

УДК 574.5;556.535.8;574.583;561.26

РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ДВУХ ВЕРХНЕВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

© 2023 г. Л. В. Разумовский^а, *, Т. Н. Кушнарева^а, В. Л. Разумовский^а, А. В. Анисимова^а

^аИнститут водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия

*e-mail: lazy-lion@mail.ru

Поступила в редакцию 14.05.2023 г.

После доработки 27.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

В работе изложена новая программа исследований по оценке долговременных трансформаций, происходящих в водохранилищах. Для оценки перспективности предложенных исследований были выбраны Ивановское и Рыбинское водохранилища. Это определялось длительностью их существования, мощностью накопившихся отложений и степенью изученности. Новизна исследований состояла в совместном анализе результатов биомониторинга по фитопланктонным комплексам и анализа видового состава диатомовых комплексов из колонок донных отложений. Параллельно проводился анализ химического состава вод и образцов из колонок донных отложений. Методом графического анализа таксономических пропорций в диатомовых комплексах было доказательно продемонстрировано отсутствие процессов переотложения при формировании осадков в точках отбора колонок донных отложений. Это определило корректность сопоставления результатов диатомового и химического анализа осадков. По данным мониторинга рассмотрены результаты оценки качества вод по двум индексам: индексу сапробности S и интегральному индексу качества вод QI. Констатируется ожидаемая сезонная повторяемость численных значений S и QI. Аналогичные расчеты были проведены по видам-индикаторам из диатомовых комплексов в образцах из колонок донных отложений. Отмечены процессы ухудшения качества вод по вышеупомянутым индексам. В результате проведенных исследований было установлено оптимальное месторасположение точек отбора колонок донных отложений в Рыбинском и Ивановском водохранилищах. При образовании водохранилищ произошло затопление озер, расположенных на их территории. Образовавшийся рельеф дна определил зоны месторасположения реликтовых озер как зоны устойчивой седиментации. По результатам проведенных комплексных исследований установлены долговременные негативные процессы в обоих водохранилищах, обусловленные антропогенной нагрузкой.

Ключевые слова: водохранилище, комплексный мониторинг, качество воды, фитопланктон, диатомовые водоросли, донные отложения, индекс загрязнения вод, индекс сапробности

DOI: 10.31857/S2587556623060122, EDN: DHXGKM

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день объективная оценка возобновляемых ресурсов пресных вод и достоверный анализ их качества являются приоритетными направлениями как гидрологической науки, так и практики управления водными ресурсами. Накопление значительных масс загрязняющих веществ в донных отложениях (ДО) верхневолжских водохранилищ, являющихся источниками водоснабжения городов, в том числе Москвы, ставит проблему оценки рисков, связанных с возможным изменением качества их вод и сохранением устойчивости экосистем водохранилищ.

За прошедшие десятилетия их берега и ложа претерпели существенные трансформации. Значимой проблемой последних десятилетий являет-

ся нерегулируемый и неконтролируемый характер застройки прибрежных зон. Нелинейность и стохастичность антропогенного воздействия на экосистемы водохранилищ приводят к устойчивому формированию группы неоправданных рисков при их эксплуатации.

В 2017 г. сотрудниками ИВП РАН была предложена новая программа оценки долговременных трансформаций, происходящих в водохранилищах, по образцам из колонок ДО (Разумовский, 2021). Новизна исследований состояла в смещении двух традиционных методов: анализа диатомовых комплексов из колонок ДО, который применяется в палеолимнологии, и анализа фитопланктонных комплексов, который применяется при биомониторинге. В качестве объекта

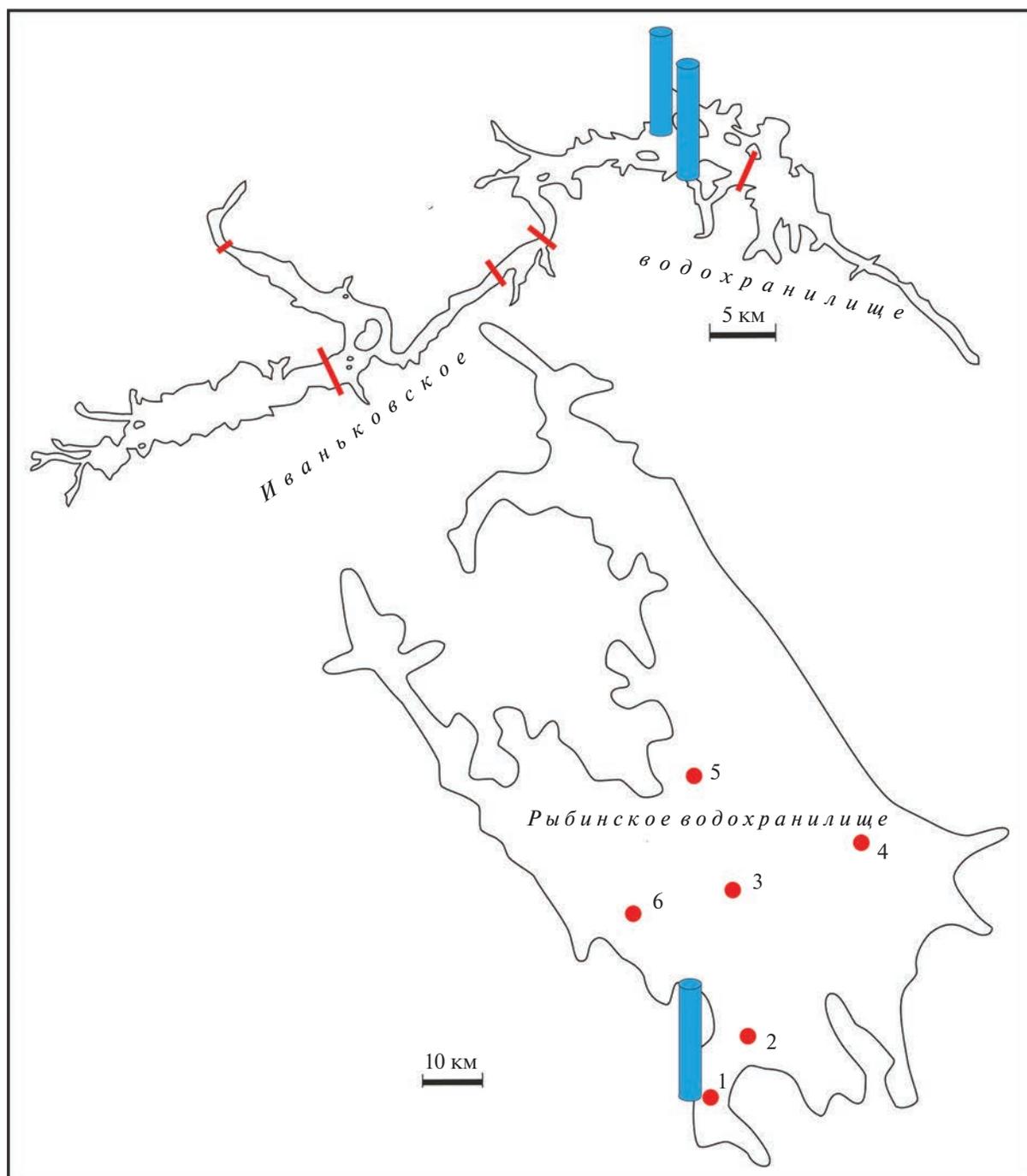


Рис. 1. Картограмма комплексного мониторинга Иваньковское и Рыбинское водохранилищ. Красным цветом обозначены пункты и створы мониторинга; цилиндрическими фигурами синего цвета – места отбора колонок донных отложений.

исследований были выбраны Иваньковское и Рыбинское водохранилища (рис. 1). Это определялось длительностью их существования, мощностью накопившихся отложений и степенью изученности.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Целью проведенных исследований является апробация нового метода по выявлению долговременных негативных изменений, происходящих в экосистемах водохранилищ.

1. Выбрать водохранилища для демонстрации эффективности предложенного метода исследований.

