

ISSN 0320-3557

Российская академия наук

Труды Института биологии внутренних  
вод имени И.Д. Папанина Российской  
академии наук  
Выпуск 75 (78)



# ГИДРОЛОГО- ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОЕМОВ БАССЕЙНА ВОЛГИ



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ВНУТРЕННИХ ВОД ИМЕНИ И.Д. ПАПАНИНА РАН



Труды ИБВВ РАН, вып. 75 (78), 2016

*60-летию ИБВВ РАН посвящается*

# **ГИДРОЛОГО- ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОЕМОВ БАССЕЙНА ВОЛГИ**

УДК 556.531.4(282.247.41)  
ББК 28.59я4+28.69я4  
Г46

**Гидролого-гидрохимические исследования водоемов бассейна Волги** / РАН, Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина ; [отв. ред. С. А. Поддубный]. – Ярославль : Филигрань , 2016. – 116 с. – (ИБВВ им. И. Д. Папанина. Труды ; вып. 75 (78)).

*Н. А. Афиногенова, Н. В. Васильева, М. В. Гапеева, В. В. Законнов, А. В. Законнова, Л. А. Кучай, А. С. Литвинов, Н. Г. Отыюкова, С. А. Поддубный, А. А. Прокин, Е. Н. Соколова, И. Э. Степанова, А. И. Цветков*

В выпуске представлены статьи, написанные на основе избранных докладов, подготовленных для Международной конференции “Актуальные проблемы изучения биологии внутренних вод”, посвященной 60-летию Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. В работах отражены результаты исследований по разнообразным вопросам гидрометеорологии, гидрологии и гидрохимии, а также влиянию абиотических факторов на состояние биологических сообществ разнотипных водных объектов.

Книга рассчитана на гидрологов, гидрохимиков, гидробиологов, экологов и специалистов в области охраны и использования водных ресурсов, а также студентов географических, биологических и экологических факультетов.

**Ответственный редактор тома**  
доктор географических наук **С. А. Поддубный**

**Рецензенты:**  
Доктор географических наук, профессор **Ю. С. Даценко**  
Доктор биологических наук, профессор **Ю. В. Герасимов**

**Редакционная коллегия Трудов ИБВВ РАН:**

<i>С. А. Поддубный</i> (главный редактор)	<i>А. Н. Дзюбан</i>
<i>А. В. Крылов</i> (зам. главного редактора)	<i>В. Т. Комов</i>
<i>А. А. Бобров</i>	<i>В. И. Лазарева</i>
<i>В. К. Голованов</i>	<i>Н. М. Минеева</i>

*Печатается по решению Ученого совета ИБВВ РАН*

*Издание осуществлено при поддержке гранта РФФИ 16-04-20126*

**Hydrological and hydrochemical investigations catchment area of Volga/** [Editor-in-chief S. A. Poddubny]. – Yaroslavl : Filigran, 2016. – 116 p. Transactions if I. D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS, issue 75 (78).

*N. A. Afinogenova, N. V. Vasilieva, M. V. Gapeeva, V. V. Zakonnov, A. V. Zakonnova, L. A. Kuchai, A. S. Litvinov, N. G. Otyukova, S. A. Poddubny, A. A. Prokin, E. N. Sokolova, I. E. Stepanova, A. I. Tsvetkov*

The issue contains articles written on the basis of selected reports prepared for the International Conference "Actual problems of studying Biology of Inland Waters", dedicated to the 60th anniversary of the Institute of Biology Inland Waters I.D. Papanin Sciences. The work reflects the results of studies on various aspects of hydrometeorology, hydrology and hydrochemistry, as well as the influence of abiotic factors on the biological communities of different types of water bodies.

The book is intended for hydrologists, hydrochemists, hydrobiologists, environmentalists and experts in the field of water protection and use, as well as students geographic, biological and environmental departments.

**Editor-in-chief of the volume**  
Doctor of geographical sciences **S. A. Poddubny**

**Reviewers:**  
Doctor of geographical sciences, professor **Y. S. Datsenko**  
Doctor of biological sciences, professor **Y. V. Gerasimov**

**Editorial board of IBIW RAS Transactions:**

<i>S. A. Poddubny</i> (editor-in-chief)	<i>A. N. Dzyuban</i>
<i>A. V. Krylov</i> (deputy chief editor)	<i>V. T. Komov</i>
<i>A. A. Bobrov</i>	<i>V. I. Lazareva</i>
<i>V. K. Golovanov</i>	<i>N. M. Mineeva</i>

*Published by the decision of IBIW RAS Academic council*

*The book is published by the grant RFBR 16-04-20126*

© Институт биологии внутренних вод РАН, 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>А. С. Литвинов, С. А. Поддубный</i> ЛАБОРАТОРИИ ГИДРОЛОГИИ И ГИДРОХИМИИ 60 ЛЕТ .....	5
<i>А. В. Законнова, А. С. Литвинов</i> МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОКЛИМАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА .....	16
<i>А. С. Литвинов, А. В. Законнова</i> МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНОБАЛАНСОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЫБИНСКО- ГО ВОДОХРАНИЛИЩА .....	23
<i>В. В. Законнов</i> ИЛОНАКОПЛЕНИЕ В СИСТЕМЕ ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА .....	30
<i>М. В. Гапеева, В. В. Законнов</i> ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКОСИСТЕМЫ УГЛИЧСКОГО ВОДОХРАНИ- ЛИЩА .....	41
<i>Л. А. Кучай, Е. Н. Соколова</i> ВЫБОР ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ РЯДОМ НАБЛЮ- ДЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ КОМПОНЕНТОВ ЭКОСИСТЕМЫ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИ- ЛИЩА) .....	47
<i>И. Э. Степанова</i> ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЫБИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ .....	53
<i>Н. В. Васильева, Н. А. Афиногенова</i> СОДЕРЖАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ФОСФОРА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОБСЫХА- ЮЩИХ МЕЛКОВОДИЙ МАЛОЙ РЕКИ ИЛЬД – ПРИТОКА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИ- ЛИЩА .....	72
<i>Н. Г. Отюкова</i> ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА В РЕЧНЫХ АКВАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ (НА ПРИМЕРЕ Р. ИЛЬД БАССЕЙНА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА) .....	75
<i>Л. А. Кучай, Н. Г. Отюкова, Е. Н. Соколова</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СО- СТОЯНИЯ ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ ИЛЬД, РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И ОЗ. НЕРО) .....	82
<i>А. А. Прокин, А. И. Цветков</i> ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И МАКРОЗООБЕНТОС УЗЛОВ СЛИЯНИЯ РАВНИННЫХ РЕК .....	89
К 60 – ЛЕТИЮ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЛЮДМИЛЫ ГРИГОРЬЕВНЫ БУТОРИНОЙ .....	111
К 60 – ЛЕТИЮ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИННЫ ЛОГИНОВНЫ ПЫРИНОЙ .....	114

## CONTENTS

<i>A. S. Litvinov, S. A. Poddubny</i> LABORATORY HYDROLOGY AND HYDROCHEMISTRY 60 YEARS.....	5
<i>A. S. Litvinov, A. V. Zakonnova</i> LONG-TERM CHANGES IN THE HYDROCLIMATIC REGIME OF THE RYBINSK RESERVOIR.....	16
<i>A. S. Litvinov, A. V. Zakonnova</i> LONG-TERM CHANGES IN WATER BALANCE CHARACTERISTICS OF THE RYBINSK .....	23
<i>V. V. Zakonnov</i> SILT ACCUMULATION IN THE SYSTEM OF THE VOLGA CASCADE RESERVOIRS .....	30
<i>M. V. Gapeeva, V. V. Zakonnov</i> THE GEOCHEMICAL CHARACTERISTIC OF THE ECOSYSTEM OF THE UGLICHSKY RESERVOIR .....	41
<i>L. A. Kuchai, E. N. Sokolova</i> SELECTION OF A DYNAMIC MODEL OF THE SYSTEM REPRESENTED BY A SERIES OF OBSERVATIONS (BY THE EXAMPLE OF ECOSYSTEM COMPONENTS OF THE RYBINSK RESERVOIR) .....	47
<i>I. E. Stepanova</i> HISTORY OF THE STUDY OF BIOGENIC ELEMENTS IN THE RYBINSK RESERVOIR .....	53
<i>N. V. Vasileva, N. A. Afinogenova</i> THE CONTENTS OF VARIOUS FORMS OF PHOSPHORUS IN GROUND ADJOURNMENT OF DRYING SHOALINESSES OF THE SMALL RIVER ILD – INFLOW OF THE RYBINSK WATER BASIN .....	72
<i>N. G. Otyukova</i> DYNAMICS OF THE MAINTENANCE OF IRON IN THE RIVER COMPLEXES (ON THE EXAMPLE OF RIVER ILD OF POOL OF THE RYBINSK WATER BASIN) .....	75
<i>L. A. Kuchai, N. G. Otyukova, E. N. Sokolova</i> THE USE OF ECOLOGICAL NORMALIZATION METHOD FOR THE ASSESSMENT OF THE STATUS OF AQUATIC ECOSYSTEMS (BY THE EXAMPLE OF THE MOUTH REACH OF THE ILD RIVER AND THE RYBINSK RESERVOIR) .....	82
<i>A. A. Prokin, A. I. Tsvetkov</i> HYDROLOGICAL REGIME AND MACROZOOBENTHOS OF THE LOWLAND RIVERS CONFLUENCE AREAS .....	89
ON THE 60TH - ANNIVERSARY OF SCIENTIFIC ACTIVITIES LUDMILA GRIGORIEVNA BUTORINA .....	111
ON THE 60TH - ANNIVERSARY OF SCIENTIFIC ACTIVITIES INNA LOGINOVNY PYRINA.....	114

## ЛАБОРАТОРИИ ГИДРОЛОГИИ И ГИДРОХИМИИ 60 ЛЕТ

**А. С. Литвинов, С. А. Поддубный**

*Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН*

*152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: litvinov@ibiw.yaroslavl.ru*

Описывается история создания, преобразования, научный состав, руководители лаборатории гидрологии и гидрохимии. Рассмотрена научная деятельность лаборатории, направления исследований гидрологии внутренних водоемов России и сопредельных стран. Приводятся основные публикации сотрудников лаборатории за 60-ти летний период.

Лаборатория гидрологии и гидрохимии прошла путь в 60 лет. Этот путь сложился из 5-ти этапов. Каждый этап характеризовался своеобразием, сложностью решаемых задач, оригинальностью и значимостью получаемых результатов, специфичностью научного руководства, научным составом профессионалов гидрологов и гидрохимиков. При подготовке статьи использованы материалы, подготовленные А.С. Литвиновым, Э.С. Бикбулатовым и А.А. Былинкиной.

**Первый этап (1954–1962 гг.).** В сентябре 1956 г. Научно-исследовательская биологическая станция «Борок» им. Н.А. Морозова Постановлением Президиума АН СССР № 515 была реорганизована в Институт биологии водохранилищ АН СССР. Структура Института включала лаборатории: гидрологии и гидрохимии; микробиологии; фитопланктона, фитобентоса и прибрежной растительности; зоопланктона и зообентоса; ихтиологии; зоологии и паразитологии; физиологии водных животных.

Надо сказать, что самостоятельная группа гидрохимии, возглавляемая н.с. А.С. Киреевой уже существовала двумя годами ранее. В состав группы входили М.Д. Дегтяренко, А.Л. Ильинский, З.А. Митропольская, Е.Н. Волкова. Курировал работу группы Сергей Иванович Кузнецов. Гидрологом принят на работу А.Н. Кренке. В этот период становится ясно, что параллельно с биологическими исследованиями необходимо расширять и наблюдения за состоянием среды обитания гидробионтов. В октябре 1954 г. из Рыбинской гидрометеорологической обсерватории на работу в Борок приезжают Татьяна Николаевна и Вячеслав Петрович Курдины. Т.Н. Курдиной поручаются работы по изучению термического режима, В.П. Курдин исследует формирование грунтового комплекса, а А.Н. Кренке – течения Рыбинского водохранилища. В эти годы, основные гидрохимические и гидрологические исследования ведутся главным образом в прибрежной части водохранилища. 1954 и 1955 гг. можно считать началом систематических исследований гидрологического и гидрохимического режима Рыбинского водохранилища.

