Эти озера входят в число водных объектов заповедника, на которых в течение уже более 20 лет проводятся сравнительно регулярные наблюдения за уровнем, гидрологическим и гидрохимическим режимом (Ефимова и др., 2017). В 2017 г. работы на озерах проводились в мае, июле и октябре, в 2018 г. – каждый месяц с июня по октябрь, в результате чего были получены сведения о сезонной динамике различных показателей экологического состояния озер.

В рамках наших работ был сделан упор на трофический статус озер, и одним из ключевых параметров стало содержание различных форм фосфора – одного из основных биогенных элементов, часто лимитирующего биологическую продуктивность водоемов. Основным отличием от предшествующих гидрохимических исследований на выбранных озерах стал более расширенный анализ различных форм фосфора, в результате которого можно рассмотреть разницу не только между органическими и минеральными формами фосфора, но и между взвешенной и растворенной его частями.

При анализе часть отобранной воды пропусклась через мембранные фильтры (диаметр пор 0,45 мкм), что позволяло оценивать содержание растворенных форм фосфора, взвешенная же фракция определялась как разница между содержанием фосфора в нефльтрованной и фильтрованной пробах. Концентрации ортофосфатов (принимаемая за содержание минерального фосфора) и валового фосфора определялись методом Морфи-Райли (РД 52.10.738-2010, РД 52.10.739-2010), содержание органического фосфора – как разница между валовым и минеральным фосфором. Таким образом, всего в полученных результатах можно выделить девять форм фосфора, которые далее будут обозначаться следующим образом: растворенный мине-

ральный – DIP, взвешенный минеральный – PIP, растворенный органический – DOP, взвешенный органический – POP, общий органический – TOP, общий минеральный – TIP, общий растворенный – TDP, общий взвешенный – TPP, общий нефильтрованный (валовый) – TP.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Отличительной особенностью обоих озер является очень низкое содержание минерального фосфора: за исключением придонных горизонтов, величина TIP в отобранных пробах крайне редко превышала значения в 10–15 мкг/л. Для оз. Круглого, имеющего гидравлическую связь с р. Керженцом только при максимальных уровнях воды в реке, характерны меньшие величины минерального фосфора, чем для оз. Нижнего Рустайского, расположенного ближе к руслу реки. При этом содержание валового фосфора в озерах может оказываться достаточно значительным. В 2017–2018 гг. доля минеральной формы фосфора (отношение TIP/TP) в оз. Нижнем Рустайском составляла в среднем около 20% от его общего содержания, часто опускаясь до 10% и ниже (рис. 1). Для поверхностных горизонтов оз. Круглого это значение, как правило, оказывалось еще ниже: среднее значение TIP/TP составило 8%. Основными причинами малой доли минеральных форм фосфора можно считать низкое поступление фосфора с водосбора, высокое содержание трудноокисляемых органических веществ и недостаток кислорода, необходимого для окисления (Баянов, Кривдина, 2013).

