

УДК [556.5:550.4]+627.17(470.24)

Л.Е. Ефимова¹, Е.С. Повалишникова², Е.В. Терская³, Н.Л. Фролова⁴, Д.В. Ломова⁵

ГИДРОХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА ВАЛДАЙСКИЙ

На территории национального парка Валдайский исследованы особенности режима водных объектов озерно-речной системы Боровно–Разлив, механизм формирования стока растворенных минеральных и органических веществ, обменные процессы придонных вод с грунтами в разные сезоны года. Рассмотрено современное гидроэкологическое состояние водных объектов с учетом особых условий природо- и водопользования в этом регионе. По результатам исследований предложены оптимальные сроки проведения дальнейших наблюдений на озерах системы Боровно–Разлив и других озерах национального парка.

Ключевые слова: мониторинг, гидроэкологическое состояние, особо охраняемые природные территории.

Введение. Исследование пространственно-временной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик водных объектов в пределах особо охраняемых природных территорий (ООПТ) – важная как в научном, так и в практическом отношении задача для выявления особенностей водного режима рек и озер, механизма формирования стока растворенных веществ в разных природных условиях и значимости отдельных факторов их формирования. Исследованные водоемы расположены в пределах северной части территории национального парка (НП) Валдайский, мало подверженной антропогенному воздействию, что дает возможность составить представление о гидроэкологическом состоянии водных объектов региона.

Многие российские ООПТ недостаточно изучены в гидрологическом и лимнологическом отношении, не имеют обоснованной программы мониторинга водных объектов территории. Наблюдения за фоновым состоянием рек и озер по программе режимных наблюдений проводятся в биосферных заповедниках, однако публикуемые в сборниках «Летопись природы» материалы не всегда доступны. Параметризация данных, освещающих сезонную и межгодовую изменчивость характеристик водных экосистем в пределах ООПТ, разработка системы гидрологического и гидрохимического мониторинга освещены в работах [Гордеева и др., 2006; Баянов, 1997; Ефимова, Фролова, 2013; Повалишникова и др., 2013; Баянов, Кораблева, 2014; Шварева и др., 2014].

Данные о природных особенностях изменения гидрологических и гидрохимических характеристик водных объектов, полученные в ходе их мониторинга, задают значения параметров, при которых обес-

печиваются безопасность и нормальное существование водных экосистем. К важным результатам мониторинга относятся также выявление неблагоприятных тенденций в динамике природных комплексов, определение их причин и прогноз последствий. Отсутствие на рассматриваемой территории постоянной сети наблюдений не только за гидрохимическими, но и гидрологическими характеристиками водных объектов повышает значимость комплексных детальных экспедиционных исследований [Ефимова, Фролова, 2013].

Маловодные годы отличаются продолжительными периодами жаркой и безоблачной погоды, устойчивой стратификацией водной толщи, обильным цветением водорослей и формированием зон аноксии. В многоводные годы особенно велик приток органических и минеральных биогенных веществ с водосбора. Средние по водности условия соответствуют некоторому нормальному функционированию озерной экосистемы. Цель исследований – определение параметров, наиболее полно характеризующих гидроэкологическое состояние водных объектов в различных гидрометеорологических условиях.

Исследования проведены на озерно-речной системе Боровно–Разлив в северной части национального парка, наименее подверженной антропогенному воздействию. Она представляет собой объединенные гидрографической сетью группы озер, расположенных в пределах одного водосборного бассейна. Озера замыкаются гидротехническими сооружениями, которые позволяют регулировать сток воды и использовать их водные ресурсы для хозяйственно-бытовых и промышленных целей.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: ef_river@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: almond_a@mail.ru

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

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: frolova_nl@mail.ru

⁵ Институт водных проблем РАН, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: florainter@mail.ru

Оз. Разлив (водохранилище Боровновской ГЭС), сформировавшееся из озер Разлив, Белое и Боручье, замыкается плотиной со сбросом воды по деривационной схеме в оз. Боровно. В 1925 г. при строительстве Боровновской ГЭС в оз. Разлив был искусственно направлен сток верховьев р. Шегринка. Основные притоки водохранилища – реки Шегринка и Вережка. В оз. Разлив условно можно выделить два плеса (мелководный – озера Разлив и Боручье) и глубокий приплотинный (оз. Белое).

В оз. Боровно впадают 6 рек, воды водохранилища Боровновской ГЭС через озера Островёнок – Плотиценко и протоку Вешка, а также сток цепочки озер Беляевское–Волосно–Легоща. Сток из оз. Боровно осуществляется через р. Боровна, зарегулированную на расстоянии 1,8 км ниже истока Горнешенской плотиной. Озеро можно разделить на три плеса – северный, центральный и южный, связанные между собой узкими протоками, южный плес обособлен больше. Северный плес озера соединен с озерами Перестово и Конино.

Материалы и методы исследований. В течение 5 лет (2010–2014) силами преподавателей и студентов кафедры гидрологии суши в разные сезоны года на озерах Боровно, Разлив, Плотиценко, в протоках, соединяющих эти озера, и на основных притоках озер (реки Шегринка, Боровна, Клетна, Вережка) проводились комплексные гидролого-гидрохимические исследования. Всего отобрано около 150 проб воды и грунта, в которых выполнено более 1000 элементоопределений. Период наблюдений включал в себя два аномально маловодных года (2010 и 2014), год повышенной водности (2013) и два средних по водности года (2011 и 2012).

В ходе съемок измеряли электропроводность (λ), pH, температуру озерных и речных вод, определяли концентрацию растворенного кислорода. Температуру и электропроводность воды на разных глубинах измеряли с помощью кондуктометра YSI 85-100. Величину pH определяли потенциометрическим методом при помощи pH-метра «Аквилон-410». Пробы воды с глубины $\geq 0,2$ м отбирали из водного объекта батометром Рутнера. Растворенный кислород определен методом Винклера.