В 1955 г. на биологическую станцию приезжает Н.В. Буторин, окончивший аспирантуру Ленинградского высшего инженерного морского училища им. Адмирала С.О. Макарова. В гидрохимическую группу приходит Н.А. Трифонова. Весной 1956 г. по приглашению И.Д. Папанина на биостанцию на должность научного сотрудника приезжает М.А. Фортунатов, С.С. Бакастов, а на должность препараторов – Е.П. Смирнова и Н.М. Сизова. В этом же году на биостанцию приходит д.с.-х.н. В.И. Рутковский, который возглавляет гидрологическую группу.

Постепенно увеличивается объем работ сотрудников лаборатории. Наряду с Рыбинским водохранилищем начинает изучаться и вновь созданное Горьковское водохранилище. На этих водоемах исследуются уровенный и скоростной режимы, изменения характеристик прозрачности и мутности воды, термических условий, особенности формирования грунтового комплекса. Проводятся исследования, связанные повышением уровня грунтовых вод в связи с заполнением Рыбинского водохранилища и его сезонной изменчивости.

В 1957 г. объявляется конкурс на заведование лабораторией гидрологии и гидрохимии и первым, официальным заведующим лабораторией с 25 апреля становится В.И. Рутковский. В этот год после окончания Московского государственного университета (МГУ) им. М.В. Ломоносова в лабораторию приходит Н.А. Зиминова и лаборантом Л.А. Калинина.

По инициативе лаборатории с 1957 г. выполняются первые синхронные наблюдения на Рыбинском водохранилище с использованием нескольких судов для получения данных по суточной динамике гидрологических и гидробиологических характеристик в разных плесах водохранилища. Эти наблюдения в дальнейшем дополнились скоростными съемками водохранилища для оценки распределения вод различного происхождения. Объектами исследований становятся Ивановское и Угличское водохранилища. В 1958 г. в лабораторию на должность научных сотрудников приходят Ф.И. Безлер, А.В. Фотиев и после окончания МГУ старшими лаборантами М.Г. Ершова и К.К. Эдельштейн, препаратором – В.М. Михайлова (Смелова).

Сотрудники лаборатории активно участвуют во всех полевых исследованиях на водохранилищах Волжского каскада. Наряду с экспедициями ведется большая работа по анализу собранных материалов за первые годы существования водохранилищ. Появляются первые работы, обобщающие разнообразие особенности гидрологического режима водохранилищ Верхней Волги. Одной из таких классических обобщающих работ этого периода была работа М.А. Фортунатова “Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатели его режима”. В ней показана возможность применения окрашенности воды для изучения трансформации речных вод в водоеме замедленного водообмена. Выполненное М.А. Фортунатовым районирование Рыбинского водохранилища на основе его морфометрических особенностей, показателей цветности и прозрачности воды до настоящего времени является наиболее полным и используется многими исследователями. Эта работа положила начало и новому направлению, которое впоследствии стало ключевым в работе лаборатории гидрологии и гидрохимии – исследованию особенностей формирования и структуры водных масс водохранилищ.

В 1960 г. сотрудники лаборатории становятся инициаторами проведения синхронных наблюдений по определенной сетке станций, равномерно расположенных по акватории водохранилища. Для этих целей использовались четыре экспедиционных судна, с каждого из которых на заданном маршруте проводились наблюдения на 15–17 станциях. Выполнение такой съемки по водохранилищу с общим числом станций около 60 производилось за 12–14 часов, а полученные материалы можно было считать синхронными. По сокращенной сетке станций выполнялись и работы в зимнее время.

Следующий активный приток кадров в лабораторию наблюдался после 1960 г. – это старшие лаборанты: Литвинов А.С., Бакулин К.А., Бакулина А.Г., Кольцов Г.В., Рощупко В.Ф., Кудрявцева Н.А., научные сотрудники: Кондрацова О.Ф., д.б.н. Драчев С.М., к.б.н. Былинкина А.А., к.м.н. Синельников В.Е., препараты: Фотиева В.Н., Петухова Л.А., Внучкова В.И. Осенью 1962 г. заведующим лабораторией был избран к.г.н. Н.В. Буторин. На этом закончился первый этап формирования лаборатории.

**Второй этап (1962–1974 гг.).** С приходом в институт Сергея Михайловича Драчева – известного специалиста в области охраны и рационального использования водных ресурсов, доктора биологических наук, профессора – произошло первое разделение лаборатории на две – гидрологии и гидрохимии. В состав лаборатории гидрологии вошли научные сотрудники д.б.н. Фортунатов М.А., Курдин В.П., Бакастов С.С., Эдельштейн К.К., Ершова М.Г., Кондрацова О.Ф., старшие лаборанты Литвинов А.С., Бакулин К.А., Рощупко В.Ф., лаборанты Миловидова М.А., Сизова Н.М.

В лаборатории гидрохимии стали работать научные сотрудники к.б.н. Безлер Ф.И., к.б.н. Былинкина А.А., к.м.н. Синельников В.Е., Фотиев А.В., Трифонова Н.А., старшие лаборанты и лаборанты Кольцов Г.В., Бакулина А.Г., Митропольская З.А., Петухова Л.А., Кобякова (Кудрявцева) Н.А., Михайлова В.М., Калинина Л.А., Смирнова Е.П., Фотиева В.Н. В середине 1960-х – начале 1970-х гг. лаборатория пополнилась новыми кадрами: д.х.н., профессором Скопинцевым Б.А., Монаковой С.В., Мельниковой Н.И., Бикбулатовыми Эрнстом Саяфнуровичем и Екатериной Максимовной, Степановой И.К., Сараловыми Александром Ивановичем и Евгенией Евгеньевной, Ларионовым Ю.В., Ершовым Ю.В., Генкал Л.Ф.

С момента создания самостоятельной лаборатории гидрологии в течение короткого времени Н.В. Буториным был сформирован сильный коллектив молодых научных сотрудников. Основным направлением работ лаборатории стало установление закономерностей формирования гидрологического режима и водных масс водохранилищ волжского каскада. В рамках этой тематики проводились работы по следующим направлениям: исследование водных масс водохранилищ и их динамики – Н.В. Буторин, К.К. Эдельштейн, М.Г. Ершова; особенности формирования и структура течений – А.С. Литвинов, К.А. Бакулин; закономерности формирования донных отложений в водохранилищах – В.П. Курдин; водные взвеси в водохранилищах – Н.А. Зиминова; температура воды и грунтов – Т.Н. Курдина, О.Ф. Кондрацова. С.С. Бакастов; основы комплексного использования озер Ярославской области, а также составление кадастра водохранилищ мира – М.А. Фортунатов и В.Ф. Рощупко. С приходом в лабораторию в 1967 г. Н.П. Смирнова, Э.И. Сарухяна и В.Л. Кожары появились новые направления – исследование влияния космо-геофизических факторов на колебания стока Волги и исследование классификационной проблемы в географии.

Основными итогами работ за период с 1961 по 1970 гг. стала созданная и успешно развиваемая под руководством Н.В. Буторина теория водных масс водохранилищ. Созданная теория способствовала раскрытию связей между водными организмами и средой их обитания, выявлению зависимостей между структурно-функциональными характеристиками водных биоценозов и распределением абиотических параметров, а также оптимальных условий существования гидробионтов и путей управле-

ния их поведением и воспроизводством. В его капитальной монографии “Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада” (1969 г.) обобщены результаты исследований лаборатории, выявлены различия в гидрологических процессах, протекающих в водохранилищах речного и озерного типов, зависимость их от физико-географических условий и режима работы гидросооружений. Разработан новый метод выделения водных масс и дана детальная характеристика условий их формирования, трансформации и динамики. Показано, что каскад волжских водохранилищ не только регулирует сток Волги, но и играет существенную роль в изменении свойств речных вод, что доказывает возможность использования водохранилищ для регулирования качества воды. Развитое им и сотрудниками лаборатории учение о водных массах в водохранилищах в настоящее время представляет собой тот фундамент, на котором базируются не только все исследования Института биологии внутренних вод, но и всех научно-исследовательских организаций занимающихся изучением водохранилищ и качества воды.

Свое логическое завершение за этот период получили и работы по исследованию взвесей в Рыбинском водохранилище, изучению водных масс Горьковского водохранилища, течений в Рыбинском водохранилище. Н.А. Зиминовой была защищена кандидатская диссертация “Водные взвеси Рыбинского водохранилища”, К.К. Эдельштейном – “Формирование, перемещение и трансформация водных масс в Горьковском водохранилище”, А.С. Литвиновым – “Течения в Рыбинском водохранилище”. Подготовлена докторская диссертация Н.П. Смирновым.

В работе Н.А. Зиминовой было показано, что основными факторами, определяющими сезонные изменения содержания взвесей в водохранилище, являются сток взвешенных наносов рек, развитие фитопланктона, размыв дна водоема. Влияние стока взвешенных наносов рек на состав взвесей водохранилища определяется не только величиной стока, но и соотношением количества взвесей в речных водах и водах водохранилища. Наличие в бассейне водохранилища значительного количества болот обуславливают высокое процентное содержание органического вещества во взвесах.

К.К. Эдельштейном установлено существование генетически и качественно разнородных водных масс в Горьковском водохранилище. Показано, что основными исходными водными массами являются Волжская, формирующаяся в Рыбинском водохранилище и речные, поступающие из Унжи, Костромы, Которосли и Немды. Объем этих водных масс и размещение их в водоеме меняется по сезонам в связи с изменением гидрологического режима. Водные массы характеризуются малыми градиентами физических и химических показателей, в то время как во фронтальных зонах эти градиенты резко возрастают. Характер распределения водных масс и их динамика были положены в основу гидролого-географического районирования водохранилища.

Применение на водохранилищах при изучении течений методов и приборов, используемых в океанологии с приходом А.С. Литвинова, позволило получить новые материалы по динамике вод. В его диссертационной работе было показано, что основными факторами, генерирующими динамические процессы в водохранилищах и обуславливающими их пространственную изменчивость, служат: межгодовые и сезонные изменения в стоке рек, приток солнечной радиации, кинетическая энергия ветра, суточное и недельное регулирование стока через гидросооружения и морфометрические характеристики водоема. В нижних и верхних бьефах гидросооружений течения определяются режимом пусков воды через ГЭС и перемещение воды носит возвратно-поступательный характер, а основное скоростное поле стокового течения формируется по затопленным руслам рек. Установлено время формирования ветрового течения и величина ветрового коэффициента, зависящая от скорости ветра. Дана классификация течений в водохранилищах. В дальнейшем, А.С. Литвиновым впервые для расчета течений была адаптирована для водохранилищ гидродинамическая модель мелкого моря с использованием функции полных потоков. Это позволило выполнить расчеты общей циркуляции вод в Рыбинском водохранилище при различных гидрометеорологических условиях и заложить основы оценки ее роли в распределении полей гидрофизических характеристик и перемещении гидробионтов.

В 1971 г. публикуется монография Э.И. Саруханяна и Н.П. Смирнова “Многолетние колебания стока Волги”. В монографии показан многокомпонентный циклический характер вариационной структуры многолетних изменений речного стока и его региональные особенности. Установлены причины региональных особенностей, которые заключаются в различном характере атмосферных процессов, формирующих сток на Верхней и Нижней Волге. Сделан вывод о том, что исследование генезиса циклических вариаций стока требует глобального подхода к изучению проблемы многолетних колебаний климата, а вековая тенденция в стоке Волги связана с преобразованием форм атмосферной циркуляции в ходе векового цикла солнечной деятельности. Найдены зависимости, открывающие путь, по мнению авторов, к разработке методики генетического прогноза многолетних коле-



баний стока на основе причинно-следственных связей: внешние воздействия – колебания атмосферной циркуляции – циклические колебания стока.