2. Провести инвентаризацию всех ранее полученных первичных данных для этих водохранилищ с их последующей систематизацией и анализом.

3. Определить зоны устойчивой седиментации¹ в этих водохранилищах, и отсутствие в этих зонах дальнейших процессов переотложения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Структуру и объем первичного материала составили 186 фитопланктонных проб, отобранных в Ивановском и Рыбинском водохранилищах, и 243 образца из 4 колонок ДО, отобранных в этих водохранилищах. Отбор проб проводился в 2017–2019 гг.

Колонки ДО из Ивановского водохранилища были отобраны в районе Перетрусовского залива (56.810355, 36.924684), между малыми островами и западной оконечностью о. Грабиловка (далее – Острова) (56.784824, 36.931571) и в Видогощинском заливе на участке, где располагалось затопленное оз. Видогошь (56.702412, 36.368875) (см. рис. 1).

Колонка ДО из Рыбинского водохранилища была отобрана в районе Коприно (58.092026, 38.297990). Пробы на Ивановском водохранилище отбирались на 5 створах, а на Рыбинском водохранилище в 5 пунктах постоянного мониторинга (см. рис. 1).

В качестве базового метода исследований был выбран диатомовый анализ (Диатомовый ..., 1949). Это объясняется рядом отличительных свойств диатомовых водорослей. Диатомовые водоросли – микроскопические одноклеточные организмы, которые являются одной из структурообразующих групп в большинстве пресноводных экосистем, в том числе водохранилищ. Обладая кремнийорганическим панцирем, отмершие клетки диатомовых водорослей хорошо сохраняются в пресноводных осадках и достоверно идентифицируются. Кроме того, существует обширная биоиндикационная база данных по приуроченности тех или иных видов диатомовых водорослей к конкретным условиям гидрологической среды.

Гидрохимический и гидробиологический мониторинг проводился по створам и пунктам в соответствии с ранее разработанными схемами (см. рис. 1). Обработка и просмотр фитопланктонных проб осуществлялся по стандартным ме-

тодикам (Руководство ..., 1992). Химические анализы проб воды проводили в лабораториях Института водных проблем РАН по стандартным методикам (Руководство ..., 1977).

Обработка проб из ДО, изготовление постоянных препаратов, подсчет и идентификация створок диатомей осуществлялись по стандартным методикам (Давыдова, 1985; Renberg, 1990).

Всего из колонок ДО было изучено более 100 образцов на диатомовый анализ. В тех же образцах был проанализирован химический состав ДО (металлы, соединения фосфора, азота и др.). Исследования проводились в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН. Анализ проводился атомно-эмиссионными и масс-спектральными методами с индуктивно-связанной плазмой. Подробное описание методики изложено в (Karandashev et al., 2016).

Для сравнительного анализа гидрохимических и гидробиологических проб были рассчитаны два индекса: индекс сапробности S и индекс загрязненности вод ИЗВ (water pollution index, WPI). Индекс сапробности S по Сладечеку (Sládeček, 1973) был рассчитан по фитопланктонным комплексам (Руководство ..., 1992). Исходной информационной базой данных для расчета его численных значений послужила работа (Барина и др., 2006).

Гидрохимический ИЗВ установлен Госкомгидрометом СССР (Временные ..., 1986) и относится к категории показателей, наиболее часто используемых для оценки качества водных объектов. Этот индекс является типичным аддитивным коэффициентом и представляет собой среднюю долю превышения ПДК по строго лимитированному числу индивидуальных ингредиентов (загрязняющих веществ), в нашем случае – шести:

$$WPI = \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{c_i}{\text{ПДК}_i}}{6}, \quad (1)$$

где c_i – концентрация ингредиента i (в ряде случаев, например БПК₅, – значение физико-химического параметра); ПДК _{i} – установленная величина норматива (предельно допустимая концентрация) ингредиента i .

ИЗВ рассчитывают строго по шести показателям, имеющим наибольшие значения приведенных концентраций, независимо от того, превышают они ПДК или нет. Расчеты ИЗВ для Ивановского водохранилища проводились по следующим 6 параметрам: БПК₅, концентрации растворенного кислорода (O₂), железа (Fe), марганца (Mn), нефтепродуктов и иона аммония (NH₄⁺). В группу преваляющих загрязняющих компонентов были

¹ В палеолимнологии под зонами устойчивой седиментации подразумеваются участки дна, для которых характерны низкие и равномерные темпы осадконакопления. В этом случае осадки содержат достоверную хронологию событий прошлого, которую можно расшифровать с высоким временным разрешением (Соломина и др., 2013).

включены два параметра, имеющие выраженный антропогенный генезис: нефтепродукты и NH_4^+ . Таким образом, при расчете ИЗВ учитывался комплекс загрязняющих веществ, сбрасываемых в исследуемый водоем в значительных концентрациях.

Помимо стандартных (типовых) индексов к проведенным расчетам был привлечен интегральный индекс качества QI. Методика расчета QI основана на совмещении гидрохимических и гидробиологических данных (Зеленевская, 1998, 2011).

В отличие от методики ИЗВ, по которой предусмотрено применение средних значений химических ингредиентов, для расчета интегрального индекса использовались концентрации химических веществ на каждой станции, в каждый данный момент времени. Это способствовало проявлению экстремальных значений по некоторым показателям и регистрации комплексного загрязнения, приближенного к реальному для данного времени исследования.

По формуле для вычисления средней взвешенной величины, учитывающей значение WPI на каждой станции отбора и соответствующие характеристики численности (например: 1 – случайные находки, 3 – частая встречаемость, 5 – массовое развитие) выбранных видов-индикаторов, рассчитана экологическая валентность каждого из них:

$$e_k = \frac{\sum_j P_{kj} \text{WPI}_j}{\sum_j P_{kj}}, \quad (2)$$

где e_k – экологическая валентность вида k , P_{kj} – характеристика численности вида k в пробе j , WPI_j – значение ИЗВ в месте отбора пробы j , рассчитанное по формуле (1). Если вид k в пробе j не встречался, полагаем $P_{kj} = 0$.

Далее рассчитываются интегральные индексы качества вод (QI) для каждой станции на основании формулы, применяемой для расчета индекса сапробности по Пантле и Букку в модификации Сладечека (Sládeček, 1973), где вместо индексов сапробности видов-индикаторов использовались экологические валентности e_k :

$$\text{QI} = \frac{\sum_k e_k n_k}{\sum_k n_k}, \quad (3)$$

где n_k – показатель обилия вида k .

За основу классификации уровней загрязнения при анализе качества воды по предложенной методике принята “Классификация качества вод по ИЗВ” (Временные ..., 1981; Емельянова и др., 1982).

Преимущество QI перед индексом сапробности (S) заключается в том, что при определении значений экологических валентностей учитывается не только загрязнение легкоокисляемой органикой, но и токсическое загрязнение воды, характерное для исследуемых водоемов. Интегральный индекс QI более объективно отражает качество вод и экологическую обстановку конкретного водохранилища.

Кроме традиционных форм гидробиологических и биоиндикационных исследований, был применен метод графического анализа (МГА) (Разумовский, Моисеенко, 2009). МГА был многократно описан в научной литературе и в этой работе излагается только его краткое содержание (Разумовский, 2012; Разумовский, Гололобова, 2014; Разумовский и др., 2021).

МГА состоит из нескольких этапов. На первом этапе для всех идентифицированных в пробе таксонов (видового и более низкого ранга) рассчитывается их относительная численность в процентах. После этого строится исходный график или гистограмма. По оси абсцисс откладывается число идентифицированных таксонов, а по оси ординат – их относительная численность. При этом таксоны ранжируются по показателю относительной численности в сторону его уменьшения.

Были установлены три исходных классификационных типа графиков: экспоненциальный, логистический и линейный (рис. 2). Они соответствуют основным нециклическим формам зависимостей, которые возникают в экосистемах при их ответных реакциях на внешнее воздействие (Шитиков и др., 2005). Первые два типа графиков отражают, в той или иной степени, исходные, прижизненные таксономические пропорции в диатомовых комплексах. Третий тип распределения таксономических пропорций (линейный) соответствует переотложенным комплексам.