Содержание фосфора определяли непосредственно в полевой гидрохимической лаборатории [Руководство..., 2003]. Анализ содержания главных ионов и органических веществ выполнен согласно методикам, изложенным в [Комарова, Каменцев, 2006; Муравьев, 1999] в гидрохимической лаборатории кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова. Образцы, отобранные для определения железа и марганца, отфильтрованы через мембранный фильтр (0,45 мкм) и законсервированы HNO_3 . Содержание микроэлементов в пробах установлено методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС); концентрацию растворенного железа определяли с использованием техники атомизации пламени на спектрометре «novAA-400» («Analytik-Jena AG», Германия); растворенного марганца – с использованием электротермической атомизации на спек-

рометре «AA-240Z» («Varian», США), [Ермаченко, Ермаченко, 1999].

При исследовании донных отложений определяли скорость потребления кислорода грунтами и величину общей деструкции органического вещества (ОВ) в грунтах ($D_{\text{общ}}$). Определение проводилось по методу Кузнецова–Романенко [Романенко, 1985]. Величину скорости потребления кислорода грунтами (СПК) оценивали по поглощению кислорода колонкой грунта за время экспозиции (t , часы); скорость потребления кислорода в 10-сантиметровом слое придонной воды над донными отложениями площадью 1 м^2 ($\text{мг O}_2/\text{м}^2\cdot\text{сут}$) определена по методу Винберга. Величину общей деструкции ОВ в грунтах находили по поступлению углекислоты из ила в воду. Выход из грунтов фосфора, железа и марганца также устанавливали по разнице концентрации этих величин в трубке с грунтом и в холостой трубке (без грунта), залитой придонной водой, в конце экспозиции (t , часы).

Работы по измерению глубины проводили при помощи системы эхолот–GPS («Lowrance»). Глубину измеряли таким образом, чтобы расстояние между галсами не превышало 10–15 м. Точность измерения составила 10 см по глубине и 3 м в плане.

По результатам полевых исследований определен набор параметров, достаточно полно характеризующих гидроэкологическое состояние водных объектов, а также необходимые при таких исследованиях периодичность и состав наблюдений, выбраны репрезентативные рейдовые вертикали (рис. 1). При оценке состояния водных объектов наиболее эффективен метод маркерных показателей (уровень воды, температура, электропроводность, содержание растворенного кислорода, прозрачность, pH и цветность воды, содержание валового и минерального фосфора), по пространственно-временным колебаниям которых можно судить как о текущем состоянии, так и об изменениях, происходящих в озерных системах. Выбор показателей обусловлен информативностью и их взаимосвязью, а также относительно небольшой трудоемкостью при измерениях.

Результаты исследований и их обсуждение. От температурного и кислородного режима озер зависит функционирование всей экосистемы водного объекта. На них накладывают свой отпечаток морфометрические характеристики водоема, определяющие значительную часть процессов, происходящих в толще воды озер. Важнейший морфометрический показатель – соотношение площади озера и его водосбора. Влияние водосбора особенно велико для менее крупных озер. Изрезанность и длина береговой линии озер системы, наличие плесов, имеющих разные морфометрические характеристики, число притоков и водообмен влияют на режим температуры и кислорода. При одной и той же температуре воздуха и силе ветра в плоских и широких озерных котловинах в летнее время водные массы перемешиваются более интенсивно, в результате может возникнуть гомотермия (например, в озерах Пере-

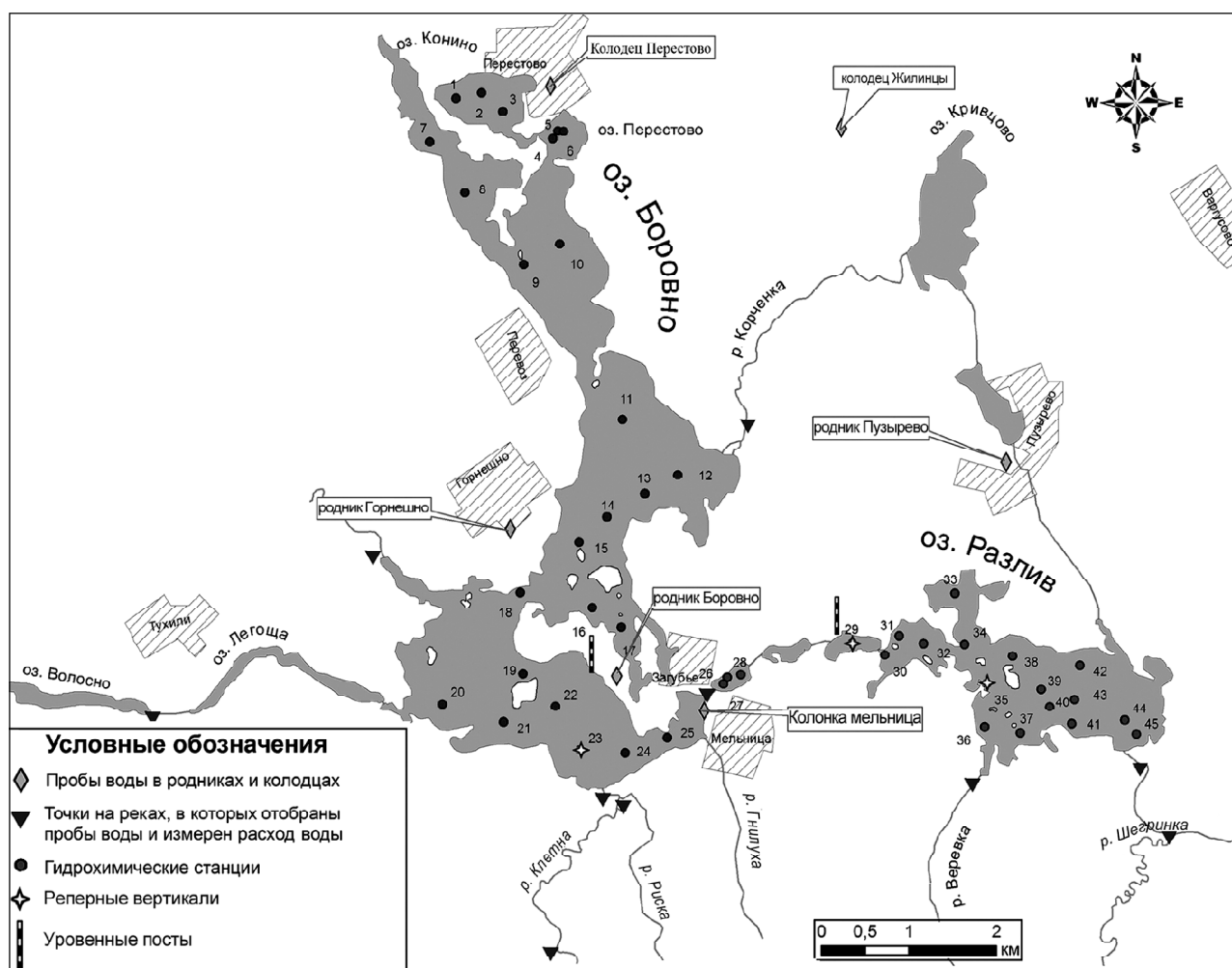


Рис. 1. Схема положения гидрологических постов, станций и реперных вертикалей при гидролого-гидрохимических съемках