В продолжение этих исследований в 1974 г. О.Ф. Кондрацовой защищена кандидатская диссертация “Квазидвухлетний цикл в колебаниях стока рек СССР”, выполненная под руководством Н.П. Смирнова. В работе установлено наличие квазициклических колебаний у большинства рек СССР с периодом от 24 до 33 месяцев. Вклад этих колебаний в общую изменчивость стока составляет от одной до одной четверти ее величины. Показано, что характерной особенностью стока рек в квазидвухлетнем цикле является его зональная асинхронность. Колебания стока рек СССР через атмосферную циркуляцию связаны с квазидвухлетним циклом стратосферных ветров над экватором. Причиной возникновения квазидвухлетней циклическости в экваториальной стратосфере могут служить квазидвухлетние циклические колебания в скорости вращения Земли. Учет этой компоненты при прогностических расчетах стока рек компонентно-генетическим методом может существенно улучшить прогнозы водности.

В 1969–1973 гг. активно проводятся полевые работы на Иваньковском водохранилище, связанные с влиянием сбросов теплых вод Конаковской ГРЭС на экосистему водохранилища.

С самого начала становления лаборатории гидрохимии под руководством и при непосредственном участии С.М. Драчева развернулись интенсивные исследования широкого круга вопросов, касающихся «жизни» водоемов. В 1964 г. вышла в свет получившая широкое признание монография Драчева С.М. “Борьба с загрязнением рек, озер, водохранилищ промышленными и бытовыми сточными водами”. Книга охватывает практически весь круг вопросов, связанных с формированием качества природных вод в различных климатических зонах, характеристику основных источников загрязнения и меры их устранения, подробный анализ процессов самоочищения от различных видов загрязнения. Разработанная совместно со своими сотрудниками и приведенная в этой книге классификация качества природных вод по совокупности химических, бактериологических и гидробиологических показателей до сих пор остается одной из наиболее употребительных в практике исследования водоемов.

Идеи, заложенные в этой книге, стали руководящими при выборе направлений работ сотрудников только что организованной гидрохимической лаборатории и прошли всестороннюю проверку на водохранилищах волжского каскада и реках его бассейна. Была установлена общая закономерность изменения основного солевого состава кальциево-карбонатных природных вод под воздействием бытовых и большинства промышленных сточных вод. Показано, что при сравнительно небольшом увеличении содержания солей происходят резкие практически необратимые изменения их состава в сторону возрастания одновалентных катионов и анионов сильных кислот. Так, в волжской воде ниже г. Твери содержание натрия и сульфатов в меженные периоды возросло за 50 лет на два порядка (Былинкина А.А., Трифонова Н.А., Кобякова Н.А.).

Большие исследования были посвящены вопросам, связанным с загрязнением и процессами самоочищения от нефтепродуктов (Синельников В.Е.). Разработанный метод определения битумоидов позволил установить, что распространение тяжелых фракций нефти происходит на сравнительно короткое расстояние от источника загрязнения. Освобождение водной массы от загрязнения идет за счет оседания тяжелых фракций на дно и берега. В водной толще и на ее поверхности происходит медленное окисление нефтепродуктов. Механизм этого процесса изучался с помощью хемилюминесцентных методов, основанных на современных представлениях о свободно-радикальных энзимных реакциях окисления и синтеза органического вещества. Результаты этих работ получили отражение в двух монографиях В.Е. Синельникова: “Люминесцентный анализ природных и загрязненных вод” (1968) и “Проблемы чистой воды” (1978). Разработан имеющий важное практическое значение методологический подход к оценке антропогенной и естественной составляющей углеводородов в природных водах (Ершов Ю.В.).

Вследствие высокой радиоактивности атмосферных осадков и вод поверхностного стока в 1960-е гг., под руководством С.М. Драчева изучалось содержание и распределение долгоживущих продуктов деления урана. Было показано, что в верховьях водохранилищ Верхней Волги в донных отложениях преобладал радиоактивный церий, а в приплотинных участках – радиоактивные стронций и цезий (Былинкина А.А.).

Для ориентировочной оценки сброса бытовых сточных вод С.М. Драчевым предложен расчетный метод, основанный на учете численности городского населения и условной нормы сброса на одного жителя. Балансовые расчеты для Рыбинского водохранилища позволили высказать предположение о значительной роли фиксации свободного азота планктонными организмами в вегетационный период, что впоследствии подтвердилось исследованиями биологов. В р. Москве, гипертрофирован-

ной под воздействием сточных вод г. Москвы, высокий уровень содержания биогенных элементов активизировал процессы фотосинтеза. В результате вторичное загрязнение органическим веществом достигло величины соизмеримой с количеством органики, поступающей в реку со стоками города.

По инициативе Сергея Михайловича в водных массах водохранилищ Верхней Волги изучался круговорот фосфора с использованием радиоактивных индикаторов. Радиометка позволила вычленировать процесс потребления фосфатов организмами планктона и определить скорость оборачиваемости  $PO_4$ . Показано, что интенсивность фосфатного обмена соответствует биологическому циклу развития экосистемы и зависит от трофности водоема (Былинкина А.А., Трифонова Н.А.).

Убежденность С.М. Драчева в необходимости изучения природных каталитических процессов превращения органического вещества в воде и донных отложениях впоследствии нашла отражение в исследованиях сотрудников лаборатории, непосредственно с ним работавших. Определялась фосфатазная активность в воде и сестоне, интенсивность расщепления различных фосфо-эфиров природными энзимами фосфатазной группы, кинетические параметры обмена, характеризующие степень насыщения организмов планктона фосфатами и др. (Трифорова Н.А., Былинкина А.А.).

Параллельно проводились работы по изучению состава природных гумусоподобных веществ. Была разработана оригинальная модификация метода выделения органических веществ из природных вод путем вымораживания (Фотиев А.В.), которая использовалась и используется при исследованиях их состава и структуры. Примененные А.В. Фотиевым методы гельфильтрации позволили установить размерное распределение органических веществ в водах различного генезиса. Были получены новые материалы, свидетельствующие в пользу гипотезы о том, что в природных водах не существует чисто органических соединений и они должны рассматриваться как органо-минеральные комплексы.

С приходом на работу в ИБВВ сначала в качестве консультанта, а затем постоянного сотрудника (с 1966 г.), крупного ученого в области химической океанологии и органической гидрохимии Б.А. Скопинцева была создана отдельная группа, нацеленная на всестороннее изучение органических веществ (ОВ). Под руководством Б.А. Скопинцева и непосредственном его участии были разработаны и внедрены в практику три группы методов определения основной составляющей ОВ – углерода. На базе методов определения органического углерода в сухих остатках и прямого сжигания ОВ впервые была проведена оценка летучей фракции, которая для вод различного генезиса варьировала от 5 до 70% (Скопинцев Б.А., Бакулина А.Г.). Более простые и производительные методы, такие как персульфатный (Бикбулатов Э.С., Скопинцев Б.А.) и фотохимический (Бикбулатова Е.М., Скопинцев Б.А.), получили широкое применение и позволили установить пространственные и временные закономерности распределения ОВ в водоемах различного трофического статуса. Разработанный оригинальный метод определения органического углерода во взвешенной фракции ОВ (Ларионов Ю.В., Скопинцев Б.А.) дал возможность оценить истинную долю этой важной составляющей в процессах трансформации ОВ.

**Третий этап (1974–1988 гг.).** В разделенном виде лаборатории просуществовали до 1974 г., когда после смерти С.М. Драчева они снова были объединены в единую лабораторию под руководством Н.В. Буторина.

В 1974–1975 гг. институт и коллектив лаборатории включаются в работу по заданию ГКНТ при СМ СССР, связанную с перераспределением стока и, в частности, с переброской части стока северных рек в бассейн Волги. В рамках этой тематики в 1976–1978 гг. проводится ряд комплексных экспедиций по предполагаемой трассе переброски. По материалам, собранным в этих экспедициях, под редакцией А.С. Литвинова издается сборник работ «Экологические исследования водоемов Волго-Балтийской и Северо-Двинской водных систем».

Эти исследования позволили высказать ряд соображений об изменении экологических условий в Волжских водохранилищах при осуществлении первой очереди переброски. Было показано, что осуществление первого этапа переброски северных рек в бассейн Волги окажет не одинаковое влияние на изменения абиотических и биотических условий в различных участках каскада водохранилищ. Наиболее существенные изменения произойдут в Шекснинском и Рыбинском водохранилищах, где объем годового притока меньше или соизмерим с объемом переброски. В виду того, что по общей минерализации, содержанию органического вещества и основных биогенных элементов перебрасываемые воды более бедны, чем водохранилища Волжского каскада не следует ожидать существенных отклонений в составе и продуктивности фитопланктона в водохранилищах Верхней Волги. В то же время, возрастание интенсивности водообмена в верхних водохранилищах каскада и увеличение скоростей течения в речных плесах за счет транзита перебрасываемых вод могут привести к увеличению

мутности воды, уменьшению ее прозрачности и, как следствие, к вторичному загрязнению вод и ухудшению условий обитания крупных пелагических озерных ракообразных.

В 1975 г. выходит коллективная монография “Донные отложения Верхневолжских водохранилищ” (авторы Н.В. Буторин, Н.А. Зиминова и В.П. Курдин). В монографии обобщены материалы по процессам осадкообразования и формированию донных отложений в водохранилищах и показано, что в процессе формирования донных отложений искусственных водоемов, находящихся на ранних стадиях развития, важную роль играет абразионная деятельность водной массы. Второй по величине и наиболее стабильный источник грунтообразующего материала – сток взвешенных наносов рек. Роль биологических факторов в формировании донных отложений водохранилищ сравнительно невелика. Дана классификация донных отложений водохранилищ. Завершается первое обобщение материалов по термике Рыбинского водохранилища. Публикуется монография “Температура воды и грунтов Рыбинского водохранилища” (Буторин Н.В., Курдина Т.Н., Бакастов С.С.). В работе рассмотрены процессы формирования температурных условий в воде и донных отложениях водоемов, сезонных и многолетних изменений температурного режима, его особенности в отдельные годы и на отдельных участках акваторий, процессы теплообмена между донными отложениями и водной массой.

Лаборатория продолжает пополняться молодыми кадрами: приходят Владимир Леонтьевич и Викторина Николаевна Складенко, а затем Виктор Васильевич и Арина Васильевна Законновы, И.Ф. Фомичев, к.х.н. М.В. Гапеева, О.Л. Цельмович, С.М. Разгулин, С.А. Поддубный, Л.А. Кучай, Е.Н. Соколова.

С приходом новых сотрудников продолжают активизироваться работы по изучению формирования грунтового комплекса, гидродинамических процессов, термики водохранилищ Волжского каскада. В.В. Законовым проводится мониторинг донных отложений волжских водохранилищ, начатый В.П. Курдиным, а также исследование аккумуляции биогенных элементов в донных отложениях. С.А. Поддубным развиваются работы по моделированию гидродинамических процессов и их роли в формировании полей гидрофизических и гидробиологических характеристик. Расширяются работы по исследованию термического режима (А.А. Законнова, В.В. Рощупко). Активно развиваются работы по классификации природных объектов. По инициативе В.Л. Кожары лаборатория принимает активное участие в организации междисциплинарного взаимодействия специалистов в рамках “классификационного движения” и в 1979 г. на базе лаборатории в институте проходит всесоюзная школа-семинар по теории классификации, получившая широкий отклик у большого числа специалистов.

В 1986–1988 гг. коллектив лаборатории активно включается в выполнение Международной программы “Интеркосмос” по дистанционному зондированию Земли, частью которой является Международный целевой комплексный проект (МЦКП) “Изучение состояния и динамики экосистем внутренних водоемов с применением аэрокосмических методов», выполняемый на Рыбинском водохранилище.

Итогом многолетних комплексных работ на оз. Плещеево служит коллективная монография “Экосистема озера Плещеево” под редакцией Н.В. Буторина и В.Л. Складенко. Усиливаются работы, связанные с математическим моделированием гидрологических и гидробиологических процессов во внутренних водоемах (Л.А. Кучай).