Кроме того, при анализе первичного массива данных и построении графиков, характеризующих таксономические пропорции в фитопланктонных комплексах, был использован новый методологический прием, позволивший наиболее объективно описать их таксономические пропорции при помощи МГА.

Обычно подсчет процентных пропорций в микрофлористических комплексах из поверхностных осадков проводится в конце осени, после окончания периода вегетационной активности, когда произошло отмирание клеток и их оседание на дно.

При анализе фитопланктонных комплексов была сымитирована эта ситуация: все просмотренные фитопланктонные комплексы, развивавшиеся в водной среде с весны до осени в данном пункте наблюдения, были совместно проанализированы, и абсолютная численность клеток всех

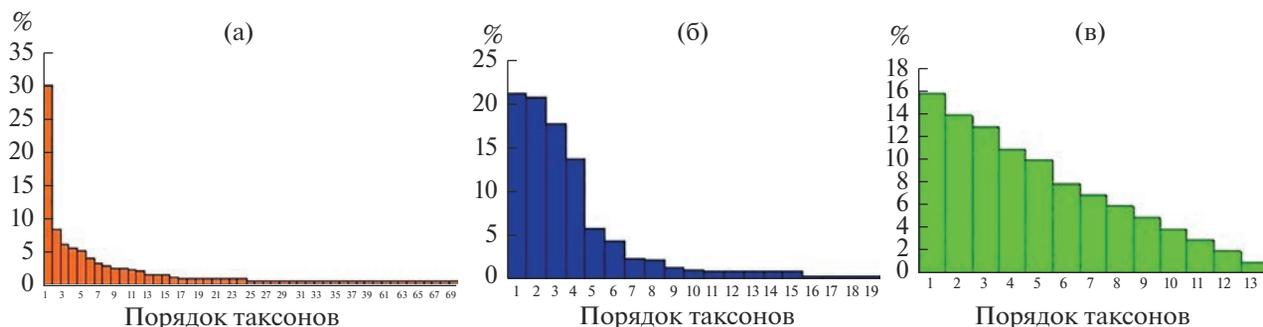


Рис. 2. Основные типы распределения таксономических пропорций (линейная размерность координат): (а) экспоненциальный, (б) логистический и (в) линейный.

идентифицированных таксонов просуммирована так же, как при их последовательном оседании на дно. В итоге для всех идентифицированных таксонов была рассчитана их относительная численность за весь период вегетационной активности в данном пункте за конкретный год (Разумовский и др., 2018). Проведенные расчеты позволили сопоставить таксономическую структуру фитопланктонных комплексов с диатомовыми комплексами из колонок ДО.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализом таксономического состава фитопланктонных комплексов 2017–2019 гг. было установлено, что наибольшая доля идентифицированных индикаторных видов сапробности (S) в Ивановском водохранилище относится к отделу диатомовых. Было обнаружено 156 видов-индикаторов органического загрязнения. Большинство из них относятся к мезосапробам.

Констатируется ожидаемая сезонная повторяемость численных значений S. Их незначительная ежегодная вариативность определяется природно-климатическими, погодными условиями. Подавляющее большинство численных значений S не выходит за рамки β -мезосапробной зоны (рис. 3).

Полученные результаты подтверждают, что принятый при биомониторинге расчет индекса сапробности (S) обладает исходным методологическим недостатком, что приводит к нивелированию реальной сапробиологической обстановки на водохранилище (Шитиков и др., 2005).

Расчет численных значений интегрального индекса качества QI производился на основе результатов химических и биологических анализов, проведенных с мая по сентябрь в 2017–2019 гг. с прибрежных участков створов. В результате расчетов были получены экологические валентности e_k для 59 видов-индикаторов Ивановского водохранилища, отражающие отношение каждого

из них к комплексному воздействию химических веществ.

Установлена выраженная сезонная повторяемость численных значений QI, их незначительная вариативность (рис. 4). Это определяется ежегодной повторяемостью превышений ПДК по аналогичному спектру загрязняющих веществ, поступающих в водохранилище.

В 2021–2022 гг. на протяжении всего цикла вегетационной активности в фитопланктонных комплексах Рыбинского водохранилища доминировали цианопрокариоты и диатомовые водоросли. Наибольшим таксономическим (видовым) разнообразием отличались диатомовые. Доминирующие комплексы фитопланктона характеризовались значительным числом золотистых, динофитовых, криптофитовых и зеленых водорослей. В фитопланктонных пробах Рыбинского водохранилища было идентифицировано более 200 низших таксонов (видов, вариететов и форм). Расчет индекса сапробности S с учетом унификации биоиндикационных методов (Моисеенко, Разумовский, 2009) и подсчета суммарной относительной численности видов-индикаторов (Разумовский и др., 2018) позволил установить средние численные значения S для всех точек отбора мониторинга: Коприно – 1.98; Молога – 1.87; Средний Двор – 1.77; Наволок – 1.7; Измайлово – 1.78; Брейтово – 1.9. Результаты расчетов свидетельствуют о принадлежности всего водохранилища к β -мезосапробной зоне.

Кроме того, очевидно, что более высокие показатели сапробности характерны для прибрежных районов, а более низкие – для открытой и более глубоководной части водохранилища. Полученные результаты вполне сопоставимы с данными, полученными по диатомовым комплексам из колонки ДО, отобранной в пункте Коприно в 2018 г.

Прежде чем анализировать долговременные изменения гидрохимических и гидробиологических параметров водохранилищ, было необходимо установить отсутствие процессов переотложе-

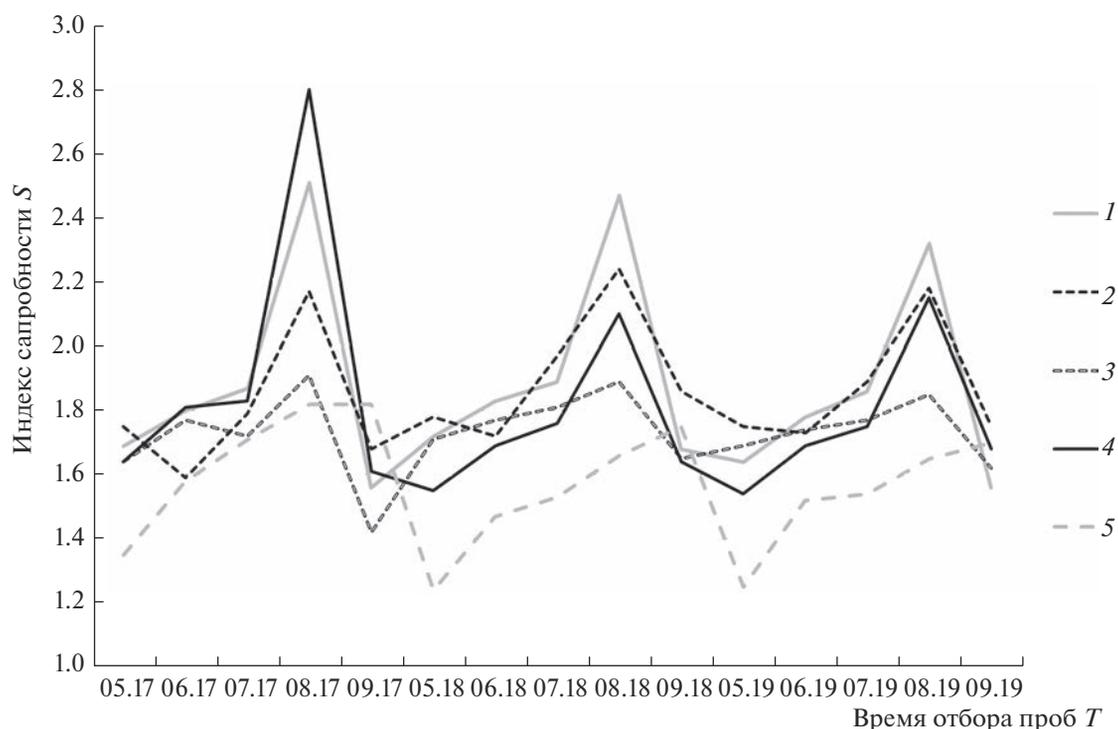


Рис. 3. Изменение численных значений индекса сапробности S в Иваньковском водохранилище в 2017–2019 гг. 1 – Шошинский плес; 2 – Верхневолжский плес; 3 – Средневолжский плес (с. Городня); 4 – Средневолжский плес (г. Конаково); 5 – Иваньковский плес.