Fig. 1. Diagram of hydrological sites and reference verticals of the hydrochemical surveys

стово и Конино), а в глубоких и «закрытых» озерах сохраняются устойчивая температурная стратификация и мощный слой гипolimниона (оз. Разлив, станция 29). В гипolimнионе идут процессы, отличающие одно озеро от другого. Так, в гипolimнионе оз. Белое (один из плесов оз. Разлив) наблюдаются низкая температура воды, дефицит кислорода, накопление диоксида углерода, увеличение минерализации, преобладание восстановительных реакций, образование определенного типа донных отложений и др.

Характер сезонного вертикального распределения температуры в озерах НП Валдайский в целом типичен для рассматриваемой территории. В период зимней стагнации распределение температуры воды по глубине в озерах системы Боровно–Разлив сходно. Температура воды поверхностных слоев составляет от 0 до 1,5 °С, причем пониженные значения поверхностной температуры (0–0,2 °С) наблюдаются в мелководных частях озер (с глубиной 1,5–5 м), а более высокие (0,2–0,6 °С) – в более глубоких частях (с глубиной 10–15 м). Значение придонной температуры также зависит от глубины: чем больше глубина, тем меньше выхолаживаются придонные горизонты, большее количество тепла сохраняется в

водной толще. Когда устанавливается ледяной покров, теплоотдача в атмосферу сокращается до минимума. Благодаря отдаче тепла ложем водоема придонные слои воды имеют большую температуру, чем вышележащие слои. Таким образом, температура придонных слоев воды в озерах в период ледостава находится в прямой зависимости от их глубины.

Конвективный перенос тепла, формирующий температуру водной массы, в южной части оз. Боровно ввиду большей проточности протекает интенсивнее, чем в его других плесах. В конце января 2012 г. температура придонных слоев воды (на глубине ≥ 20 м) южного плеса оз. Боровно не превышала 2 °С, в то время как на той же глубине в оз. Разлив была близка к температуре наибольшей плотности (рис. 2, а). Аналогичное вертикальное распределение температуры отмечено в этих плесах и в конце зимней стагнации 2013 г.

В период летней стагнации процессы, происходящие в озерах Боровно и Разлив, несколько различаются и зависят от морфометрических характеристик. Летом при относительно стабильном состоянии водных масс активный теплообмен в основном происходит в толще эпилимниона до слоя скачка, и его мощность зависит от динамических факторов.

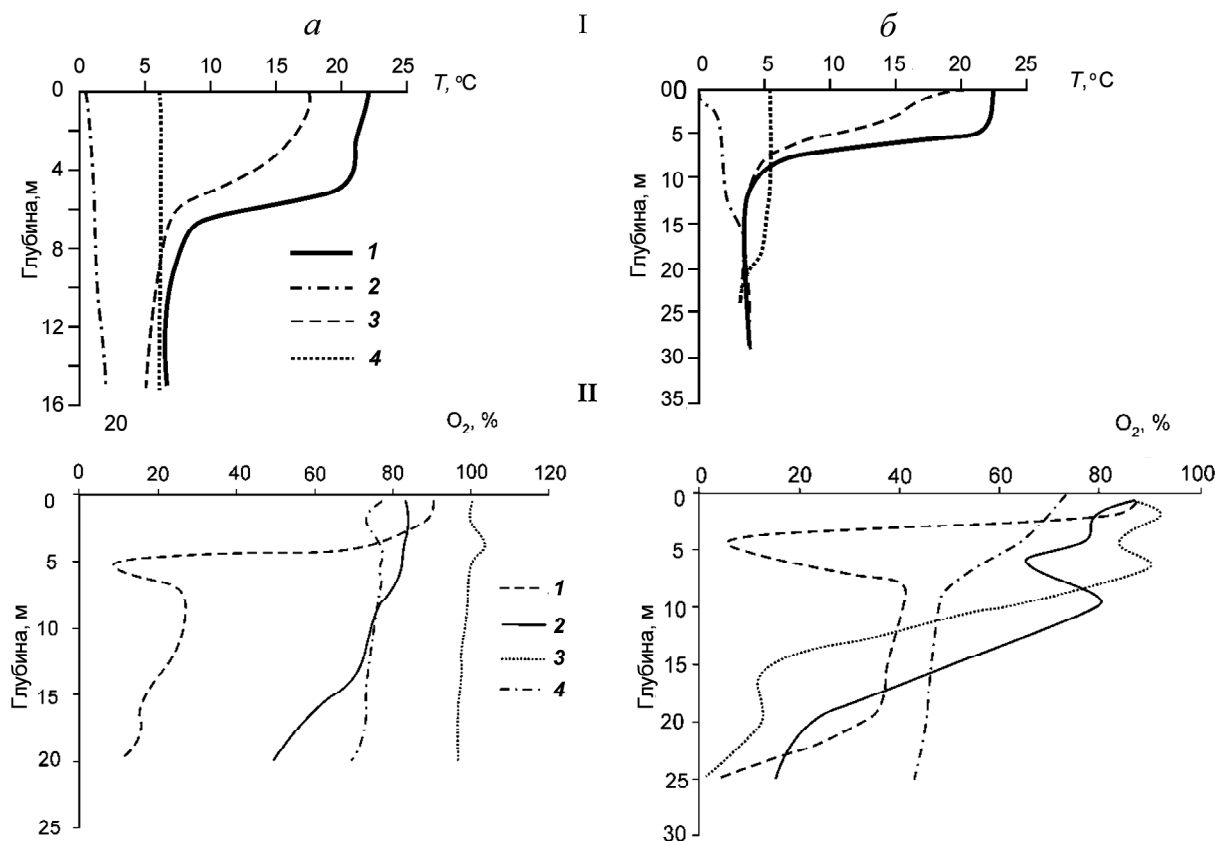


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры воды (I) и кислорода (II) в разные сезоны 2011 г. в озерах системы Боровно–Разлив: I: а – оз. Боровно (южный плес), б – оз. Разлив; II: а – оз. Боровно (южный плес); б – оз. Разлив (станция 29); 1 – лето, 2 – зима, 3 – весна, 4 – осень