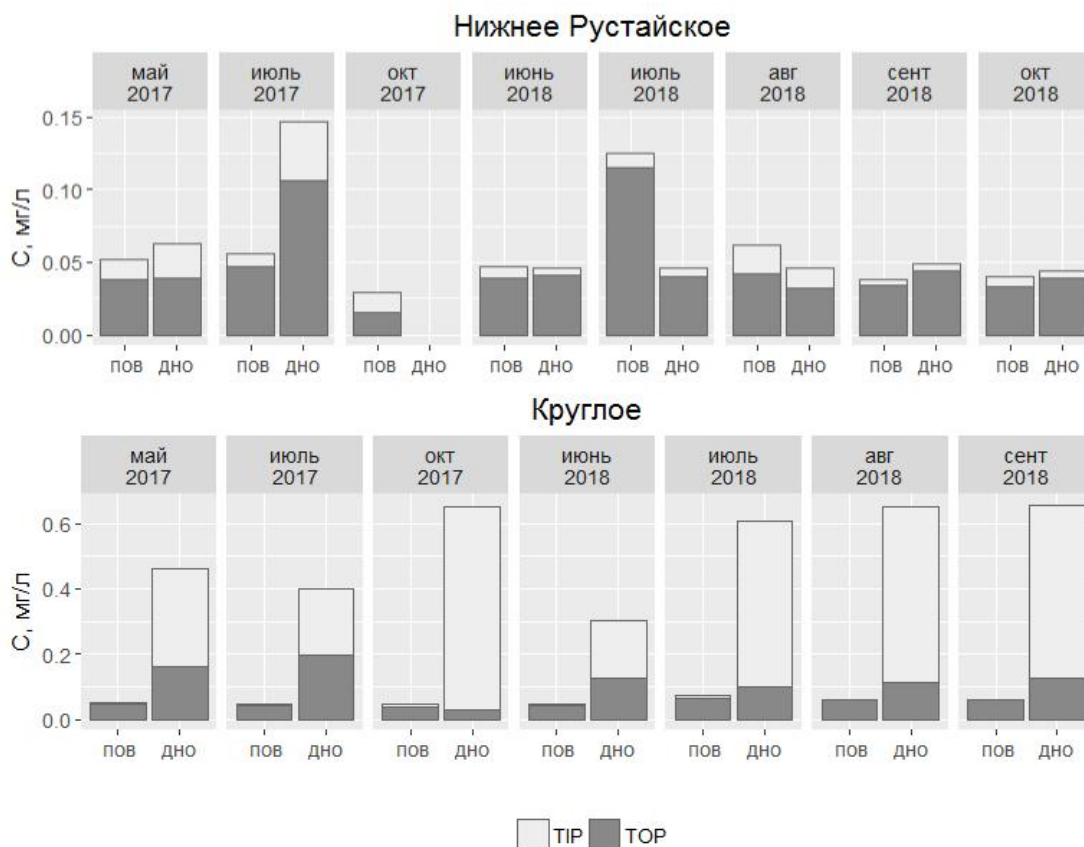


Рис. 1. Содержание минерального (TIP) и органического (TOP) фосфора в поверхностном и придонном горизонтах оз. Нижнего Рустайского и Круглого в 2017–2018 гг.

Содержание органического фосфора в озерах в целом выше: для оз. Нижнего Рустайского и поверхностных горизонтов оз. Круглого среднее значение TOP составляло около 40–50 мкг/л. Основная часть органического фосфора находится в

водах обоих озер во взвешенном состоянии. Соотношение P_{OP}/P_{OP} в водах оз. Нижнего Рустайского и Круглого за 2017–2018 гг. в среднем составило около 75%, иногда достигая почти 100%. Это можно объяснить двумя причинами: фотосинтетической активностью фитопланктона и наличием железо-связанного фосфора с гумусовыми веществами в гумидных водах (Рыжаков и др., 2016).

Придонный горизонт оз. Круглого характеризуется совершенно другими гидроэкологическими условиями, чем его поверхностный горизонт и оз. Нижнее Рустайское. Крайне устойчивая стратификация приводит к тому, что озеро почти не перемешивается до дна, в результате чего формируется обширная зона аноксии, иногда сохраняющаяся даже в то время, когда на других озерах наблюдается гомотермия. В условиях отсутствия кислорода происходит восстановление фосфора из донных отложений. Оно проявляется в резком увеличении придонных концентраций фосфора: в среднем придонные значения TP составляют около 470 мкг/л, достигая 800 мкг/л, причем доля минерального фосфора поддерживается на уровне до 80% и более. Также в придонном горизонте заметен и сдвиг с выраженного преобладания взвешенных форм фосфора к относительно равномерному разделению между двумя формами (рис. 2). При этом в 2018 г. придонные концентрации фосфора оказались выше, чем в 2017 г., что можно объяснить более высокой скоростью восстановления его из донных отложений в более теплом 2018 г., когда наблюдался заметно больший прогрев придонных водных масс (более 8 °С по сравнению с 5 °С в 2017 г.).