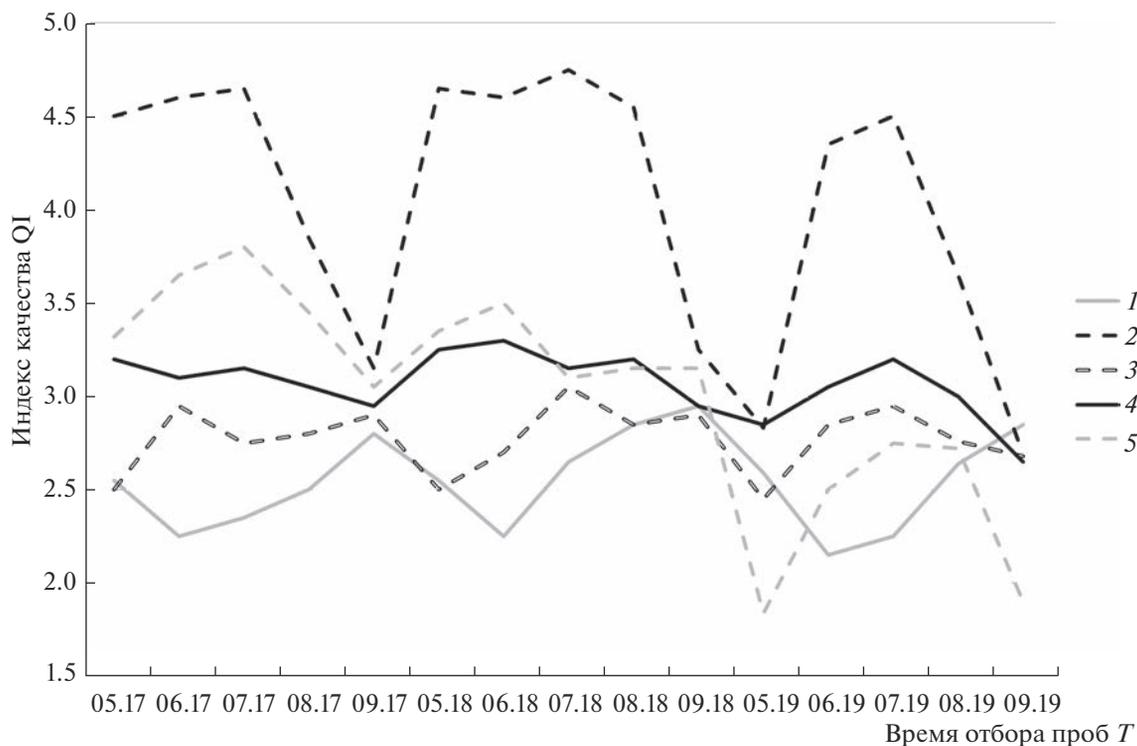


Рис. 4. Изменение численных значений интегрального индекса качества QI в Иваньковском водохранилище в 2017–2019 гг. Обозначения приведены на рис. 3.

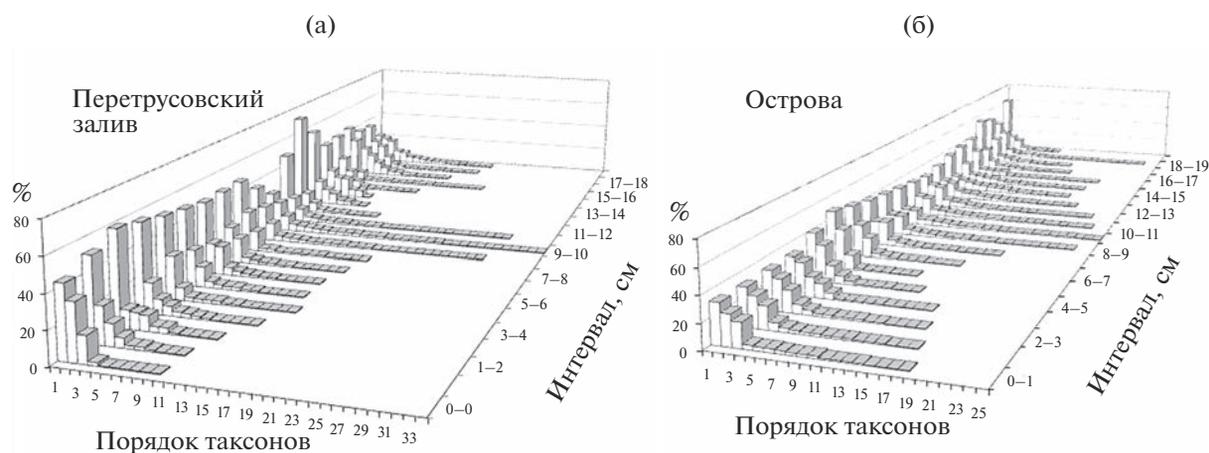


Рис. 5. Таксономическая структура диатомовых комплексов из колонок донных отложений в Ивановском водохранилище из Перетрусовского залива (а) и из района Островов (б).

ния в сформировавшихся ДО. Если в отобранных колонках ДО были бы зафиксированы процессы переотложения, то это существенно затруднило бы восстановление непрерывности анализируемых процессов, происходящих в водоемах. Для Ивановского водохранилища все построенные гистограммы имеют плавные пропорциональные очертания логистического, экспоненциального или смешанного (экспоненциально-логистического) типа (рис. 5а, 5б).

Таксономическая структура диатомовых комплексов была так же изучена в образцах из колонки ДО, отобранной в Рыбинском водохранилище в районе Коприно (рис. 6).

Анализ в линейной системе координат позволил также сделать вывод, что все полученные гистограммы имеют пропорциональные очертания, преимущественно экспоненциального характера распределения (см. рис. 5, 6). Ни в одном из интервалов колонки ДО выраженных процессов переотложения выявлено не было.

Это позволило провести достоверный анализ изменения концентраций тяжелых металлов и реконструкцию долговременных изменений трофического статуса водохранилища по концентрации соединения фосфора. К наиболее значимым результатам следует отнести увеличение концентрации тяжелых металлов в нижних горизонтах колонок ДО. Данная закономерность характерна для обоих обследованных водохранилищ (рис. 7).

В результате проведенных расчетов были получены численные значения S вдоль всего разреза колонки ДО отобранной в Перетрусовском заливе (Ивановское водохранилище). Исходя из численных значений и построенной линии тренда, в заливе констатируется выраженные процессы сапробизации, что, вероятно, связано с зарас-

танием и накоплением органики в прибрежной зоне. За проанализированный промежуток времени индекс сапробности повысился с 1.575 до 1.725 (рис. 8).

В образцах из колонки ДО, отобранной в районе Островов, были также рассчитаны численные значения S . Констатированы малозначительные изменения, носящие циклический характер (см. рис. 8).

Расчет изменения численных значений QI по разрезу двух колонок ДО из Ивановского водохранилища проводился по 16 видам-индикаторам в районе Островов и по 19 видам-индикаторам в районе Перетрусовского залива, которые были идентифицированы в диатомовых комплексах. В отличие от результатов, полученных при долговременном изменении численных значений S , при расчете численных значений QI констатируется направленное ухудшение качества вод как на открытых участках водохранилища (Острова), так и в прибрежной зоне (Перетрусовский залив) (см. рис. 8).

Ранее, при изложении методики расчета QI , было упомянуто, что она предваряется расчетами ИЗВ. Процессы изменения трофического статуса водоема могут иметь двойственную природу и зависеть от природных факторов и антропогенных воздействий. Именно поэтому долговременные изменения численных значений S существенно различаются в прибрежной зоне с низкой проточностью (Перетрусовский залив) и в открытых участках (Острова) (см. рис. 8).