Fig. 2. The vertical distribution of water temperature (I) and oxygen (II) during 2011 seasons in the Borovno–Razliv lakes system: I: а – Borovno Lake (south stretch), б – Razliv Lake, II: а – Borovno Lake (south stretch), б – Razliv Lake (site 29); 1 – summer, 2 – winter, 3 – spring, 4 – autumn

В глубоких озерах летом устанавливается прямая температурная стратификация, формируется устойчивый термоклин. Наибольшая разность температуры поверхностных и придонных слоев воды относится к периоду наиболее высокой температуры воздуха и составляет 10–17 °С, температурный градиент увеличивается в периоды жаркой безветренной погоды, стратификация становится более устойчивой. Например, в августе 2014 г. термоклин в озерах Боровно и Разлив находился на глубине 3,5–5,0 м, а термический градиент достигал на ряде станций 5,3 °С/м, что почти на 0,5 °С больше, чем летом 2011 и 2013 гг.

Положение термоклина в разных озерах неодинаково. Большая площадь зеркала озера (как, например, в южном плесе оз. Боровно) благоприятствует усилению влияния ветра и способствует перемешиванию в эпилимнионе. В мелководных озерах температурная стратификация летом практически отсутствует. В некоторых плесах озер вследствие затрудненного перемешивания их водных масс, обусловленного рельефом дна, температура нижних слоев гипolimниона практически не меняется в течение всего года. Воды в глубоководных частях оз. Разлив летом холоднее, а зимой, наоборот, теплее, чем в плесах оз. Боровно.

Содержание растворенного кислорода (РК) и степень насыщения им водной массы озер представ-

ляет собой результирующую характеристику протекающих в водоеме процессов продукции и деструкции ОВ, созданного в водоеме и поступившего извне. В кислородном режиме озер НП наименее благополучны периоды зимней и летней стагнации. Зимой прекращение газообмена с атмосферой, отсутствие ветрового перемешивания и фотосинтеза, деструкция растворенного органического вещества и окисление детрита, протекающие даже при низкой температуре, а также потребление кислорода грунтами, приводят к резкому уменьшению количества кислорода в придонных горизонтах. Эти закономерности типичны для водных объектов на европейской территории России, однако они могут нарушаться вследствие изменения гидрометеорологических условий.

Так, придонные слои южного плеса оз. Боровно в период зимних наблюдений в январе–феврале 2012 г. были более аэрированы, чем в январе–феврале 2010 и 2011 г. Это могло быть связано с хорошим перемешиванием водной толщи озера в период продолжительной гомотермии, обусловленной более поздним наступлением ледостава. Замерзание озер зимой 2011/12 гг. наступило на месяц позднее, чем в предшествующие годы вследствие повышенной температуры воздуха в этот период, не наблюдался и дефицит кислорода. В придонных сло-

ях воды глубоких плесов оз. Разлив зона аноксии на глубине ниже 20 м сформировалась менее чем через месяц после образования прочного ледяного покрова. Содержание растворенного кислорода на поверхности составляло около 90%, на глубине 20–25 м оно снизилось до аналитического нуля (рис. 2, б).

В период летней стагнации эпилимнион озер системы в среднем на 90–100% насыщен кислородом. В открытых плесах озер вследствие ветрового перемешивания насыщение кислородом поверхностных слоев воды снижается до 80%. При этом растворенный кислород проникает на большую глубину, чем в закрытых от ветра заливах. Заметное пересыщение кислородом (до 120%) поверхностных слоев воды характерно для мелководных озер и литоральной зоны в солнечную жаркую погоду. Однако на литоральных участках, закрытых от ветрового воздействия, могут формироваться очаги перегнивания отмершей органики, что приводит к резкому снижению содержания кислорода.

Во всех озерах системы на глубине 4–6 м летом формируется металимниальный минимум кислорода (рис. 2, б), который совпадает со слоем температурного скачка. Градиент относительного со-

[Ерина, 2013, 2014]. Поэтому наихудшие кислородные условия создаются в жаркие и маловодные годы в глубоких и узких плесах озер системы. Так, среднее содержание кислорода в эпилимнионе оз. Разлив (станция 29) по результатам съемок в августе (2011, 2013 и 2014) составило 4,8 мг/л, а в широком центральном плесе оз. Боровно – 7,0 мг/л. Снижению концентрации кислорода в глубоких плесах озер парка способствует наличие резких понижений в рельефе дна – следов деятельности ледника. Дефицит кислорода в таких впадинах может увеличиваться вследствие его поглощения залегающими здесь черными восстановленными илами.

В озерах системы Боровно–Разлив формируются водные массы, обладающие определенным набором характеристик, важная из которых – электропроводность воды. Электропроводность воды озер системы не превышает 200 мкСм/см (рис. 3), ее распределение характеризуется сезонной, межгодовой и пространственной изменчивостью. Воды, поступившие в озера в половодье, имеют заметно меньшую электропроводность, чем воды в меженный период: сезонная изменчивость электропроводности воды достигает 50–60 мкСм/см.