Интенсифицируются работы гидрохимической группы. При изучении основных биогенных элементов (азота, фосфора, кремния) сотрудники руководствуются принципом системности. Анализируются пространственное и временное распределение биогенов в воде и донных отложениях, многообразие форм, внешние и внутренние источники поступления, трансформация биогенных веществ в связи с продукционно-деструкционными процессами, составлен баланс биогенных элементов в Рыбинском водохранилище. Непременным условием исследований был учет особенностей морфометрии и гидрологического режима. Главная цель исследований – прогнозирование качества воды (Трифонов Н.А., Былинкина А.А., Степанова И.К., Гапеева М.В., Разгулин С.М.).

Б.А. Скопинцевым и его коллегами большое внимание уделяется исследованиям трансформации природных органических веществ (ОВ). Устанавливаются основные закономерности биохимического разложения ОВ фитопланктонных организмов в аэробных и анаэробных условиях. В процессе выполнения соответствующих работ было разработано и существенно модифицировано множество методов анализа различных компонентов – органических кислот, углеводов, белков, липидов, фосфатов и общего фосфора в воде и взвесах, нитритов, нитратов (Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М.). Вообще методическим вопросам в лаборатории гидрохимии уделялось самое пристальное внимание. Как С.М. Драчеву, так и Б.А. Скопинцеву было свойственно глубокое понимание важности методических разработок и применение новых методов. Они справедливо полагали, что основой любого исследования является правильный выбор метода и грамотное его применение. Оба были пио-

нерами в области создания современных методов химического анализа природных вод и авторами первых отечественных руководств по этому предмету. Истоки их публикаций по аналитической гидрохимии относятся к 20-м гг. прошлого столетия, а изданные первые руководства датируются концом 1930-х. Большая работа по усовершенствованию методов определения содержания растворенных и взвешенных форм железа в водоемах была проведена к.х.н. И.К. Степановой.

Скопинцевым Б.А. и его ближайшими помощниками рассматривались теоретические вопросы синтеза, трансформации, деструкции и анализа природных органических веществ. В результате исследований в этих направлениях разрозненные, зачастую противоречивые, во многих случаях дублирующие друг друга обобщенные показатели свойств органического вещества природных систем (вод, почв, гидробионтов) объединены строгой системой функциональных связей, что позволяет говорить о создании фундаментальной теоретической базы для исследований состава и свойств органических веществ любой степени сложности (Бикбулатов Э.С.). Предложенная им система стехиометрических уравнений представляет большую практическую ценность при изучении продукционно-деструкционных процессов. Опираясь на них и классическую термодинамику введены в научный оборот новые показатели свойств органического вещества природных вод и почв, в том числе три вида калорийности – физиологическая, физическая и полная, а также карбокалорийные коэффициенты, которые позволяют адекватно описать и оценить реальную питательную (энергетическую) ценность ОВ, создаваемых в различных фотосинтетических процессах. Проведена количественная оценка их значений для главных составляющих ОВ природных вод (растворенного ОВ, фито- и зоопланктона), которые могут быть признаны своеобразными геохимическими константами.

Выполняются работы по определению содержания тяжелых металлов в воде и донных отложениях водохранилищ (Гапеева М.В., Цельмович О.Л.).

В этот период молодые ученые лаборатории активно работают над диссертационными обобщениями. В 1980 г. И.Ф. Фомичевым защищается кандидатская диссертация “Многолетние изменения элементов гидрологического режима Рыбинского водохранилища и расчет их в связи с территориальным перераспределением стока”. Затем защищает диссертацию В.Л. Сляренко, в конце 1983 г. В.В. Законнов на тему “Аккумуляция биогенных элементов в донных отложениях Верхневолжских водохранилищ” и в конце 1987 г. – С.А. Поддубный – “Циркуляция вод в Рыбинском водохранилище и ее роль в формировании полей гидрофизических характеристик”.

**Четвертый этап (1988–1997 гг.).** Существенные перемены в жизни лаборатории начались в конце 1980-х гг. В 1988 г. скончался Н.В. Буторин и и.о. заведующего лабораторией был назначен к.г.н. А.С. Литвинов. Осенью этого же года состоялись первые в истории Института выборы директора. Из трех кандидатур (А.Г. Поддубный, В.И. Лукьяненко, Н.П. Смирнов) коллективом ИБВВ был избран Н.П. Смирнов до того момента – ректор Ленинградского гидрометеорологического института. Спустя некоторое время произошла реорганизация структуры Института. Был сформирован ряд отделов, одним из которых стал Отдел абиотических факторов среды и куда вошли три лаборатории: гидрологии, гидрохимии и климата. В 1989 г. заведующим лабораторией гидрологии становится д.г.н. Н.П. Смирнов, исполняющим обязанности заведующего гидрохимической лабораторией назначается к.х.н. Бикбулатов Э.С. В 1991 г. на эту должность был избран бывший сотрудник Ленинградского гидрометеорологического института к.х.н. Н.Н. Осипов. Сотрудниками лаборатории климата стали приглашенные Н.П. Смирновым сотрудники Ю.Э. Титов и П.А. Вайновский, а также окончившие этот институт молодые специалисты. С возникновением отдела его стал возглавлять Н.П. Смирнов, а лабораторией гидрологии руководить Ю.Э. Титов.

Несмотря на такую чехарду в смене руководства и ряд как объективных, так и субъективных негативных обстоятельств сотрудники лабораторий гидрологии и гидрохимии продолжали эффективно заниматься научной работой. В 1990-е гг. лаборатории пополнились новыми кадрами – к.б.н. Козловской В.И., Германом А.В., Васильевой М.И., Степановой И.Э., Отюковой Н.Г. Непродолжительное время (от 2 до 5–6 лет) в лаборатории работали и другие молодые сотрудники. В этот период развала СССР, нестабильной экономической ситуации в стране, малых зарплат, молодые специалисты долго не задерживались в Институте, искали наиболее оплачиваемую работу. Ряд сотрудников, отработавших в лаборатории более 10 лет, также перешли на работу в другие организации.

Помимо традиционных исследований многолетней, сезонной и суточной изменчивости полей гидрометеорологических и гидрохимических характеристик, проводилось изучение динамических процессов в мелководной зоне водохранилищ. С конца 1980-х и в начале 1990-х гг. лаборатории активно участвовали в комплексных работах по оценке воздействия на экосистему водохранилищ добычи нерудных строительных материалов и разработке мероприятий по компенсации ущерба, наносимого местообитаниям гидробионтов в результате проведения строительных работ. Продолжают

изучаться совместно с биологами экосистемы озер Неро и Плещеево. Проводится моделирование динамических процессов в водохранилищах.

В 1990 г. завершает многолетнее исследование и защищает диссертацию “Анализ информативно насыщенных таксономических структур как способ выявления географических закономерностей” В.Л. Кожара.

В 1993 г. Заканчивается срок полномочий Н.П. Смирнова как директора Института. До новых выборов Отделение общей биологии РАН назначает и.о. директора к.б.н. А.И. Копылова. Ликвидируется лаборатория климата. Молодые сотрудники, пришедшие в Институт вместе с Н.П. Смирновым, покидают Борок. С января 1994 г. А.С. Литвинов приглашается на должность зам. директора по хозяйственной части и по совмещению руководит лабораторией гидрологии. В 1995 г. на другую работу уходит из Института Н.Н. Осипов и лабораторию гидрохимии возглавляет д.б.н. Ю.М. Лебедев.

**Пятый этап (1997 г. по настоящее время).** В 1997 г. произошло третье объединение лаборатории гидрологии и гидрохимии. В 1998 г. после смены руководства Института А.С. Литвинов полностью занимает должность заведующего лабораторией гидрологии и гидрохимии. Часть сотрудников из бывшей лаборатории климата и расформированного Вычислительного центра Института возвращается в лабораторию.

В 1999 г. А.С. Литвиновым защищается докторская диссертация “Энерго- и массообмен в водохранилищах Волжского каскада”, а в 2000 г. под таким же названием публикуется монография, в которой обобщены многолетние исследования по изменчивости водных балансов водохранилищ каскада, их водообмена, течений, термических условий, особенностей формирования и структуры полей гидрофизических характеристик и их связи с распределением гидробионтов. В этом же году защищает докторскую диссертацию С.А. Поддубный по теме “Гидрологические условия формирования и повышения биологической продуктивности экосистем волжских водохранилищ”. В работе обобщены результаты исследований роли гидродинамических процессов в распределении планктонных сообществ и рыб в водохранилищах, выполнено районирование мелководной зоны верхневолжских водохранилищ по морфометрическим и гидродинамическим признакам и представлены мероприятия, направленные на сохранение и повышение биологической продуктивности отдельных частей водохранилищ. В 2001 г. защищает кандидатскую диссертацию “Полихлорированные бифенилы в экосистеме Рыбинского водохранилища” А.В. Герман.

В 2007 г. заканчивает работу над докторской диссертацией В.В. Законнов на тему “Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада”. В работе детально рассмотрены гидроэкологические аспекты осадкообразования, его роль в самоочищении и биопродуктивности водохранилищ. Выявлены географические закономерности осадконакопления в водохранилищах Волги. Большое внимание уделено внутривидовой и комплексной связи донных осадков с лимнологическими показателями, а именно – количественному выражению круговорота вещества и энергии в пресноводных экосистемах на основе балансов взвешенных наносов и биогенных элементов. Обсуждены особенности седиментации и их использование в восстановлении биоценозов техногенных водоемов.

Начиная с 2006 г. проводятся исследования гидрологического режима устьевых областей малых рек. Попутно продолжают работы по изучению роли зоогенного фактора в формировании гидрологического режима малых рек. В последнее время концентрируется внимание на закономерностях изменения функционирования первичного звена экосистем крупных водоемов под влиянием гидрометеорологического режима в условиях потепления климата.

Гидрохимической группой проведены широкие исследования кинетики процессов трансформации природных органических веществ, которые привели к установлению ряда новых закономерностей, в частности к установлению новой геохимической константы – удельной скорости биохимического разложения природного гумуса (Бикбулатова Е.М., Бикбулатов Э.С.). В процессе теоретических изысканий вскрыты функциональные связи между основными показателями удержания в водоемах основного эвтрофирующего элемента – фосфора, которые позволили устранить существовавшие теоретические и практические разногласия в оценке степени воздействия соответствующей биогенной нагрузки на водоемы (Бикбулатов Э.С., Степанова И.Э.). Впервые в лимнологической практике обнаружены водоемы, в которых лимитирование первичной продукции происходит одновременно по трем компонентам – азоту, фосфору и кремнию (Бикбулатов, Бикбулатова).

Изучено содержание токсического гидроксиламина (ГА) в водных экосистемах. Установлено, что содержание ГА, важнейшего маркера интенсивности глобальных биохимических процессов трансформации азотсодержащих соединений (нитрификации, денитрификации, азотфиксации), в океанах, морях и водохранилищах существенно ниже, чем в стратифицированных озерах, вследствие меньшей развитости указанных процессов. Пространственное и временное распределения ГА в водо-

хранилищах довольно равномерны, за исключением районов, подверженных интенсивному антропогенному загрязнению. Опубликована первая в мировой практике монография “Гидроксиламин и гидразин в водных экосистемах” (Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Степанова И.Э.).

Обобщены результаты многолетних исследований солевого состава Рыбинского водохранилища в течение безледного периода. Установлено, что общая минерализация воды водохранилища по сравнению с 70-ми гг. 20-го века несколько увеличилась. Показано, что пределы естественных колебаний и средние значения важнейших гидрохимических переменных (форм азота, соединений фосфора, показателей органического вещества), установленных на основании результатов многолетних наблюдений, в совокупности будут определять границы стабильного существования экосистемы. Эти показатели по отдельности могут выступать в роли дифференциальных, а в совокупности – интегральных норм в вопросах экологического нормирования (О.Л. Цельмович, Н.Г. Отюкова).