Долговременное изменение численных значений QI однозначно свидетельствует о повышении антропогенной нагрузки, что оказывает негативное воздействие на все участки Ивановского водохранилища (см. рис. 8).

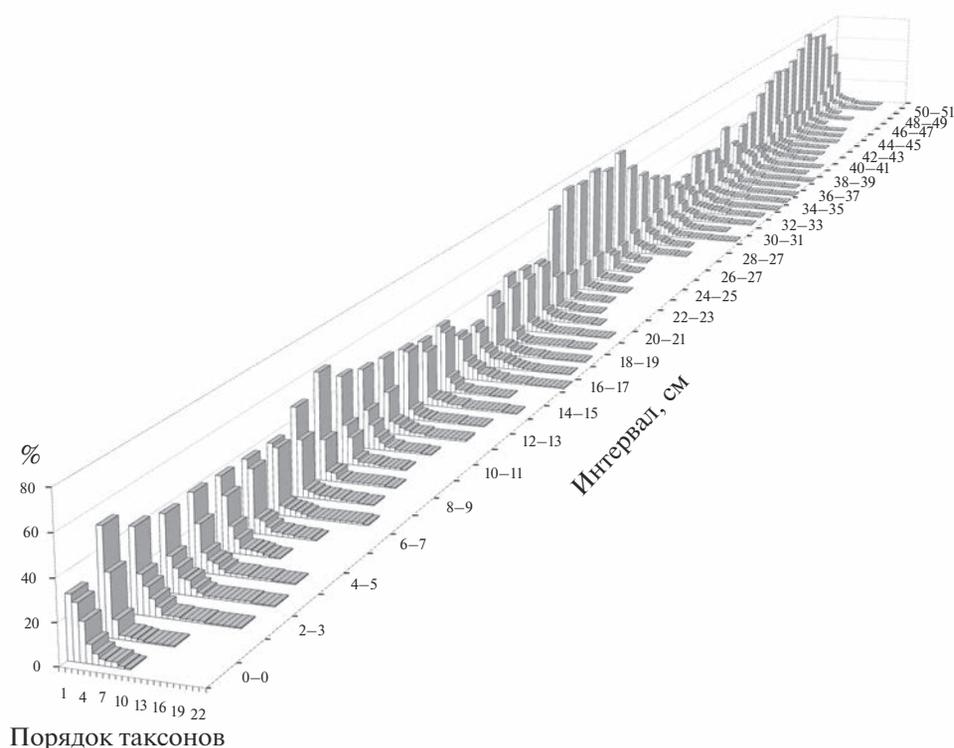


Рис. 6. Таксономическая структура диатомовых комплексов из колонки донных отложений в Рыбинском водохранилище из района Коприно.

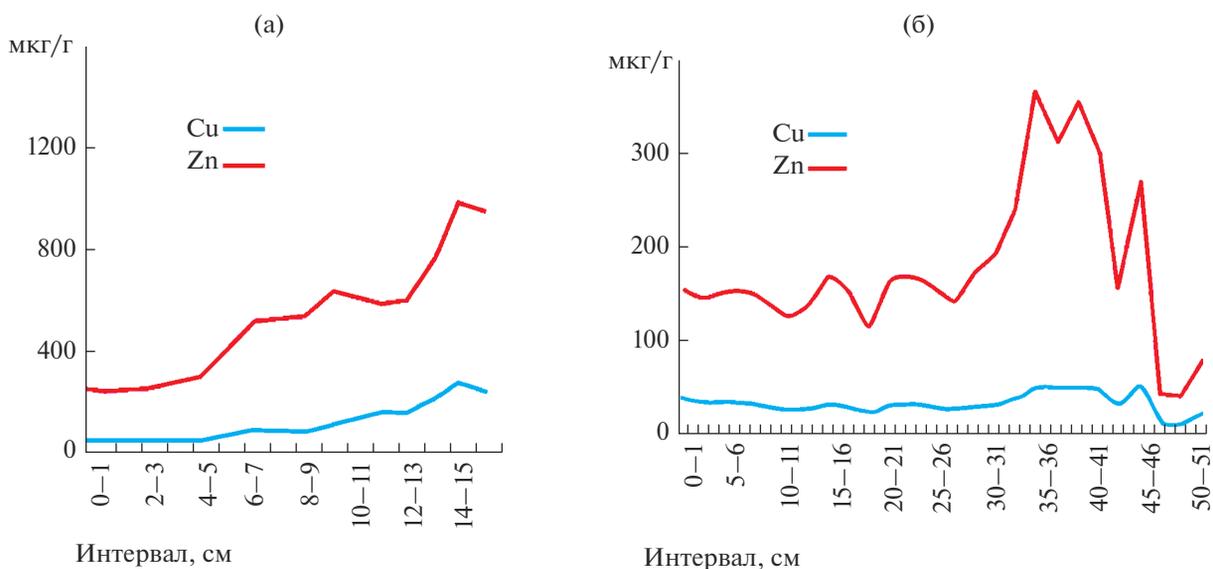


Рис. 7. Распределение тяжелых металлов (Cu и Zn) в колонках донных отложений из Иваньковского (а) и Рыбинского (б) водохранилищ.

Наглядной демонстрацией применения нового метода оценки долговременных негативных изменений было проведение исследований по оценке информативности рассчитываемого ин-

декса сапробности S и интегрального индекса качества QI .

Ранее полученные результаты подтвердили, что принятый при биомониторинге расчет индекса

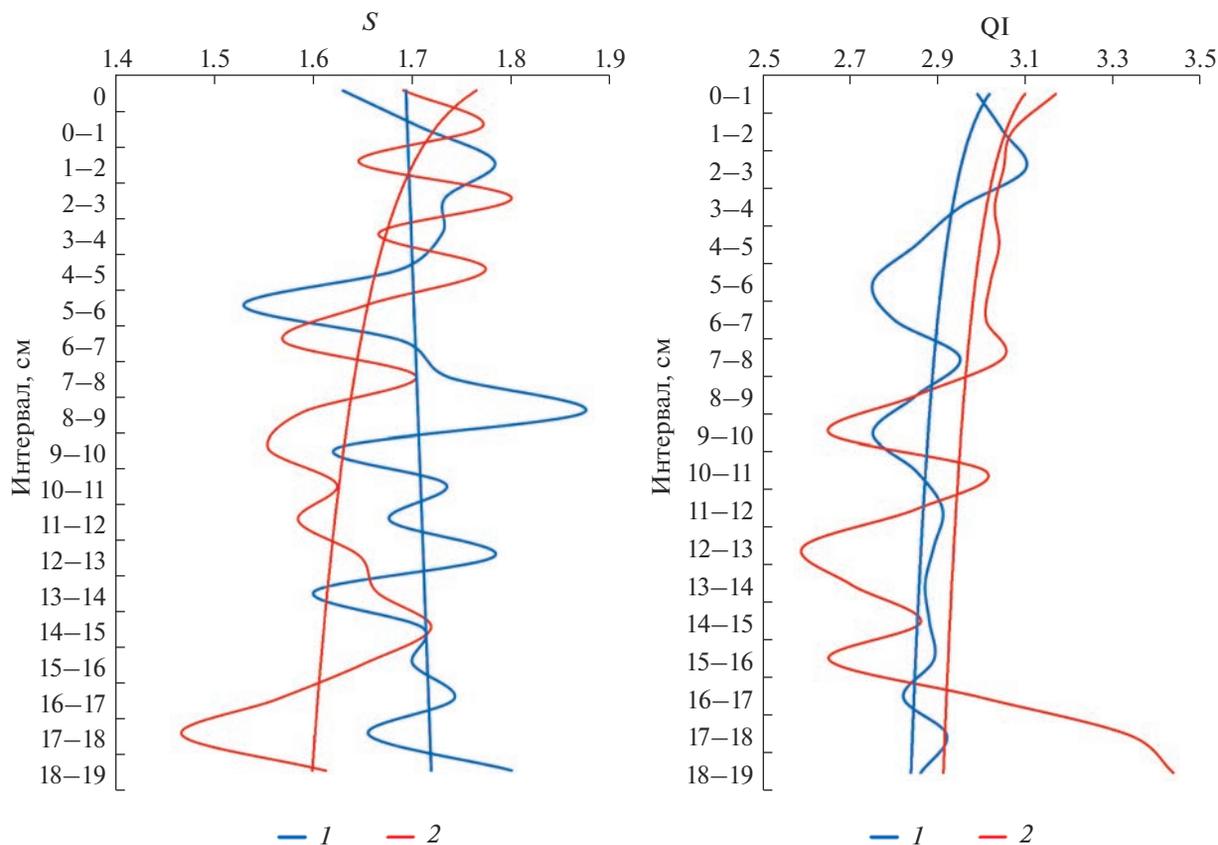


Рис. 8. Долговременные изменения численных значений S и QI в Ивановском водохранилище. Численные значения и результирующие линии: 1 – в районе Островов, 2 – в Перетрусовском заливе.