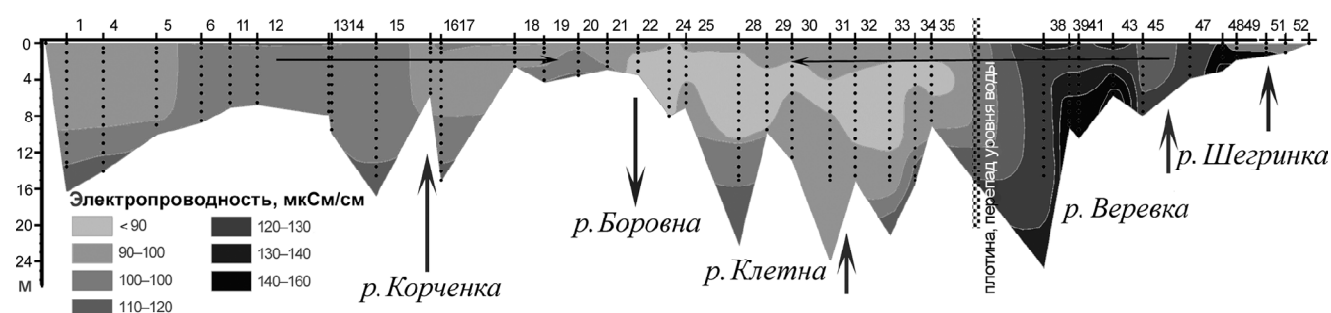


Рис. 3. Распределение электропроводности воды в озерно-речной системе Боровно–Разлив по данным наблюдений в феврале 2010 г.

Fig. 3. Water conductivity in the Bоровно–Razliv lake–river system in February 2010

держания кислорода достигает 50–60% на 1 м. В слое скачка при больших плотностных градиентах минимум концентрации кислорода достигает аналитического нуля. Образование металимниального минимума O_2 обычно связывают со скоплением органического вещества планктонного происхождения в слое резкого изменения плотности воды и с развитием на этом субстрате потребляющих кислород микроорганизмов. Такое явление, распространенное в озерах Валдайского поозерья, С.И. Кузнецов (1952) считает одним из типологических показателей трофического состояния озера. Однако наличие металимниального минимума определяется, скорее, температурной стратификацией, а не трофическим статусом водоема.

Замедленный водообмен и большая глубина озер могут приводить к формированию в придонных слоях зоны аноксии, которая, как правило, расположена ниже 20 м. При установившейся жаркой погоде увеличиваются продолжительность существования в водоемах условий кислородного дефицита и скорость потребления кислорода в гипolimнионе

Пространственная изменчивость электропроводности воды составляет в среднем ~30 мкСм/см, поскольку водная масса, сформировавшаяся в оз. Разлив, при прохождении через водосброс Боровновской ГЭС и озер Островёнок и Плотиченко трансформируется – уменьшается ее электропроводность, выравнивается температура по глубине. Как правило, электропроводность воды оз. Боровно в среднем ниже электропроводности, наблюдаемой в оз. Разлив (рис. 3). Характерная особенность распределения электропроводности воды в оз. Разлив – формирование в его придонных горизонтах (на глубине 20–25 м) линз более минерализованных вод. Градиент электропроводности на глубине свыше 20 м может достигать 10 мкСм/см на 1 м.

Вертикальное распределение электропроводности нарушается в местах впадения притоков, имеющих другие гидролого-гидрохимические характеристики. Зимой 2010 г. воды притоков оз. Разлив характеризовались большими (на 30–40 мкСм/см) по сравнению с зимами 2011–2013 гг. значениями электропроводности, что привело к увеличению элек-

тропроводности воды озера. Повышение электропроводности воды притоков в 2010 г. было, вероятно, обусловлено пониженной водностью и увеличением в воде притоков доли более минерализованных подземных вод. Это обстоятельство не оказало заметного влияния на электропроводность воды нижежащих озер системы. Масштаб межгодовых изменений электропроводности воды озерной системы в период зимней межени в среднем не превысил 15%.

Ландшафтные особенности водосбора обуславливают повышенное содержание ОВ в воде озер системы Боровно–Разлив; на 80–85% ОВ представлено трудноокисляемыми ОВ аллохтонного происхождения [Фролова и др., 2012]. Заболоченность водосборов озер, входящих в каскадную группировку оз. Разлив, более чем в 5 раз превышает заболоченность водосбора оз. Боровно. Содержание ОВ увеличивается на спаде половодья и в период летней стагнации, а осенью и зимой несколько уменьшается. По данным наблюдений в водах озер системы величина перманганатной окисляемости (ПО) в зимний период составляла в среднем 7,8–9,8, ХПК – 22–29,1 мг О/л, уменьшаясь от поверхности ко дну. Летом показатели ПО и СПК были больше и изменялись в воде оз. Разлив в диапазоне 12,1–15,0 и 39,5–49,7 мг О/л; в воде оз. Боровно – в диапазоне 9,5–12,5 и 36,2–47,5 мг О/л соответственно, незначительно снижаясь от поверхности к дну.

Содержание фосфора и соотношение между его формами – важные интегральные показатели, характеризующие реакцию водоема на изменение антропогенной нагрузки. Концентрация валового фосфора ($P_{\text{вал}}$) в водах озерно-речной системы Боровно–Разлив на спаде половодья составила 50–100 мкг/л и была обусловлена в первую очередь ростом во всей водной толще озер доли взвешенного минерального фосфора ($P_{\text{мин}}$), поступающего с водосбора. На спаде весеннего половодья концентрация $P_{\text{мин}}$ в воде озер возрастала от поверхности к дну от 15 до 30 мкг/л. Летом в поверхностных горизонтах исследованных водоемов содержание $P_{\text{мин}}$ снижалось до 0–10 мкг/л, составляя не более 15% от его валового содержания. По данным съемки в августе 2013 г. минимальная концентрация $P_{\text{мин}}$ отмечена в поверхностном слое центральной части оз. Разлив, где она достигала аналитического нуля. Чуть выше было содержание $P_{\text{мин}}$ (4 мкг/л) в оз. Белое и в южном плесе оз. Боровно (8–10 мкг/л).