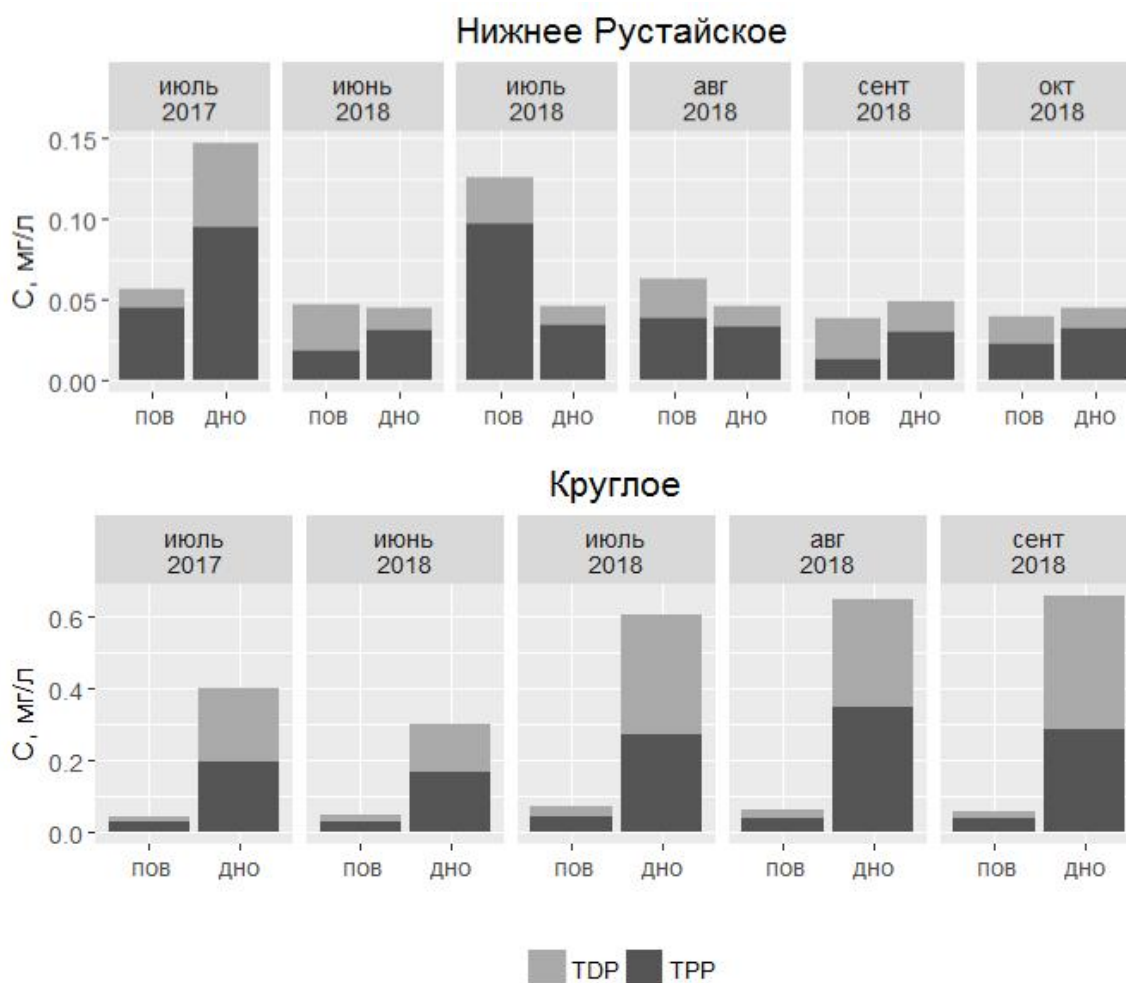


Рис. 2. Содержание взвешенного (TDP) и растворенного (TPP) фосфора в поверхностном и придонном горизонтах оз. Нижнего Рустайского и Круглого в 2017–2018 гг.