В 1999 г. на базе лаборатории был создан Аналитический центр Института, аккредитованный по 71 компоненту (руководитель центра с.н.с. О.Л. Цельмович, научный руководитель – д.г.н. А.С. Литвинов). В 2002 и 2005 гг. сотрудниками центра успешно подтверждена и существенно расширена область аккредитации. К большому сожалению, Аналитический центр прекратил свою деятельность в 2015 г. из-за отсутствия финансовых средств на лицензирование и аккредитацию.

По инициативе Н.В. Буторина и С.М. Драчева, а в последствии и сотрудников лаборатории, были организованы и проведены Всесоюзные совещания по итогам исследования водохранилищ – “Волга I” (Тольятти, 1967 г.), “Волга II” (Пермь, 1975 г.), исследованию биогенных элементов и органического вещества во внутренних водоемах – Борок (1969 г.), Таллин (1978), Петрозаводск (1983), “Актуальные проблемы рационального использования биологических ресурсов водохранилищ” (2002 г.), “Бассейн Волги в XXI-м веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ” (2012 г.) целый ряд заседаний Секции водохранилищ ГКНТ СМ СССР, рабочей группы КПП “Планетарная геофизика” АН СССР, и ряд других, которые составили важную веху в истории исследования водохранилищ и становления гидроэкологии.

В период с 1991 по 2016 г. основные работы лаборатории проводились по следующим направлениям:

- энерго- и массообмен в водохранилищах Волжского каскада;
- исследование роли абиотических факторов в функционировании экосистем внутренних водоемов;
- влияние климатических и антропогенных факторов на изменчивость гидрологических и гидрохимических характеристик внутренних водоемов, моделирование функционирования их экосистем;
- закономерности изменчивости гидролого-гидрохимических процессов в экосистемах внутренних водоемов в связи с природными и антропогенными факторами;
- воздействие климатических и антропогенных факторов на экологическое состояние водоемов Верхней Волги;
- закономерности многолетних изменений гидрологических и гидрохимических условий в водоемах бассейна Верхней Волги;
- ряд разделов ФЦП “Возрождение Волги”;
- ряд программ ООБ РАН, ФЦП “Интеграция», гранты РФФИ.

Основное направление в этих исследованиях – решение фундаментальной проблемы гидроэкологии, связанной с изучением роли водного фактора в условиях меняющегося климата и хозяйственной деятельности в эволюции водных экосистем. Разработка теоретических основ и технологии рационального природопользования на внутренних водоемах, улучшение их экологического состояния и повышение биопродукционного потенциала.

С 2010 г. лабораторию гидрологии и гидрохимии возглавляет д.г.н. С.А.Поддубный. Научно-исследовательские традиции и направления работ лаборатории сохраняются.

За период существования лаборатории ее сотрудниками опубликовано более 1500 публикаций из них 15 монографий, защищено 4 докторских и 15 кандидатских диссертаций.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ЛАБОРАТОРИИ:

Труды Института биологии водохранилищ. Вып.2 (5). М.-Л.: Изд. АН СССР, 1959.

Буторин Н.В. Вековые изменения среднего уровня Атлантического океана и их связь с циркуляцией атмосферы. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1960.

Труды Института биологии водохранилищ. Вып.5 (8). М.-Л.: Изд. АН СССР, 1963.

Динамика водных масс водохранилищ. Тр. Инст. Биол. Внутр. Вод АН СССР. Вып. 7 (10). М.-Л.: Наука, 1965.

- Продуцирование и круговорот органического вещества во внутренних водоемах. Тр. Инст. Биол. Внутр. Вод АН СССР. Вып. 13 (16). М.-Л.: Наука, 1966.
- Биологические и гидрологические факторы местных перемещений рыб в водохранилищах. Тр. Инст. Биол. Внутр. Вод АН СССР. Вып. 16 (19). М.-Л.: Наука, 1968.
- Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения. Тр. Инст. Биол. Внутр. Вод АН СССР. Вып. 18 (21). М.-Л.: Наука, 1968.
- Синельников В.Е. Люминесцентный анализ природных и загрязненных вод. Обниск, 1968. 88 с.
- Драчев С.М. Изменение химического состава и свойств воды р. Москвы в связи с загрязнением и процессами самоочищения. 1968
- Буторин Н.В. Гидрологические процессы в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 319 с.
- Озера Ярославской области. Ярославль, 1970. 386 с.
- Абиотические факторы биологического круговорота в водоемах. Тр. Инст. Биол. Внутр. Вод АН СССР. Вып. 20 (23). Л.: Наука, 1971.
- Саруханян Э.И., Смирнов Н.П. Многолетние колебания стока Волги. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 164 с.
- Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. Биол. Внутр. Вод АН СССР. Вып. 23 (26). Л.: Наука, 1972.
- Факторы формирования водных масс и районирования внутренних водоемов. Тр. Инст. Биол. Внутр. Вод АН СССР. Вып. 26 (29). Л.: Наука, 1974.
- Биогенные элементы и органическое вещество в водохранилищах. Тр. Инст. Биол. Внутр. Вод АН СССР. Вып. 29 (32). Рыбинск, 1974.
- Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ. Водохранилища Верхней Волги. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 290 с.
- Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. Донные отложения Верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 156 с.
- Скопинцев Б.А. Формирование современного химического состава вод Черного моря. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 334 с.
- Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Борок, 1977
- Синельников В.Е. Проблемы чистой воды. М.: Знание, 1978. 61 с.
- Экологические исследования водоемов Волго-Балтийской и Северо-Двинской водных систем. Л.: Наука, 1982.
- Гидрохимические исследования Волжских водохранилищ. Рыбинск, 1982.
- Буторин Н.В., Курдина Т.Н., Бакастов С.С. Температура воды и грунтов Рыбинского водохранилища. Л.: Наука, 1982. 221 с.
- Экосистема озера Плещеево. Л.: Наука, 1989. 260 с.
- Формирование и динамика полей гидрологических и гидрохимических характеристик во внутренних водоемах и их моделирование. С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1993.
- Органическое вещество донных отложений Волжских водохранилищ. С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1993.
- Герасимов Ю.В., Поддубный С.А. Роль гидрологического режима в формировании скоплений рыб на мелководьях равнинных водохранилищ. Ярославль, 1999. 170 с.
- Литвинов А.С. Энерго- и массообмен в водохранилищах Волжского каскада. Ярославль, 2000. 83 с.
- Поддубный С.А., Сухова Э.В. Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах. Рыбинск, 2002. 115 с.
- Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Литвинов А.С., Поддубный С.А. Гидрология и гидрохимия озера Неро. Рыбинск, 2003. 189 с.
- Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Степанова И.Э. Гидроксиламин и гидразин в водных экосистемах. Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2007. 157 с.
- Бикбулатов Э.С. Биозлементы и их трансформация в водных экосистемах. Рыбинск: ОАО Рыбинский дом печати, 2009. 289 с.
- Законнова А.В., Литвинов А.С. Солевой состав вод Рыбинского водохранилища и его многолетние изменения // Гидробиологический журнал. 2009. № 2. С. 96–100.
- Литвинов А.С., Законнова А.В., Соколова Е.Н. Гидрологическая структура Шекснинского плеса Рыбинского водохранилища и оценка качества воды по биологическим показателям // Метеорология и гидрология. 2010. № 1. С. 88–95.
- Отюкова Н.Г. Некоторые аспекты гидрохимического режима малой реки в условиях зоогенного нарушения // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 5. С. 633–638.
- Литвинов А.С. Рошупко В.Ф. Многолетние изменения элементов гидрометеорологического режима Рыбинского водохранилища // Метеорология и Гидрология. 2010. № 7. С. 65–75.
- Герман А.В., Законнов В.В., Мамонтов А.А. Хлорорганические соединения в донных отложениях, бентосе и рыбе Волжского плеса Рыбинского водохранилища // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 1. С. 84–88.
- Крылов А.В., Цветков А.И., Малин М.И., Романенко А.В., Поддубный С.А., Отюкова Н.Г. Сообщества гидробионтов и физико-химические параметры устьевой области притока равнинного водохранилища // Биология внутр. вод. 2010. № 1. С. 65–75.
- Sigareva L.E., Gierszewski P., Zakonnov V.V. Fosylne pigmenty roślinne biomarkerami stanu środowiska ekosystemów wodnych // Landform Analysis. 2010. № 12. P. 112–117.

- Герман А.В., Законнов В.В., Шелепчиков А.А., Фешин Д.Б., Бродский Е.С. Процессы седиментации и аккумуляция полихлорированных бифенилов в русле р. Шексна в пределах г. Череповец // Вода: химия и экология. 2012. № 4. С. 16–20.
- Литвинов А.С., Законнова А.В. Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении // Метеорология и гидрология. 2012. № 9. С. 91–96.
- Поддубный С.А. Современное состояние и экологическое значение уровня воды в верхневолжских водохранилищах // Вода: химия и экология. 2012. № 12. С. 9–15.
- Поддубный С.А. Многолетние изменения площадей и объемов мелководной зоны верхневолжских водохранилищ в зависимости от колебаний уровня воды // Вода: химия и экология. 2013. № 8. С. 3–7.
- Степанова И.Э. Кинетические закономерности нитрификации в водах Рыбинского водохранилища // Экологическая химия. 2014. 23(2). С. 175–179.
- Литвинов А.С., Пырина И.Л., Законнова А.В., Кучай Л.А., Соколова Е.Н. Термический режим и продуктивность фитопланктона Рыбинского водохранилища в условиях изменения климата // Вода: химия, экология. 2014. № 12. С. 107–114.
- Степанова И.Э. Характеристики органического вещества в Рыбинском водохранилище на современном этапе // Вода: химия и экология. 2015. № 10. С. 3–11.
- Степанова И.Э., Литвинов А.С. Зависимость содержания органического вещества и биогенных элементов от гидрологических условий в Рыбинском водохранилище // Водное хозяйство России. 2015. № 3. С. 20–31.
- Поддубный С.А. К вопросу о типизации устьевых областей малых рек–притоков верхневолжских водохранилищ // Вода: химия и экология. 2015. № 3. С. 17–22.
- Поддубный С.А. Геометрическая модель устьевой области малой реки-притока водохранилища // Вода: химия и экология. 2015. № 12. С. 3–9.



## МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОКЛИМАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

А. В. Законнова, А. С. Литвинов

*Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН*

*152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: zak@ibiw.yaroslavl.ru*

Приводятся результаты анализа многолетних изменений температуры воздуха и воды, осадков и притока Рыбинского водохранилища за периоды 1947–1975 и 1976–2014 гг. Выявлены и оценены линейные тренды. Показано, что повышение температуры воздуха за период потепления способствовало росту температуры воды водохранилища во все месяцы при максимальной скорости повышения в мае, июле – 1.0°C /10 лет. Средняя за вегетационный период температура поверхностного слоя воды увеличилась на 0.4°C, в июле – 0.9°C и октябре – 0.7°C. За период потепления отмечен рост зимнего притока и осадков, выпавших на зеркало водохранилища. Установлены связи гидрометеорологических характеристик с интенсивностью циркуляции атмосферы над Северной Атлантикой, показателем которой является Северо-Атлантическое колебание (индекс САК).

**Ключевые слова:** Рыбинское водохранилище, температура воздуха, температура воды, приток, осадки, тенденции многолетних изменений.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее годы в гидроэкологических исследованиях большое внимание уделяется анализу многолетней изменчивости гидроклиматических характеристик водных экосистем в связи с потеплением климата. Температуры воздуха – главный климатический фактор, определяющий гидрологический режим, температуру воды водоема и его экологическое состояние. Начиная с середины 1970-х гг., температура воздуха на Европейской территории России повышалась со средней скоростью 0.43/10 лет, что более чем в 2.5 раза превышает скорость глобального потепления (Оценочный доклад, 2014). Начало XXI века характеризуется продолжающимся интенсивным потеплением. По данным Всемирной метеорологической организации (ВМО) за всю историю метеонаблюдений период 2001–2010 гг. был самым теплым, среднегодовые значения температуры воздуха на 0.21°C выше, чем в теплый период 1991–2000 гг. (Глобальный климат..., 2012). В бассейне Рыбинского водохранилища последнее десятилетие характеризуется повышением температуры воздуха на 2–3°C в январе, 1–2°C в июле и увеличением периода с положительными температурами воздуха (Экологический атлас, 2015).