При уменьшении в эпилимнионе запасов $P_{\text{мин}}$ заметно снижалась и концентрация хлорофилла (от 3 мкг/л в оз. Разлив до 15–16 мкг/л в южном плесе оз. Боровно). С глубиной доля неорганического фосфора в содержании валового фосфора увеличивалась до 50–65%, особенно значительно ниже металимниального минимума кислорода, и в придонных слоях воды достигала 80% (25 мкг/л). В период осенней гомотермии концентрация фосфора выравнивалась по глубине. Зимой отмечено увеличение $P_{\text{мин}}$ до 25–45 мкг/л, $P_{\text{вал}}$ – до 50–65 мкг/л. При этом $P_{\text{мин}}$ преобладал, как правило, лишь в глубоких

центральных частях озер, а в мелководных плесах зимой, как и в течение всего года, основной формой оставался органический фосфор.

Обмен фосфором между донными отложениями и водой гипolimниона – часть круговорота, регулирующего фосфорную нагрузку на водоем и процесс эвтрофирования в целом. Величина диффузионного потока фосфора из грунтов в воду и в обратном направлении определяется его разной концентрацией в поровом растворе и придонной воде, количеством фосфатов, высвобождающихся при деструкции ОВ, десорбции фосфатов с гидрооксида железа, происходящей в условиях кислородного дефицита. Потоки фосфора на границе вода–дно подвержены сезонной изменчивости [Савенко, Савенко, 2007]. В озерах системы во все сезоны 2013 г. наблюдалось поступление фосфора из донных отложений в воду. В мелководных водоемах Перестово и Разлив величины потока фосфора из грунта в воду практически не менялись в течение года (4,5–6,3 и 4–5 мг $P/m^2 \cdot \text{сут}$ летом и зимой соответственно). В глубоких плесах летом поступление фосфора на границе вода–дно также составляло от 3 до 6 мг $P/m^2 \cdot \text{сут}$, в то время как зимой оно увеличивалось в 2–3 раза, достигая 14 мг $P/m^2 \cdot \text{сут}$ в оз. Белое (глубокий плес оз. Разлив), что обусловило повышенную (45 мкг/л) по сравнению с водами других озер концентрацию $P_{\text{мин}}$ в придонной воде (25–30 мкг/л).

Содержание ОВ в верхнем (0–2 см) слое донных отложений колебалось от 16–25% (озера Боровно и Перестово) до 50% (оз. Разлив). Относительная мелководность оз. Разлив способствовала разрушению температурной стратификации вследствие ветрового перемешивания, что увеличивало седиментацию и накопление ОВ в грунтах. При этом сезонные колебания количества ОВ в грунтах всех исследуемых озер вне зависимости от их глубины были незначительны (0–10%). Незначительны также сезонные изменения гигроскопической влажности верхнего слоя донных отложений в изучаемых озерах ($d \approx 4\%$), что характеризует свежесть исследуемого осадка. Наибольшая гигроскопическая влажность осадка характерна летом для мелководной части оз. Разлив, в котором при периодическом разрушении температурной стратификации происходит оседание на дно свежего детрита.

В зависимости от сезона в озерах менялась скорость потребления кислорода (СПК) донными отложениями. Зимой СПК во всех исследуемых водоемах была минимальна и составляла от 10 до 40 мг/м²·сут. Наибольшие величины СПК в мелководных озерах отмечены летом (до 200 мг/м²·сут в озерах Перестово и Разлив), а в глубоких (озерах Боровно и Белое) – в период осенней гомотермии (до 100–150 мг/м²·сут).

Общая деструкция ОВ в верхнем слое донных отложений ($D_{\text{общ}}$) в глубоких озерах в течение всего года не превышала 100 мгС/м²·сут (сказывалось лимитирующее влияние таких факторов, как отсутствие кислорода у дна и низкая температура при-

донного слоя воды). В то же время в относительно мелко-водных озерах Перестово и Разлив $D_{\text{общ}}$ в летний период достигала 300 мгС/м²·сут. Соотношение аэробной и общей деструкции в периоды устойчивой температурной стратификации в озерах не превышало 30%. В период гомотермии, когда вследствие процессов перемешивания и аэрации водной толщи возрастала аэробная деструкция, это отношение достигало 80%.

Геохимическая особенность исследованных озер – поступление с водосборной территории значительного количества растворенных и валовых форм железа и марганца, оседающих на дне и формирующих химический состав донных отложений. Основной причиной высокого содержания подвижных форм Mn в ландшафтах водосбора и дальнейшего поступления в водоем Е.М. Никифорова [1980] считала минерализацию древесных остатков и опада растительности, поглощающей значительное количество этого элемента. Максимальное содержание железа и марганца обнаружено в грунте (слой 0–5 см) оз. Белое (таблица). Полученные результаты хорошо согласуются с данными о содержании Fe и Mn в верхнем слое донных отложений Валдайских озер [Недогарко, 2007]. В условиях аноксии происходит восстановление труднорастворимых гидроксидов железа и марганца до относительно хорошо растворимых соединений ^{2+}Fe и ^{2+}Mn , часть которых свободно переходит в поровый раствор, откуда диффундирует в воду [Мартынова, 2010]. Концентрация Fe и Mn в поровом растворе образца из оз. Белое значительно больше, чем в других озерах (53 и 16 мг/л соответственно), здесь же фиксируется и максимальное содержание марганца в придонной воде, что во многом определяется глубиной в точке отбора образца. На глубине аномально высокие значения концентрации являются признаком процесса, сходного с образованием железомарганцевых конкреций или озерной руды [Недогарко, 2007].

Установлены корреляционные связи между маркерными показателями и рядом других параметров качества воды: между электропроводностью и жесткостью воды ($R = 0,78$); между цветностью воды и перманганатной окисляемостью ($R = 0,81$). Получены статистические оценки взаимосвязи между содержанием кислорода и другими гидрохимическими и гидробиологическими параметрами. Концентрация O_2 имеет обратную корреляцию с содержанием марганца ($R = -0,83$) и содержанием минерального фосфора ($R = -0,67$), а прямую – в лет-

Содержание железа и марганца в воде и грунтах озер Белое и Перестово (2013 г.)