сапробности S обладает исходным методологическим недостатком: происходит “выравнивание”, или нивелирование реальной сапробиологической обстановки в водохранилище (Шитиков и др., 2005). Численные значения интегрального индекса качества QI более информативны, но их расчет более сложен.

В 2018 г. были отобраны две колонки ДО в районе Коприно (Рыбинское водохранилище). Мощность колонок составила 52 и 54 см. При химическом анализе образцов по разрезу ДО из Рыбинского водохранилища было отмечено повышение концентрации P_2O_5 (рис. 9). Это свидетельствует об окончании периода умеренного эвтрофного статуса Рыбинского водохранилища (Минева, 2004) и очередного периода эвтрофирования водоема (Сигарева и др., 2013; Сигарева, Тимофеева, 2018). В образцах из колонки ДО, отобранной в районе Коприно, было идентифицировано 52 вида-индикатора сапробности. Расчет долговременных изменений численных значений индекса сапробности S привел к аналогичным заключениям (см. рис. 9).

В сентябре 2022 г. была отобрана колонка ДО в Видогошинском заливе Ивановского водохра-

нилища. Глубина в районе затопленного оз. Видогошь составляет более 19 м (см. рис. 4). Максимальная длина колонки, отобранной в центре палеозера, составила 95 см.

При осмотре образцов из колонки ДО была отмечена выраженная зона перехода осадков озерного генезиса, сформировавшихся до затопления озера в 1937 г., в осадки, накопившиеся после создания водохранилища. Общая мощность осадков, сформировавшихся с момента создания водохранилища, составляет около 55 см.

Предварительный просмотр диатомовых комплексов по всему разрезу колонки подтвердил вышеизложенные наблюдения. В верхней части колонки доминирующий комплекс представлен центрическими видами диатомовых водорослей, которые по видовому составу сходны с таксономическим составом диатомовых комплексов из колонок ДО, отобранных ранее в Перетрусовском заливе и в районе Островов. В нижней части колонки преобладают диатомовые комплексы озерного генезиса с преобладанием пеннатных форм из перифитонных комплексов со значительной долей бентосных форм.

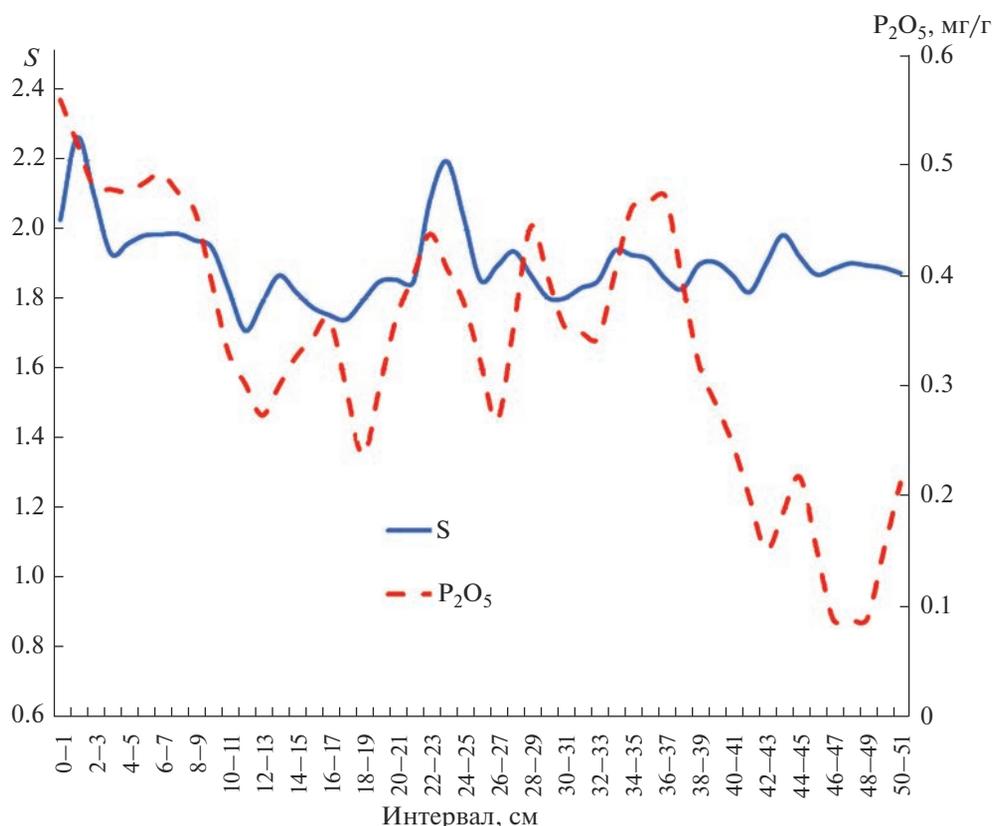


Рис. 9. Численные значения концентрации P_2O_5 и индекса сапробности S по разрезу колонки донных отложений из Рыбинского водохранилища (Коприно).

ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении исследовательских работ было констатировано, что две колонки ДО, отобранные в Ивановском водохранилище, не характеризуют все этапы осадконакопления. Косвенным подтверждением этого вывода является длина колонок ДО, отобранных в Рыбинском водохранилище (52–54 см).

Длина двух колонок, отобранных в Ивановском водохранилище, составляет 21 и 19 см. Разумеется, темпы седиментации в водохранилищах могут различаться, но не более чем в два раза, как в этом случае. Предположительно эти зоны седиментации сформировались за последние несколько десятилетий. Это связано с долговременным преобразованием береговых, прибрежных и островных зон, процессами абразии, эрозии и др.

Гидродинамический режим Рыбинского водохранилища в районе Коприно позволил накапливаться ДО на протяжении всего времени существования водоема. При визуальном осмотре образцов из колонки ДО было установлено, что нижние горизонты (50–54 см) сформировались в речных условиях, т.е. до создания Рыбинского

водохранилища. Полученные результаты подтверждаются гранулометрическим составом ДО и имеющимися данными об изменении магнитных параметров и процентного содержания органических веществ вдоль кернов ДО (Законнов и др., 2018; Куражковский и др., 2002). Следовательно, темпы седиментации на этом участке составляют, предположительно, около 0.7 см/год.

Уже после реализации первого этапа работ был сформулирован другой подход к поиску зон формирования ДО. Это стало возможным после обнаружения озер, затопленных после создания Рыбинского и Ивановского водохранилищ.

Очевидно, что образовавшийся рельеф дна определяет зону месторасположения реликтовых озер как зону устойчивой седиментации в сформированных водохранилищах с момента их возникновения. Более того, зона накопления ДО в условиях сформированного водохранилища может быть достоверно распознана и выделена по диатомовому анализу при сравнении с теми осадками, которые образовались в затопленных озерах до создания водохранилища. Это позволяет

получить данные о планктонной биоте и химическом составе вод на протяжении всего существования водохранилищ.

Более того, значимая составляющая диатомовых водорослей в фитопланктонных комплексах (40–60%) позволяет провести возрастную идентификацию диатомовых комплексов из ДО с теми или иными интервалами биомониторинга, который проводился на обоих водохранилищах.