Для оз. Нижнего Рустайского внутригодовая динамика как собственно содержания минерального и органического фосфора, так и соотношения между их взвешенными и растворенными формами прослеживается достаточно слабо (рис. 2). В течение всего рассматриваемого периода содержание минерального фосфора остается низким и представлено в основном его растворенной формой, а органический фосфор наблюдается в более высоких концентрациях и представлен в основном взвешенной фракцией. Различия между придонными и поверхностными значениями также обычно невелики. Среди всех отобранных проб только две заметно отклоняются от этой тенденции. В июле 2017 г. в оз. Нижнем Рустайском наблюдалось заметное увеличение придонных концентраций как минерального, так и органического фосфора (до 41 и 106 мкг/л соответственно). Возможным объяснением этого события является вероятно более активный обмен придонных вод озера с р. Керженцем, так как в этот период в реке действительно наблюдался повышенный уровень воды. Эту гипотезу можно подтвердить и данными по электропроводности воды в придонном слое озера: в июле 2017 г. она имела значение 228 мкСм/см, в то время как в 2018 г. ее величина составляла около 300 мкСм/см, то есть можно ожидать большей роли р. Керженца в подпитке глубинных слоев фосфором. Восстановление фосфора из донных отложений в оз. Нижнем Рустайском не представляется вероятным, так как дно озера сложено заиленными песками, не очень богатыми органическим веществом.

Другое выдающееся событие – резкое увеличение содержания органического фосфора в поверхностном слое оз. Нижнего Рустайского в июле 2018 г. до 115 мкг/л – связано с повышенной фотосинтетической активностью водорослей, что подтверждается перенасыщением поверхностного слоя кислородом (до 130% по сравнению с 70% насыщения, наблюдаемыми в 2017 г.). Отношение DOP/POP с этом месяце составило 97%. Развитие водорослей, вероятно, поддерживалось и дополнительным поступлением минерального фосфора с водосбора и через связь с р. Керженцем во время проходивших в июле-августе дождей, и в августе 2018 г. увеличение содержания взвешенного органического фосфора оставалось заметным.

Для поверхностного слоя оз. Круглого также характерна достаточно однородная картина распределения разных форм фосфора в течение периода измерений. Минерального фосфора в течение всего периода измерений крайне мало (не более 5 мкг/л), органический фосфор содержится в пределах 37–66 мкг/л. Органический фосфор представлен на 60–90% взвешенной формой, как и в оз. Нижнем Рустайском.

В придонной зоне оз. Круглого в течение года наблюдается накопление фосфора, в основном за счет минеральной формы, обусловленное непрерывным восстановлением фосфора из донных отложений в течение теплого сезона.

Выводы

Различная степень связи озер Нижнего Рустайского и Круглого с р. Керженцем, а также особенности их трофического статуса и режима перемешивания, приводят к формированию двух разных режимов динамики содержания фосфора.

Озеро Нижнее Рустайское за счет своего более близкого к руслу положения получает больше биогенных веществ из реки, в результате чего имеет больше возможностей для развития фитопланктона. Сравнительно неизменное во времени и однородное по глубине распределение между различными формами фосфора нарушается в основном при специфических гидрометеорологических условиях, провоцирующих увеличенное поступление аллохтонного фосфора или усиленное развитие фитопланктона.

Озеро Круглое, не имея постоянной связи с речными водами, более ограничено во внешнем притоке минерального фосфора. Поверхностные концентрации различных форм фосфора в этом озере за период наблюдений были достаточно стабильны. В придонной зоне озера Круглого наблюдается постоянная аноксия, в результате чего из

донных отложений восстанавливается большое количество минерального фосфора. Содержание фосфора в придонном горизонте растет в течение теплого сезона и может изменяться от года к году в зависимости от гидрометеорологических условий, определяющих температуру воды.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект 18-35-00691 мол а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баянов Н.Г., Кривдина Т.В. Межсезонная динамика гидролого-гидрохимических показателей река Керженец и ее стариц // Изв. РАН. Сер. географическая. 2013. № 2. 2013. С. 52-67.

Ефимова Л.Е., Ерина О.Н., Ефимов В.А., Ломова Д.В., Соколов Д.И. Гидрохимические показатели в водах заповедника «Керженский»: особенности и сезонная изменчивость // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Тр. VI Всерос. симпоз. с международ. участием. Барнаул, 2017. С. 84-90.

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.

Рыжаков А.В., Зобкова М.В., Лозовик П.А. Особенности содержания и распределения форм фосфора в водоемах гумидной зоны // Тр. Карельск. НЦ РАН. 2016. № 9. С. 33-45.

Efimova L.E., Korabliova O.V., Lomova D.V. Landscape dynamics and lakes hydrology of Kerzhenets River floodplain // Riparian Zones: characteristics, management practices and ecological impacts. Toulouse, 2016. Pp. 125-148.