Показатель	Содержание Fe		Содержание Mn	
	оз. Белое	оз. Перестово	оз. Белое	оз. Перестово
Грунт, %	2,88	0,79	0,33	0,053
Поровая вода, мг/л	53	12,3	16	1,56
Придонная вода, мг/л	3,6	0,47	4,4	0,15
Величина потока (зима), мг/м ² ·сут	300	28	210	48
Величина потока (лето), мг/м ² ·сут	395	11	250	10,5

ний период с величиной pH ($R = 0,81$) и содержанием хлорофилла-*a* ($R = 0,80$).

Выводы:

– современное гидроэкологическое состояние водных объектов озерно-речной системы Боровно–Разлив можно оценить как условно-фоновое; оно определяет нормальное существование водной экосистемы. Для исследованных параметров характерна внутригодовая и межгодовая изменчивость. Изменение большинства показателей (электропроводность и pH воды, ПО, цветность и СПК, содержание марганца и железа) обусловлены ландшафтными особенностями водосбора и морфометрическими характеристиками озер. Они незначительно реагируют на изменения гидрометеорологических условий в исследованный временной период. Количество растворенного кислорода и соединений фосфора, напротив, весьма чувствительно к этим изменениям;

– особенность озер на территории НП Валдайский – существование в летний период металимниального минимума кислорода, расположенного на глубине 4–6 м и усиливающегося при жаркой безветренной погоде. Металимниальный минимум определяется температурной стратификацией в водоеме и приводит к увеличению скорости истощения запасов кислорода в гипolimнионе и продолжительному существованию аноксидных условий;

– сезонные изменения, обусловленные особенностями гидрологической структуры водоема в конкретный период, характерны для таких показателей донных отложений, как скорость потребления кислорода, соотношение общей и аэробной деструкции, величина диффузионных потоков железа, марганца и фосфора из грунтов в придонные слои воды;

– полученные связи между маркерными показателями и рядом других параметров качества воды могут быть полезны при разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты и региональных нормативов качества воды.

Благодарности. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00155).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баянов Н.Г. К вопросу о проведении лимнологических наблюдений в заповедниках // Проблемы сохранения и оценки состояния природных комплексов и объектов: Мат-лы науч. конф. Воронеж, 1997. С. 30–31.
- Баянов Н.Г., Кораблева О.В. Характеристика гидрологического года в Керженском заповеднике: методические подходы // Тр. Гос. природного биосферного заповедника «Керженский». Т. 6. Нижний Новгород, 2014. С. 55–64.
- Гордеева Т.А., Розуленко А.В., Телеганова В.В. Обзор научных исследований по изучению природного наследия национального парка «Угра» // Природа и история Поггорья. Калуга, ИЦ «Постскриптум». 2006. С. 20–36.
- Ерина О.Н. Диагностические расчеты кислородного режима стратифицированного водохранилища в условиях малой водности // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Тр. Междунар. науч.-практ. конф. Т. 2. Пермь, 2013. С. 73–78.
- Ерина О.Н. Прогностические оценки изменения кислородного режима и качества воды в Можайском водохранилище в экстремально жаркую погоду // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 6. С. 10–15.
- Ермаченко Л.А., Ермаченко В.М. Атомно-абсорбционный анализ с графитовой печью. М.: ПАИМС, 1999. 219 с.
- Ефимова Л.Е., Фролова Н.Л. Гидрологический мониторинг в пределах особо охраняемых природных территорий // Вода: химия и экология. 2013. № 5. С. 20–28.
- Комаров Н.В., Каменцев Я.С. Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза «Капель». СПб.: Веда, 2006. 212 с.
- Мартынова М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука. 2010. 256 с.
- Муравьев А.Г. Руководство по определению качества воды полевыми методами. СПб.: Кримас+, 1999. 204 с.
- Недогарко И.В. Химический состав донных отложений Валдайских озер // Вестн. Твер. гос. ун-та. Сер. География и геоэкология. Тверь: Изд-во ТГУ, 2007. Вып. 19 (47). С. 74–85.
- Никифорова Е.М. Микроэлементы в южно-таежных ландшафтах Валдайской возвышенности // Геохимия ландшафта и практика народного хозяйства. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980.
- Повалишников Е.С., Ефимова Л.Е., Головлева В.О. Применение методов дистанционного зондирования для мониторинга водных объектов в пределах ООПТ // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. Вып. 11(58), Т. 2. М.: Научно-информационный издательский центр и редакция журнала «Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук», 2013. С. 99–107.
- Романенко В.И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Л.: Наука, 1985. 294 с.
- Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
- Савенко В.С., Савенко А.В. Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле. М.: ГЕОС, 2007. 248 с.
- Фролова Н.Л., Ефимова Л.Е., Повалишников Е.С. и др. Особенности природопользования и гидроэкологическое состояние озерно-речной системы Боровно-Разлив (национальный парк «Валдайский») // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 1. С. 81–90.
- Шварева И.С., Трифонов К.И., Никифоров А.Ф. Гидрохимический мониторинг водных экосистем национального парка «Мещера» // Водное хоз-во России. 2014. № 1. С. 58–74.

Поступила в редакцию 27.07.2015
Принята к публикации 11.12.2015

L.E. Efimova¹, E.S. Povalishnikova², E.V. Terskaya³,
N.L. Frolova⁴, D.V. Lomova⁵

HYDROCHEMICAL STATE OF WATER BODIES IN THE VALDAI NATIONAL PARK

Specific features of the regime of the Bоровno-Razliv lake-river system are investigated, as well as the mechanism of the flow of dissolved mineral and organic substances and exchange processes between bottom waters and soil during different seasons within the territory of Valdai national park. The actual hydroecological state of water objects is considered taking into account specific conditions of nature and water management in the region. The results of investigations made it possible to suggest the optimum terms of further observations on the lakes of the Bоровno-Razliv system and other lakes of the national park.

Key words: monitoring, hydroecological conditions, nature protection areas.