Планируется комплексное изучение колонок ДО в зонах непрерывной седиментации и анализ многолетних рядов гидрохимических и гидробиологических наблюдений. В качестве объектов исследований вновь выбраны Ивановское и Рыбинское водохранилища. Это определяется длительностью их существования, мощностью накопившихся отложений, достоверным наличием палеозер и степенью изученности.

В дальнейшем планируется решение и обратной задачи: возможность “заполнить” временной промежуток 1990-х, когда биомониторинг был прерван, и информация была потеряна. Разумеется, это возможно со значительными допущениями, поскольку такие значимые группы фитопланктона, как зеленые, сине-зеленые и другие, не сохраняются в осадке. Однако их видовой состав и численность имеют выраженную зависимость от таксономической структуры диатомовых комплексов. Если обратная задача по восстановлению непрерывности рядов наблюдений будет успешно разрешена, то станет возможной достоверная реконструкция долговременных изменений в таксономической структуре фитопланктонных комплексов с самого момента создания водохранилища, когда система биомониторинга еще не была внедрена.

ВЫВОДЫ

1. Комплексный анализ колонок ДО позволяет получить достоверную информацию о долговременных изменениях, происходящих в водохранилищах под воздействием антропогенных нагрузок и природных изменений.

2. Достоверность информации определяется тем, что расчету всех биоиндикационных параметров будет неизменно сопутствовать анализ химического состава водной среды и ДО.

3. Наибольшие затруднения при подобных исследованиях вызывает поиск зон устойчивой седиментации в водохранилищах.

4. На основе проведенных исследований возможен достоверный и обоснованный прогноз, подразумевающий анализ живых и неживых компонентов водохранилища как единой системы.

5. Предложенный метод исследований позволяет не только получить информацию об истории развития водохранилищ с момента их образования, но и реконструировать экологическую обстановку в те временные интервалы, когда мониторинг был прерван.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002 Государственного задания ИВП РАН.

FUNDING

The work was carried out within the framework of the State Assignment theme no. FMWZ-2022-0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В.* Биоразнообразии водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив, 2006. 500 с.
- Временные методические рекомендации по оперативному прогнозированию загрязненности рек. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 102 с.
- Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод. Утв. Госкомгидрометом СССР 22.09.1986 г. № 250-1163. М., 1986. 5 с.
- Давыдова Н.Н.* Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
- Диатомовый анализ. Кн. 1. Л.: Госгеолитиздат, 1949. 239 с.
- Емельянова В.П., Данилова Г.Н., Колесникова Т.Х.* Обзор методов оценки качества поверхностных вод по гидрохимическим показателям // Гидрохимические материалы. 1982. Т. 81. С. 121–131.
- Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шершова Н.Г.* Гидродинамические процессы их роль в формировании донных осадков Волжско-Камского каскада // Труды ИБВВ РАН. 2018. Вып. 81 (84). С. 35–46.
- Зеленевская Н.А.* Мониторинг фитопланктона и оценка экологического состояния Саратовского водохранилища: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Тольятти, 1998. 25 с.
- Зеленевская Н.А.* Фитопланктон Саратовского водохранилища в 2006–2010 годах // Вестн. Волжского ун-та им. В.Н. Татищева. 2011. № 12. С. 130–137.
- Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И., Законнов В.В.* Стратификация горизонтов в донных осадках Рыбинского водохранилища // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 5. С. 522–555.
- Минеева Н.М.* Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М.: Наука, 2004. 156 с.
- Моисеенко Т.И., Разумовский Л.В.* Новая методика реконструкции катионно-анионного баланса в озе-

- рах (диатомовый анализ) // ДАН. Общая биология. 2009. Т. 427. № 1. С. 132–135.
- Разумовский Л.В. Оценка трансформации озерных экосистем методом диатомового анализа. М.: Геос, 2012. 199 с.
- Разумовский Л.В. Оценка информативности новой концепции комплексного мониторинга на примере трех водохранилищ / Сб. трудов XVII международной научной конф. диатомологов. Диатомовые водоросли: морфология, биология, систематика, флористика, экология, палеогеография, биостратиграфия (Минск, 23–28 августа 2021 г.). Минск: Колоград, 2021. С. 106–112.
- Разумовский Л.В., Гололобова М.А. Долговременные трансформации диатомовых комплексов в озерах Борое и Глубокое // Вестн. Моск. ун-та. Серия 16: Биология. 2014. № 1. С. 19–23.
- Разумовский Л.В., Корнева Л.Г., Анисимова А.В., Кушнарева Т.Н. Оценка долговременных трансформаций экосистемы Рыбинского водохранилища по фитопланктонным комплексам / Сб. трудов XVII междунар. науч. конф. диатомологов (Минск, 23–28 августа 2021 г.). Минск: Колоград, 2021. С. 113–116.
- Разумовский Л.В., Моисеенко Т.И. Оценка пространственно-временных трансформаций озерных экосистем методом диатомового анализа // ДАН. Общая биология. 2009. Т. 429. № 3. С. 274–277.
- Разумовский Л.В., Щеголькова Н.М., Разумовский В.Л. Перспективы применения метода графического анализа таксономических пропорций при изучении фитопланктона реки Москвы // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. 29. № 1. С. 5–18.
- Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 320 с.
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 541 с.
- Сigareва Л.Е., Законнов В.В., Тимофеева Н.А., Касьянова В.В. Осадочные пигменты и скорость илонакопления как показатели трофического состояния Рыбинского водохранилища // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 1. С. 62–69.
- Сigareва Л.Е., Тимофеева Н.А. Содержание растительных пигментов в донных отложениях водохранилищ Волги // Труды ИБВВ РАН. 2018. Вып. 81 (84). С. 105–114.
- Соломина О.Н., Калугин И.А., Александрин М.Ю., Бушуева И.С., Дарин А.В., Долгова Е.А., Жомелли В., Иванов М.Н., Мацковский В.В., Овчинников Д.В., Павлова И.О., Разумовский Л.В., Чепурная А.А. Бурение осадков оз. Каракель (долина р. Теберда) и перспективы реконструкции истории оледенения и климата голоцена на Кавказе // Лёд и Снег. 2013. № 2 (122) С. 102–111.
- Шутиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решение. Кн. 1. М.: Наука, 2005. 281 с.
- Karandashev V.K., Leikin A. Yu., Khvostikov V.A., Kutseva N.K., Pirogova S.V. Water Analysis by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry // Inorganic Materials. 2016. Vol. 52. № 14. P. 1391–1404.
- Renberg I. A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores // J. of Paleolimnology. 1990. Vol. 4. P. 87–90.
- Sládeček V. System of water quality from biological point of view // Arch. Hydrobiol. Ergeb. Limnol. 1973. Vol. 7. № 1. P. 1–218.

Long-Term Changes Reconstruction in Two Upper Volga Reservoirs Based on the Bottom Sediments Comprehensive Analysis Data

L. V. Razumovskii¹*, T. N. Kushnareva¹, V. L. Razumovskii¹, and A. V. Anisimova¹

¹Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: lazy-lion@mail.ru

The paper presents a new research program for assessing long-term transformations occurring in reservoirs. To assess the prospects of the proposed studies, the Ivankovo and Rybinsk reservoirs were selected due to their advanced age, the power of accumulated deposits, and the degree of study. The novelty of the research consisted of the joint analysis of the results of phytoplankton complexes biomonitoring and the analysis of the diatom complexes species composition from the bottom sediments columns. At the same time, the analysis of the waters and samples chemical composition from the bottom sediments columns was carried out. The absence of redeposition processes during the formation of sediments at the sampling points was confirmed by the method of taxonomic proportions graphical analysis in diatom complexes. This determines the reliability of the diatom and chemical analysis results' comparison of the bottom sediments. The results of the water quality assessment by two indexes are considered according to the monitoring data: the saprobity index S and the integral water quality index QI. The expected seasonal repeatability of the numerical values of S and QI is stated. Similar calculations were carried out for indicator species from diatom complexes in the bottom sediments columns samples. The processes of water quality deterioration according to the above-mentioned indexes are noted. As a result of the research conducted, the optimal location of bottom sediments column sam-

pling points in the Rybinsk and Ivankovo reservoirs was established. During the formation of reservoirs, the lakes located on their territory were flooded. The resulting morphometric bottom relief determined those relict lakes' locations as zones of stable sedimentation. According to the comprehensive studies results, long-term negative processes caused by anthropogenic load have been confirmed in the investigated reservoirs.