Цель работы – анализ изменчивости характеристик гидроклиматического режима Рыбинского водохранилища за период 1947–2014 гг.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы многолетние данные о средних (месячной и годовой) температуре воздуха на метеостанциях (МС) Пошехонье-Володарск и Рыбинск ГМО за 1947–2015 гг., температуре поверхностного слоя воды прибрежной части и акватории Рыбинского водохранилища за безледный период. В качестве основного элемента водного баланса водоема рассмотрены объем притока и количество атмосферных осадков за 1947–2014 гг. Месячные суммы осадков определены по данным осадкомерных наблюдений станций и постов, расположенных на побережье и в ближайших окрестностях водохранилища. Исследованные характеристики анализировали по двум периодам: 1947–1975 гг. и 1976–2014 гг., сравнивая их со средними значениями за период 1961–1990 гг., принятый в настоящее время Всемирной метеорологической организацией (ВМО) за норму.

Многолетние изменения характеристик экосистемы водохранилища анализировали по линейным трендам. Статистическая значимость линейного тренда оценивалась по величине коэффициента детерминации ( $R^2$ ), показывающего вклад линейного тренда в общую изменчивость температуры воды. При объеме выборки 50 лет и более это соответствует величине  $R^2 > 0.08$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Температура воздуха.** По многолетним данным среднегодовая температура воздуха на береговых постах Рыбинского водохранилища составляет 3.1–3.8°C. Диапазон ее колебания от 0.0 на восточном побережье (1941 г.) до 6.1°C – южном (1989 г.) (Litvinov, Roshchupko, 2010). Среднегодовая температура воздуха на южном и западном побережье водохранилища на 0.3–0.8°C выше, чем на северном и восточном. Следует отметить, что период потепления характеризуется повышением средне-

годовой температуры воздуха с 3.7 до 4.4°C – МС Рыбинск ГМО и 3.0–3.7°C – МС Пошехонье-Володарск (табл. 1).

**Таблица 1.** Средняя (месячная, годовая) температура воздуха за отдельные периоды

Период, гг.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
МС Рыбинск ГМО													
1961–1990	-11.4	-9.5	-3.9	3.7	11.4	15.7	17.9	15.9	10.3	4.2	-2.2	-7.5	3.7
1947–1975	-11.0	-10.6	-5.3	3.5	10.8	16.1	17.7	16.2	10.6	4.3	-2.5	-6.9	3.6
1976–2015	-9.2	-8.8	-3.1	4.3	11.7	16.2	18.6	16.2	10.6	4.4	-1.9	-6.6	4.4
МС Пошехонье-Володарск													
1961–1990	-12.3	-10.7	-4.7	2.8	10.8	15.2	17.3	15.4	9.6	3.6	-2.7	-8.2	3.0
1947–1975	-11.8	-11.4	-6.1	2.9	10.4	15.5	17.1	15.7	9.9	3.7	-3.0	-7.5	2.9
1976–2015	-9.7	-9.3	-3.9	3.2	11.1	15.5	17.9	15.4	10.0	3.8	-2.6	-7.5	3.7

Самый холодный месяц – январь, но в отдельные годы (25–30% случаев) температура февраля ниже температуры января. Самый теплый – июль. Наибольшей изменчивостью характеризуется температурный режим зимних месяцев (табл. 2). В период потепления средняя месячная температура января изменялась от -3.7 (1989 г.) до -21.2°C (1987 г.) В июле размах колебаний ее значений – 15.7–24.0°C. Амплитуда температуры января составляла 24.9°C ( $\sigma = 4.6^\circ\text{C}$ ), а июля более чем в 2 раза меньше – 8.3°C ( $\sigma = 1.9^\circ\text{C}$ ). За период потепления отмечено наиболее существенное повышение температуры воздуха в зимние месяцы – на 2.1–2.2°C, и мае–июле – 0.9°C.

**Таблица 2.** Статистические характеристики температуры воздуха, МС Рыбинск ГМО

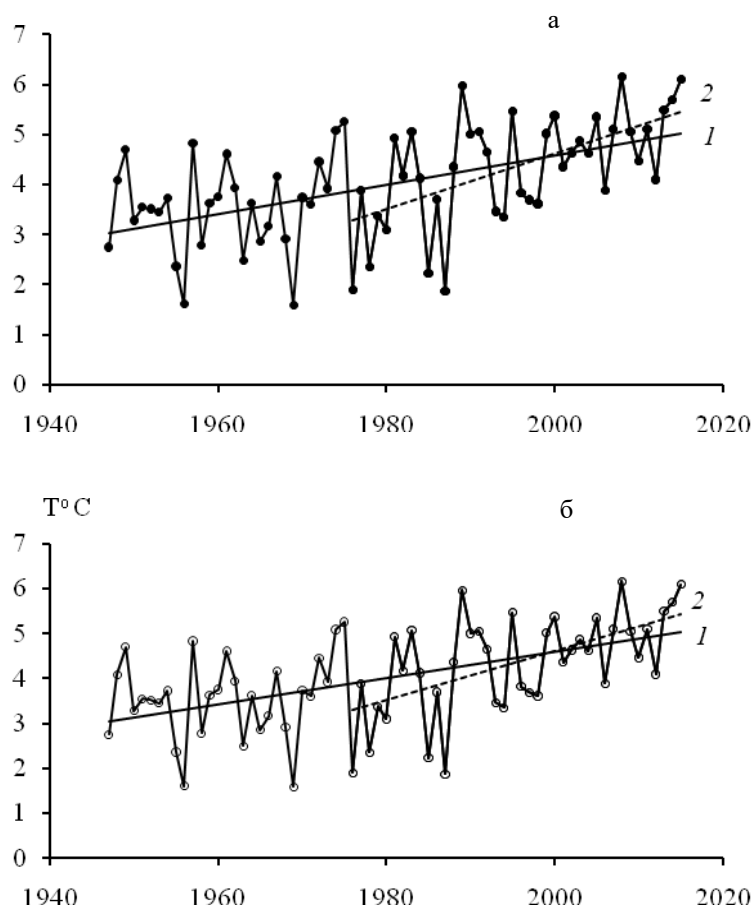
Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1947–1975 гг.													
$T_{\max}$	-3.8	-1.8	-0.1	7.6	15.3	19.0	21.9	20.3	13.4	7.5	1.0	-1.0	5.3
$T_{\min}$	-18.8	-19.6	-12.1	-0.4	7.6	12.4	14.4	14.0	6.9	1.1	-7.2	-19.0	1.6
$\sigma$	4.6	4.3	3.1	2.0	2.1	1.8	1.7	1.3	1.6	1.6	2.1	3.7	0.9
$\sigma^2$	21.8	18.8	9.9	4.1	4.4	3.2	2.9	1.7	2.5	2.7	4.5	14.0	0.8
1976–2015 гг.													
$T_{\max}$	-3.7	-0.3	3.4	8.7	15.4	20.8	24.0	19.2	13.3	7.8	2.9	2.7	6.1
$T_{\min}$	-21.2	-17.4	-10.2	0.1	7.2	12.3	15.7	13.9	6.6	-1.6	-9.4	-17.6	1.9
$\sigma$	3.6	4.2	2.8	2.0	2.0	2.1	1.9	1.2	1.6	1.9	3.0	4.2	1.1
$\sigma^2$	13.0	17.7	8.0	4.0	3.9	4.3	3.6	1.5	2.6	3.7	8.8	17.9	1.2

Примечание.  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  – соответственно максимальная и минимальная температура воздуха, °C;  $\sigma$  – стандартное отклонение, °C;  $\sigma^2$  – дисперсия, °C.

Среднегодовая температура воздуха претерпевает от года к году весьма значительные изменения, при этом колебания происходят синхронно на исследуемых станциях (рис. 1). Общая картина динамики ее значений на 2-х станциях сходна между собой, следовательно, станции реально отражают гидрометеорологический режим на побережье водохранилища.

При анализе изменчивости многолетнего хода температуры воздуха оценены климатические тренды (тенденции) для всего периода существования водохранилища и для 1976–2015 гг. Анализ региональных трендов изменения температуры воздуха показал, что оценки тренда, полученные для разных сезонов периода 1976–2015 гг., существенно больше, чем для всего периода наблюдений. За период потепления среднегодовая температура воздуха повышалась со скоростью 0.55 °C/10 лет, зимой – скорость потепления возросла до 0.73°C/10 лет (табл. 3).

**Температура воды.** В Рыбинском водохранилище изменение термического режима проявляется в увеличении средней продолжительности безледного периода с 193 до 213 дней и его амплитуды в 1.6 раза. В работе (Litvinov, Zakonnova, 2012) отмечалось, что средняя за май–октябрь температура поверхностного слоя воды водохранилища практически одинакова до потепления и после (второй период заканчивался 2008 г.). За рассматриваемые периоды с учетом последних аномально теплых лет она отличалась – во втором периоде на 0.4°C выше. Наиболее существенные различия наблюдались в июле (0.9°C) и октябре (0.7°C). Следует отметить, что особенностью второго периода является наибольшая изменчивость температуры воды в летний период (июнь, июль) и осенью (октябрь) (табл. 4).



**Рис. 1.** Многолетние изменения среднегодовой температуры воздуха. а – Рыбинск ГМО, б – Пошехонье-Володарск. 1 – линия тренда за период 1947–2015 гг. 2 – за период 1976–2015 гг.

**Таблица 3.** Параметры уравнения регрессии и критерий значимости тренда температуры воздуха, °C (МС Рыбинск, ГМО)

Сезон	Параметры		
	А	В	$R^2$
Весна	<u>0.039</u>	<u>73.6</u>	<u>0.23</u>
	0.033	60.7	0.08
Лето	<u>0.018</u>	<u>18.6</u>	<u>0.09</u>
	0.053	89.8	0.27
Осень	<u>0.16</u>	<u>26.7</u>	<u>0.05</u>
	0.53	100.9	0.20
Зима	<u>0.041</u>	<u>91.2</u>	<u>0.08</u>
	0.073	153.2	0.10
Год	<u>0.029</u>	<u>30.0</u>	<u>0.29</u>
	0.055	105.7	0.35

Примечание. В числителе – коэффициенты для периода 1947–1975 гг., в знаменателе – для периода 1976–2015 гг.

Температура поверхностного слоя воды водохранилища значительно изменяется. За весь период его существования отмечено значимое повышение ее значений в летний период (июль, август) и осенью (октябрь). В период потепления на 95%-ном уровне значимости прослеживается тенденция повышения температуры воды в течение всего безледного периода при средней скорости роста  $0.76^{\circ}\text{C}/10$  лет. Максимальная скорость повышения ее значений отмечалась в мае и июле –  $1.1\text{--}1.0^{\circ}\text{C}/10$  лет, соответственно следует отметить, что характеристики тренда, полученные для второй периода существенно отличаются от таковых для первого (рис. 2, табл. 5).