Acknowledgements. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project No 14-17-00155).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Hydrology, Senior Research Scientist, PhD. in Geography; e-mail: ef_river@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Hydrology, Senior Research Scientist, PhD. in Geography; e-mail: almond_a@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Hydrology, Research Scientist, PhD. in Geography; e-mail: elena_terskaya@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Hydrology, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: frolova_nl@mail.ru

⁵ Water Problems Institute RAS, Research Scientist, PhD. in Geography; e-mail: florainter@mail.ru

REFERENCES

- Bajanov N.G.* K voprosu o provedenii limnologicheskikh nabljudenij v zapovednikah [On the question of carrying out limnological observation in nature reserves], Problemy sohraneniya i ocenki sostojaniya prirodnyh kompleksov i ob'ektov, Materialy nauch. konf., Voronezh, 1997, pp. 30–31 (in Russian).
- Bajanov N.G., Korableva O.V.* Harakteristika gidrologicheskogo goda v kerzhenskom zapovednike: metodicheskie podhody [Hydrological year characteristics in the Kerzhensky reserve: methodological approaches], Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika «Kerzhenskij», Vol. 6, Nizhnij Novgorod, 2014, pp. 55–64 (in Russian).
- Efimova L.E., Frolova N.L.* Gidrologicheskij monitoring v predelah osobo ohranjaemyh prirodnyh territorij [Hydrological monitoring within specially protected areas], Voda: himija i jekologija, 2013, no 5, pp. 20–28 (in Russian).
- Erina O.N.* Diagnosticheskie raschety kislorodnogo rezhima stratificirovannogo vodohranilishha v uslovijah maloj vodnosti [Diagnostic calculations of stratified reservoir oxygen regime in low flow conditions], Sovremennye problemy vodohranilishh i ih vodosborov. Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Perm, 2013, Vol. 2, pp. 73–78 (in Russian).
- Erina O.N.* Prognosticheskie ocenki izmeneniya kislorodnogo rezhima i kachestva vody v Mozhaiskom vodohranilishhe v jekstremal'no zharkuju pogodu [Prognostic assessment of changes in oxygen conditions and quality of water in the Mozhaisk reservoir in extremely hot weather], Vestnik Moskovskogo universiteta, Serija 5, Geografija, 2014, no 6, pp. 10–15 (in Russian).
- Ermachenko L.A., Ermachenko V.M.* Atomno-absorbcionnyj analiz s grafitovoj pech'ju [Atomic absorption analysis with graphite furnace], Moscow: PAIMS, 1999. 219 p. (in Russian).
- Frolova N.L., Efimova L.E., Povalishnikova E.S. et al.* Osobennosti prirodopol'zovanija i gidrojekologicheskoe sostojanie ozerno-rečnoj sistemy Borovno–Razliv (nacional'nyj park «Valdajskij») [Features of the state of natural resources and lake-river system Borovno–Razliv (National Park «Valdai»)], Izvestija RAN. Ser. geogr., 2012, no 1, pp. 81–90 (in Russian).
- Gordeeva T.A., Rogulenko A.V., Teleganova V.V.* Obzor nauchnyh issledovanij po izucheniju prirodnogo nasledija nacional'nogo parka «Ugra» [Review of the scientific research in the natural park «Ugra»], Priroda i istorija Pougor'ja. Vyp. 4. Kaluga: IC «Postskriptum», 2006, pp. 20–36 (in Russian).
- Komarov N.V., Kamencev Ja.S.* Prakticheskoe rukovodstvo po ispol'zovaniju sistem kapillarnogo jelektroforeza «Kapel'» [YS practical guide to the use of capillary electrophoresis systems «drops»], SPb., Veda, 2006, 212 p. (in Russian).
- Martynova M.V.* Donnye otlozhenija kak sostavljajushhaja limnicheskij jekosistem [Sediments as a part of the limnetic ecosystems], Moscow, Nauka, 2010, 256 p. (in Russian).
- Murav'ev A.G.* Rukovodstvo po opredeleniju kachestva vody polevymi metodami. [Guidelines for the determination of water quality field methods], SPb., Krismas+, 1999, 204 p. (in Russian).
- Nedogarko I.V.* Himicheskij sostav donnyh otlozhenij Valdajskih ozer [The chemical composition of the bottom sediments in the Valdai Lakes], Vestnik Tver. gos. un-ta. Ser. geogr. i geojekol, Tver': Izd-vo TGU, 2007, no 19 (47), pp. 74–85 (in Russian).
- Nikiforova E.M.* Mikrojelementy v juzhno-taezhnyh landshaftah Valdajskoj vozvysheennosti [Trace elements in the southern taiga landscapes of Valdai Hills], Geohimija landshafta i praktika narodnogo hozjajstva, Moscow: Izd-vo MGU, 1980 (in Russian).
- Povalishnikova E.S., Efimova L.E., Golovleva V.O.* Primenenie metodov distancionnogo zondirovanija dlja monitoringa vodnyh ob'ektov v predelah OOPT [The use of remote sensing techniques for the monitoring of water bodies within protected areas], Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk, no 11(58), Vol. 2, Moscow, Nauchno-informacionnyj izdatel'skij centr i redakcija zhurnala «Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk», 2013, pp. 99–107 (in Russian).
- Romanenko V.I.* Mikrobiologicheskie processy produkcii i destrukcii or-ganicheskogo veshhestva vo vnutrennih vodoemah. [Microbiological processes of production and destruction of organic matter in inland waters], Leningrad, Nauka, 1985, 294 p. (in Russian).
- Rukovodstvo po himicheskomu analizu morskikh i presnyh vod pri jekologicheskom monitoringe rybohozjajstvennyh vodoemov i perspektivnyh dlja promysla rajonov Mirovogo Okeana* [Guidance on chemical analysis of marine and fresh water in the ecological-sky monitoring of fishery ponds for fishing and promising areas of the World Ocean], Moscow, izd-vo VNIRO, 2003, 202 p. (in Russian).
- Savenko V.S., Savenko A.V.* Geohimija fosfora v global'nom gidrologicheskom cikle. [Geochemistry of phosphorus in the global hydrological cycle], Moscow, GEOS, 2007, 248 p. (in Russian).
- Shvareva I.S., Trifonov K.I., Nikiforov A.F.* Gidrohicheskij monitoring vodnyh jekosistem nacional'nogo parka «Meshhera» [Hydrochemical monitoring of aquatic ecosystems of the National Park «Meschera»], Vodnoe h-vo Rossii, 2014, no 1, pp. 58–74 (in Russian).

Received 27.07.2015

Accepted 11.12.2015