Keywords: integrated monitoring, phytoplankton, diatoms, bottom sediments

REFERENCES

- Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. *Bioraznoobrazie vodoroslei – indikatorov okruzhayushchei sredy* [Biodiversity of Algae – Indicators of the Environment]. Tel Aviv, 2006. 500 p.
- Davydova N.N. *Diatomovye vodorosli – indikatory prirodnykh uslovii vodoemov v golotsene* [Diatoms Indicators of Natural Conditions of Reservoirs in the Holocene]. Leningrad: Nauka Publ., 1985. 244 p.
- Diatomovi analiz. Kn. 1* [Diatom Analysis. Book 1]. Leningrad: Gosgeolizdat Publ., 1949. 239 p.
- Emel'yanova V.P., Danilova G.N., Kolesnikova T.X. Review of methods for assessing the quality of surface waters by hydrochemical indicators. *Gidrokhim. Materialy*, 1982, vol. 81, pp. 121–131. (In Russ.).
- Karandashev V.K., Leikin A.Yu., Khvostikov V.A., Kutseva N.K., Pirogova S.V. Water Analysis by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Inorg. Mater.*, 2016, vol. 52, no. 14, pp. 1391–1404.
- Kurazhkovskii A.Yu., Kurazhkovskaya N.A., Klain B.I., Zakonnov V.V. Stratification of Horizons in Bottom Sediments of the Rybinsk Reservoir. *Water Resour.*, 2002, vol. 29, pp. 506–509.
<https://doi.org/10.1023/A:1020317729396>
- Mineeva N.M. *Rastitel'nye pigmenty v vode volzhskikh vodokhranilishch* [Plant Pigments in the Water of the Volga Reservoirs]. Moscow: Nauka Publ., 2004. 156 p.
- Moiseenko T.I., Razumovsky L.V. A new technique for reconstructing the cation-anion balance in lakes by diatom analysis. *Dokl. Biol. Sci.*, 2009, vol. 427, pp. 325–328.
<https://doi.org/10.1134/S0012496609040061>
- Razumovsky L.V. Evaluation of the informativeness of the new concept of integrated monitoring on the example of three reservoirs. In *Diatomovye vodorosli: morfologiya, biologiya, sistematika, floristika, ekologiya, paleogeografiya, biostratigrafiya. Sbornik Tr. XVII Mezhd. Nauch. Konf. Diatomologov* [Diatoms: Morphology, Biology, Taxonomy, Floristry, Ecology, Paleogeography, Biostratigraphy. Proc. of the XVII Int. Sci. Conf. of Diatomologists]. Minsk: Kolograd Publ., 2021, pp. 106–112. (In Russ.).
- Razumovsky L.V. *Otsenka transformatsii ozernykh ekosistem metodom diatomovogo analiza* [Assessment of Transformation of Lake Ecosystems by Diatom Analysis]. Moscow: GEOS Publ., 2012. 199 p.
- Razumovsky L.V., Gololobova M.A. Long-term transformations of diatom complexes in Boro and Glubokoe lakes. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 16: Boiol.*, 2014, no. 1, pp. 19–23. (In Russ.).
- Razumovsky L.V., Korneva L.G., Anisimova A.V., Kushnareva T.N. Assessment of long-term transformations of the ecosystem of the Rybinsk reservoir by phytoplankton complexes. In *Diatomovye vodorosli: morfologiya, biologiya, sistematika, floristika, ekologiya, paleogeografiya, biostratigrafiya. Sbornik trudov XVII Mezhd. Nauch. Konf. Diatomologov* [Diatoms: Morphology, Biology, Taxonomy, Floristry, Ecology, Paleogeography, Biostratigraphy. Proc. of the XVII Int. Sci. Conf. of Diatomologists]. Minsk: Kolograd Publ., 2021, pp. 113–116. (In Russ.).
- Razumovsky L.V., Moiseenko T.I. Estimation of spatiotemporal transformations of lake ecosystems by the method of diatom analysis. *Dokl. Biol. Sci.*, 2009, vol. 429, pp. 514–517.
<https://doi.org/10.1134/S0012496609060106>
- Razumovsky L.V., Shchegol'kova N.M., Razumovsky V.L. Prospects of applying the method of graphical analysis of taxonomic proportions in the study of phytoplankton of the Moscow River. *Probl. Ekol. Monitor. Modelir. Ekosist.*, 2018, vol. 29, no. 1, pp. 5–18. (In Russ.).
- Renberg I. A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores. *J. Paleolimnol.*, 1990, vol. 4, pp. 87–90.
- Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem* [Guidelines for Hydrobiological Monitoring of Freshwater Ecosystems]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 1992. 320 p.
- Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushy* [Guidelines for the Chemical Analysis of Land Surface Waters]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977. 541 p.
- Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. *Kolichestvennaya gidroekologiya: metody, kriterii, resheniya. Kn. 1* [Quantitative Hydroecology: Methods, Criteria, Solutions. Book 1]. Moscow: Nauka Publ., 2005. 281 p.
- Sigareva L.E., Timofeeva N.A. The content of plant pigments in the bottom sediments of the Volga reservoirs. *Tr. IBVV RAN*, 2018, vol. 81, pp. 105–114. (In Russ.).
- Sigareva L.E., Zakonnov V.V., Timofeeva N.A., Kas'yanova V.V. Sediment pigments and silting rate as indicators of the trophic condition of the Rybinsk Reservoir. *Water Resour.*, 2013, vol. 40, pp. 54–60.
<https://doi.org/10.1134/S0097807813010090>
- Slàdeček V. System of water quality from biological point of view. *Arch. Hydrobiol. Ergeb. Limnol.*, 1973, vol. 7, no. 1, pp. 1–218.
- Solomina O.N., Kalugin I.A., Aleksandrin M.Yu., Bushueva I.S., Darin A.V., Dolgova E.A., Zhomelli V., Ivanov M.N., Mackovsky V.V., Ovchinnikov D.V., Pav-

- Iova I.O., Razumovsky L.V., Chepurnaya A.A. Drilling of lake sediments. Karakol (Teberda River Valley) and prospects for reconstructing the history of glaciation and Holocene climate in the Caucasus. *Led i Sneg*, 2013, vol. 122, no. 2, pp. 102–111. (In Russ.).
- Vremennye metodicheskie rekomendatsii po operativnomu prognozirovaniyu zagryaznennosti rek* [Temporary Methodological Recommendations for Operational Forecasting of River Pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1981. 102 p.
- Vremennye metodicheskie ukazaniya po kompleksnoi otsenke kachestva poverkhnostnykh i morskikh vod. Utv. Goskomgidrometom SSSR 22.09.1986 g. № 250-1163* [Temporary Guidelines for a Comprehensive Assessment of the Quality of Surface and Marine Waters. Approved by Goskomgidrometom USSR in 22.09.1986. No. 250-1163]. Moscow, 1986. 5 p.
- Zakonnov V.V., Zakonnova A.V., Tsvetkov A.I., Sherysheva N.G. Hydrodynamic processes and their role in the formation of bottom sediments of the Volga-Kama cascade. *Tr. IBVV RAN*, 2018, vol. 81, pp. 35–46. (In Russ.).
- Zelenevskaya N.A. Phytoplankton monitoring and assessment of the ecological state of the Saratov reservoir. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Tol'yatti, 1998. 25 p.
- Zelenevskaya N.A. Phytoplankton of the Saratov reservoir in 2006–2010. *Vestn. Volzh. Univ. Tatishcheva*, 2011, no. 12, pp. 130–137. (In Russ.).