**Таблица 4.** Температура поверхностного слоя воды и ее статистические характеристики

Характеристика	3-я декада апреля	V	VI	VII	VIII	IX	X	1-я декада ноября	Средняя за май–октябрь
1947–1975 гг.									
$T_{\text{ср}}$	2.0	9.0	16.9	19.6	18.5	12.9	5.8	2.1	13.8
$T_{\text{макс}}$	7.6	14.2	20.0	24.6	20.6	15.3	9.3	5.6	15.0
$T_{\text{мин}}$	1.2	4.0	13.7	17.0	17.5	9.1	2.6	0.2	12.5
$\sigma$	1.5	2.4	1.7	1.6	1.1	1.6	1.4	1.4	0.7
$\sigma^2$	2.1	5.9	3.0	2.6	1.1	2.6	2.1	2.0	0.5
$Md$	1.5	9.3	17.0	19.6	18.5	12.8	5.9	2.1	13.8
1976–2014 гг.									
$T_{\text{ср}}$	3.1	9.4	17.1	20.5	19.0	13.1	6.5	2.4	14.2
$T_{\text{макс}}$	8.0	14.0	22.2	25.2	22.6	15.4	9.3	5.2	16.3
$T_{\text{мин}}$	1.1	4.6	12.3	16.7	17.0	10.0	2.4	0.1	11.3
$\sigma$	2.0	2.0	2.6	2.1	1.4	1.3	1.7	1.4	1.3
$\sigma^2$	3.8	6.8	6.0	4.0	1.7	1.5	2.6	2.1	1.6
$Md$	2.3	8.9	17.0	20.3	19.0	12.8	6.6	2.4	14.2

Примечание.  $T_{\text{ср}}$ ,  $T_{\text{макс}}$ ,  $T_{\text{мин}}$  – соответственно средняя, максимальная и минимальная температура воды, °C;  $\sigma$  – стандартное отклонение, °C;  $\sigma^2$  – дисперсия, (°C)<sup>2</sup>,  $Md$  – медиана, °C.

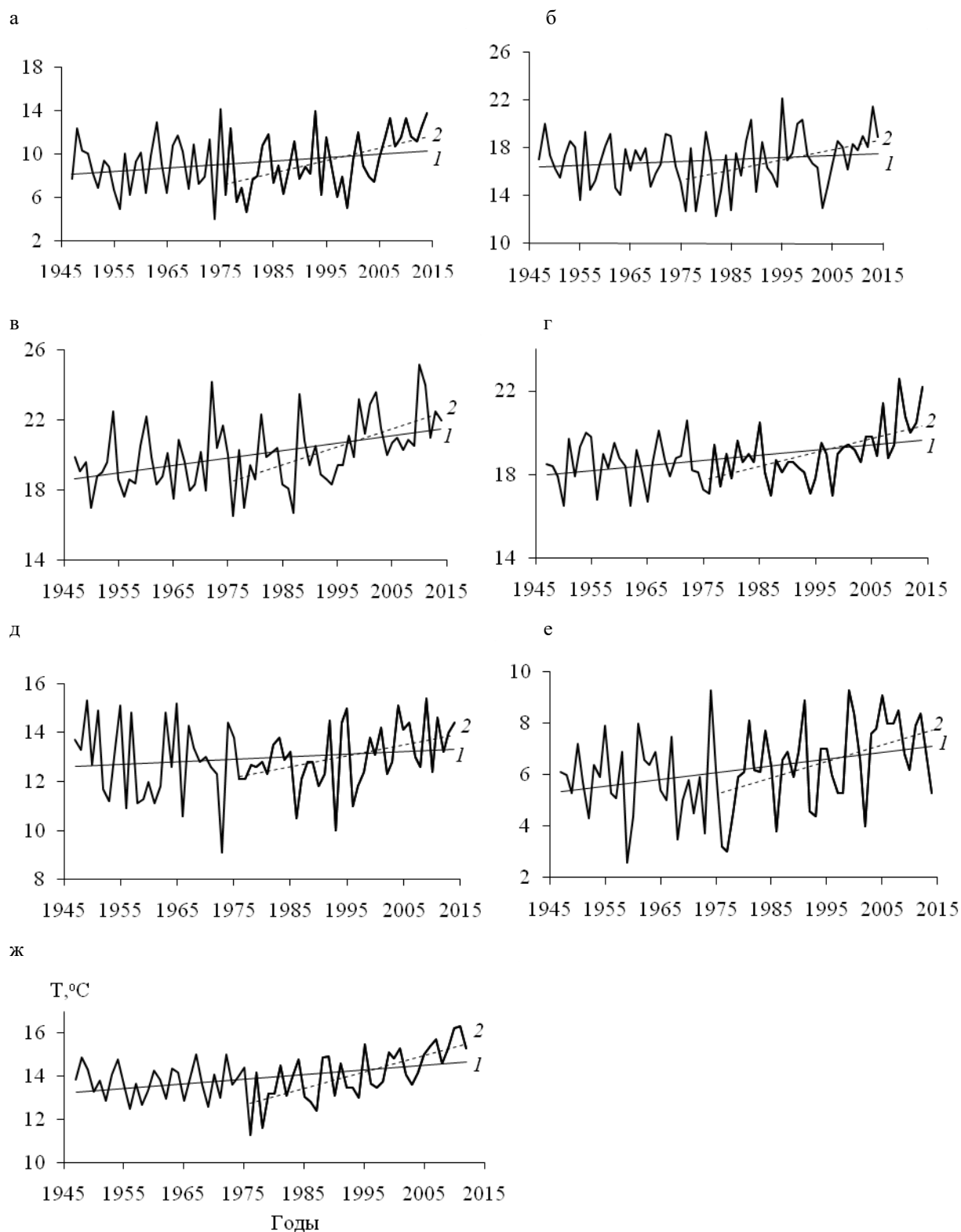
**Таблица 5.** Параметры уравнения регрессии и критерий значимости трендов температуры воды (°C) Рыбинского водохранилища

Месяц	Параметры		
	A	B	$R^2$
Май	<u>0.032</u>	<u>54.2</u>	<u>0.063</u>
	0.116	221.9	0.256
Июнь	<u>0.017</u>	<u>16.28</u>	<u>0.023</u>
	0.086	154.51	0.159
Июль	<u>0.042</u>	<u>63.93</u>	<u>0.197</u>
	0.102	182.8	0.337
Август	<u>0.024</u>	<u>29.69</u>	<u>0.155</u>
	0.067	114.79	0.344
Сентябрь	<u>0.010</u>	<u>6.95</u>	<u>0.020</u>
	0.044	75.11	0.168
Октябрь	<u>0.027</u>	<u>46.63</u>	<u>0.111</u>
	0.063	119,5	0.196
Май–октябрь	<u>0.022</u>	<u>29.13</u>	<u>0.167</u>
	0.076	136.78	0.473

Примечание. В числителе коэффициенты для периода 1947–2014 гг., в знаменателе – для периода 1976–2014 гг.

**Приток и осадки.** Современные изменения климата оказывают непосредственное влияние на речной сток. Формирование стока во многом определяется атмосферными осадками и температурным режимом на водосборе. Максимумы годового стока обычно совпадают с максимумами осадков и минимальными температурами воздуха. За период существования водохранилища в его бассейне наблюдались три многоводных (1947–1962, 1978–1995, 2004–2014 гг.) и два маловодных периода (1963–1977 и 1996–2003 гг.) (рис. 3). В многоводные периоды объем притока в водохранилище составил 34.91–36.41 км<sup>3</sup>, а в маловодные – 25.79–27.98 км<sup>3</sup>. При этом, в многоводные периоды наблюдались отдельные годы с низкой водностью (1948 г. – 26.99, 1972 г. – 16.20 км<sup>3</sup>), а в маловодные – с водностью значительно выше средней (1998 г. – 44.02 км<sup>3</sup>), что связано с климатическими особенностями отмеченных лет. В целом, за период с 1947 по 2014 гг. средний объем притока в водохранилище составил 32.79 км<sup>3</sup>.

За период потепления самым многоводным годом был 1990 г., объем притока – 53.4 км<sup>3</sup>, что составило 170% нормы. Причиной послужило выпадение аномально высокого количества осадков на протяжении всего года. Анализ многолетних изменений зимнего стока и осадков, выпавших на зеркало водохранилища, выявил синхронность их колебаний. Коэффициент корреляции составил 0.68 при  $p \leq 0.05$ ,  $n = 68$ .



**Рис. 2.** Многолетняя динамика средней температуры поверхностного слоя воды Рыбинского водохранилища. а – май, б – июнь, в – июль, г – август, д – сентябрь, е – октябрь, ж – май-октябрь. 1 – линейный тренд для периода 1947–2014 гг., 2 – для периода 1976–2014 гг.

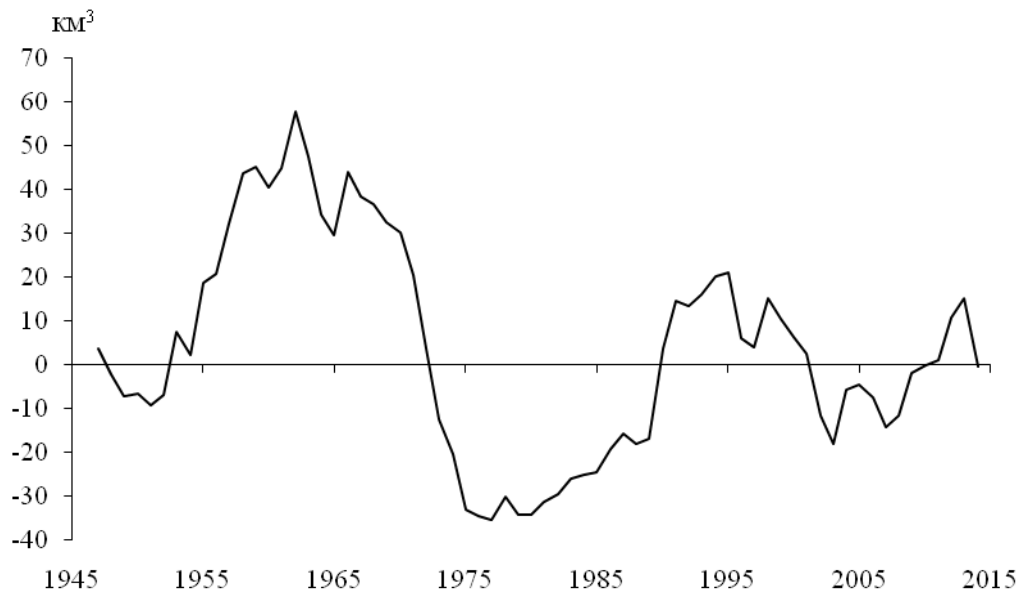
Значительное повышение температуры воздуха холодного периода года в период потепления привело к росту объема зимнего (ноябрь–март) притока водохранилища на 20–37% (табл. 6). Выявлен значимый положительный тренд – рост величины притока составил 12.4%/10 лет, а вклад тренда в общую дисперсию – 20%. При этом, отмечено снижение весеннего притока.

Количество осадков, выпавших на зеркало водохранилища в теплое время года (апрель–октябрь), изменялось от 74% в первом периоде до 71% во втором, с максимумом в июле (15%) и июне (13.4%) и минимумом в марте (3.7, 4.2%), соответственно (рис. 4). Следует отметить, что годо-

вая сумма осадков во второй период на 0.36 км (около 15%) больше, чем в первый. За период потепления отмечена тенденция увеличения зимних осадков со скоростью 0.048 км<sup>3</sup>/10 лет.

**Таблица 6.** Изменение объема притока Рыбинского водохранилища за период 1976–2013 гг. по сравнению с периодом 1947–1975 гг., %

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
37.4	32.8	36.8	-6.4	-9.0	-4.5	12.4	4.7	11.0	7.5	20.3	21.6



**Рис. 3.** Разностно-интегральная кривая притока Рыбинского водохранилища (последовательная сумма отклонений от среднего за период 1947–2014 гг.).

Выполнен анализ взаимосвязей между индексом САК и гидроклиматическими характеристиками бассейна. Установлено, что в зимний период возрастание интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой сопровождается повышением температуры воздуха, ростом количества осадков и объема стока (табл. 7).

**Таблица 7.** Корреляционная матрица индекса САК и гидроклиматических характеристик (декабрь – март),  $n = 64$

Переменные	Индекс САК	Сток	Атмосферные осадки	Твоздуха, Рыбинск, ГМО
Индекс NAO	1.00	<i>0.30</i>	0.05	<i>0.60</i>
Сток	<i>0.30</i>	1.00	<i>0.68</i>	<i>0.54</i>
Атмосферные осадки	0.05	<i>0.68</i>	1.00	<i>0.39</i>
Твоздуха, Рыбинск, ГМО	<i>0.60</i>	<i>0.54</i>	<i>0.39</i>	1.00

Примечание. Курсивом выделены значимые коэффициенты корреляции при  $p \leq 0.05$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали, что современные изменения климата оказывают определяющее влияние на температуру воздуха и воды, осадки и приток Рыбинского водохранилища. На побережье водохранилища за период потепления отмечено повышение температуры воздуха с 3.7 до 4.4°C (МС Рыбинск ГМО) и 3.0–3.7°C (МС Пошехонье-Володарск). Анализ региональных трендов изменения температуры воздуха показал, что оценки тренда, полученные для разных сезонов периода 1976–2015 гг., существенно больше, чем для всего периода существования водохранилища. За период потепления среднегодовая температура воздуха повышалась со скоростью 0.55°C/10 лет, зимой – скорость потепления возросла до 0.73°C/10 лет.

Установлено, что средняя за май–октябрь температура поверхностного слоя воды водохранилища за период 1976–2014 гг. была на 0.4°C выше, чем за 1947–1975 гг. Наиболее существенные различия наблюдались в июле (0.9°C) и октябре (0.7°C). В период потепления отмечена тенденция повышения температуры воды в течение всего безледного периода при средней скорости роста 0.76°C/10 лет и максимальной в июле – 1.0°C/10 лет.

Значительное повышение температуры воздуха холодного периода года в период потепления привело к росту объема зимнего (ноябрь–март) притока водохранилища – рост его величины составил 12.4%/10 лет. Годовая сумма осадков, выпавших на зеркало водохранилища во второй период, на 15% больше, чем в первый.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №14-05-00346-а) и Программы Президиума РАН: I.21П Биоразнообразии природных систем. Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга. 2.5. Влияние антропогенного регулирования уровня режима водохранилищ и температуры на динамику численности рыб различной экологии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет. 2014. 1008 с. Vtoroy otsenochny doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviykh na territorii Rossiyskoy Federatsii. M.: Rosgidromet. 2014. 1008 s. [Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and its Consequences in Russian Federation. Moscow: Roshydromet. 2014. 1008 p]. In Russian.
- Глобальный климат в 2001–2010 годы: Десятилетие экстремальных климатических явлений // Изменение климата. Информ. бюлл. № 7. 2014. С. 9–11. Globalniy klimat v 2001–2010 gody: Desyatiletie ekstremalnikh klimaticheskikh yavlenii. Inform. bull. No. 7. 2014. S. 9–11. [The Global Climate in 2001–2010: A Decade of Climate Extremes // Climate Change. Inform. Bull. No. 7. 2014. P. 9–11]. In Russian.
- Экологический атлас Ярославской области / Департамент охраны окружающей среды природопользования Ярославской области; научн. ред. Г.А. Фоменко. Ярославль. 2015. 154 с. Ekologicheskii atlas yaroslavskoy oblasti / Departament okhrani okruzhayushchey sredy prirodopolzovaniy yaroslavskoy oblasti; nauchn. red. G.A. Fomenko. Yaroslavl. 2015. 154 s. [Environmental Atlas of Yaroslavl region/ Department of Environment Protection and Natural Resource Use of Yaroslavl Region; Science Ed. G.A. Fomenko. Yaroslavl. 2015. 154 p.]. In Russian.
- Litvinov A.S., Zakonnova A.V. Thermal Regime in the Rybinsk reservoir under Global Warming // Meteorology and Hydrology. Vol. 37. No. 9. 2012. P. 640–644. (DOI: 10.3103/S1068373912090087).
- Litvinov A.S., Roshchupko V.F. Long-term Variations of elements Hydrometeorological Regime of the Rybinsk Reservoir // Meteorology and Hydrology. Vol. 35. No. 7. 2010. P. 483–489. (DOI: 10.3103/S1068373910070083).

## LONG-TERM CHANGES IN THE HYDROCLIMATIC REGIME OF THE RYBINSK RESERVOIR

**A. S. Litvinov, A. V. Zakonnova**

*I.D. Papanin Institute for biology of inland waters Russian Academy of Sciences, 152742 Borok, Russia  
e-mail: zak@ibiw.yaroslavl.ru*

The results of the analysis of long-term changes in air and water temperatures, the amount of precipitation and water inflow into the Rybinsk Reservoir are presented for the periods 1947–1975 and 1976–2014. Linear trends have been found and estimated. It is shown that the increase in air temperature for the period of warming promoted the rise of water temperature in the reservoir during all months at the maximum rate of rise in May and July by 1.0°C/10 years. The average temperature of the surface water layer for the vegetation period increased by 0.4°C, 0.9°C in July and by 0.7°C in October. Over the period of warming, the water inflow and the amount of precipitation which fell on the surface area of the reservoir increased. The relationship between hydro-meteorological characteristics and intensity of the atmospheric circulation over the North Atlantic which is indicated by the North Atlantic oscillation (the NAO index) is established.

**Keywords:** Rybinsk Reservoir, air temperature, water temperature, inflow, precipitation, trends of long-term changes.

## МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНОБАЛАНСОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

А. С. Литвинов, А. В. Законнова

*Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН*

*152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: litvinov@ibiw.yaroslavl.ru*

Выполнен анализ притока, стока и уровня Рыбинского водохранилища за период 1947–2014 гг. В бассейне водохранилища с момента ввода его в эксплуатацию наблюдались три многоводных и два маловодных периода водности. В многоводные периоды суммарный годовой приток превышал на 20–27% объем притока в маловодные, в экстремальные годы – в 3.3 раза. Показаны изменения в режиме уровня воды и приведены данные о среднемесячных и экстремальных показателях в разные периоды водности. Межгодовые и сезонные колебания уровня приводят к значительным изменениям площади, объема водохранилища и мелководной зоны.

*Ключевые слова:* Рыбинское водохранилище, приток, сток, периоды водности, уровень.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из ведущих факторов изменения окружающей среды служат водохранилища. Преобразования режима континентального звена круговорота воды коснулись общего процесса стока, водного баланса, водообмена, режима уровня, термики и энерго- и массообмена в речных экосистемах. Перестройка энерго- и массообмена в руслах и долинах рек в сочетании с интенсификацией хозяйственной деятельности в их бассейнах повлияли на функционирование речных систем и привели к изменению экологического потенциала и качества природных вод.

Рыбинское водохранилище – один из крупнейших искусственных водных объектов в Волжско-Камском каскаде. В 2016 г. исполняется 70 лет с момента полного завершения строительства и ввода его в эксплуатацию. Одновременно с задачей энергетического использования р. Волги в 30-е годы прошлого века после ввода в эксплуатацию канала им. Москвы всталла проблема создания судоходного пути на всем ее протяжении. Сотрудниками института “Гидростройпроект” было предложено создать в Молого-Шекснинском междуречье регулирующее водохранилище. Это предложение включало строительство Рыбинского гидроузла с напором до 18 м. Топография междуречья позволяла создать водохранилище емкостью свыше 25 км<sup>3</sup> и аккумулировать среднее половодье Верхней Волги и ее притоков – Мологи и Шексны. Проект давал большие возможности и в области судоходства.

Строительство Рыбинского гидроузла было начато в 1938 г. и закончено в 1946 г. Период строительства и начало наполнения водохранилища происходило в годы пониженной водности. Средний годовой объем стока в створе Рыбинского гидроузла за 1938–1946 гг. – 25.29 км<sup>3</sup>. В связи с этим до НПУ водохранилище было заполнено только весной 1947 г.

Сооружения Рыбинского гидроузла расположены в двух створах: шлюз и плотина в Волжском, здание ГЭС в Шекснинском. Русло реки Шексны перекрыто глухой земляной плотиной (26 лет Угличской..., 1967). Протяженность береговой линии водохранилища 2150 км. Водохранилище – водоем круглогодичного регулирования стока, одна из наиболее важных ступеней в Волжско-Камском каскаде.

Являясь водохранилищем комплексного назначения, используется многими отраслями хозяйства, приоритетные из которых энергетика, водоснабжение, водный транспорт и рекреация.

Занимая центральное положение на водных путях Единой глубоководной транспортной системы Европейской части России, водохранилище связывает порты Балтийского, Северного, Каспийского, Черного и Азовского морей. На Волжский каскад приходится около 70% грузооборота речного транспорта страны. На всем протяжении от устья Волги до г. Твери гарантируемые для судоходства глубины реки 4 м позволяют проходить судам грузоподъемностью до 5 тыс. т.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходным материалом для исследования многолетних изменений элементов водного баланса Рыбинского водохранилища послужили данные о месячном и годовом притоке, стоке, осадках и уровне воды, взятые из гидрологических ежегодников за 1947–1986 гг. С 1987 по 2014 гг. указанные материалы получены в Рыбинской гидрометеорологической обсерватории (РГМО).



## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По распределению глубин и морфологическим особенностям ложа в водохранилище выделяют четыре плеса: Волжский, Моложский, Шекснинский и Главный (Фортунатов, 1959) (рис. 1). Первые три располагаются по долинам соответствующих рек и представляют вытянутые, за исключением Шекснинского плеса, сравнительно узкие участки. Они характеризуются наличием извилистой полосы больших глубин по затопленным руслам рек, к которой примыкают участки затопленных пойм с глубинами от 2 до 9 м.



**Рис. 1.** Схема Рыбинского водохранилища. Римские цифры – плесы: I – Волжский, II – Моложский, III – Шекснинский, IV – Главный; арабские – номера стандартных станций: 1 – Коприно, 2 – Молога, 3 – Средний Двор, 4 – Наволок, 5 – Измайлово, 6 – Брейтово.

Полезный объем водохранилища составляет  $\sim 0.4$  среднего многолетнего объема притока. Он позволяет осуществлять годовое, сезонное, недельное и суточное регулирование, а также обеспечение безопасности гидротехнических сооружений. В период летне-осенней межени водные ресурсы водохранилища обеспечивают навигационные попуски в нижний бьеф и выполнение диспетчерского графика, соответствующего колебаниям нагрузки энергосистемы. Основные характеристики водоема приведены в табл. 1.

**Водный баланс и уровень.** Водный баланс любого водоема отражает совокупное воздействие факторов, обусловленных колебаниями климата и антропогенной деятельностью на водосборе. Это основа для выполнения всех видов исследований, связанных с особенностями формирования и динамики водных масс, гидрохимического и гидробиологического режима водоема. Несмотря на определенную устойчивость, речной сток непрерывно изменяется во времени в зависимости от колебания климатических факторов и увлажненности территории. С момента ввода в эксплуатацию водохранилища в его бассейне наблюдались три многоводных (1947–1962, 1978–1995, 2004–2014 гг.) и два маловодных (1963–1977 и 1996–2003 гг.) периода.

За многоводные периоды среднегодовой приток воды в водохранилище составлял  $35.60 \text{ км}^3$ , в маловодные –  $27.23 \text{ км}^3$ . В многоводные периоды наблюдались отдельные годы с низкой водностью (1948 г. –  $26.99$ , 2007 г. –  $26.0 \text{ км}^3$ ), а в маловодные – годы с водностью значительно выше средней (1966 г. –  $47.11$ , 1998 г. –  $44.02 \text{ км}^3$ ), что связано с гидрометеорологическим режимом отмеченных лет. В целом, за период 1947–2014 гг. средний объем притока в водохранилище составил  $32.79 \text{ км}^3$  (за базовый период 1961–1990 гг. –  $31.57 \text{ км}^3$ ).

**Таблица 1.** Основные характеристики Рыбинского водохранилища

Показатель	Единица измерения	Значение показателя
Среднеголетний приток (1947–2013 гг.)	км <sup>3</sup>	32.79
Многоводный год (самый многоводный за период существования водохранилища, 1990 г.)	км <sup>3</sup>	53.4
Маловодный год (1972 г.)	км <sup>3</sup>	16.2
НПУ (нормальный подпорный уровень)*	м	101.81
УНС (уровень нормальной предполоводной сработки)*	м	98.81–99.81
УМО (уровень мертвого объема)*	м	96.91
Максимальный проектный при пропуске половодий (вероятность превышения 0.01%)*	м	103.81
Уровень форсированного горизонта (вероятность превышения 1%)*	м	102.41
Площадь зеркала:		
при НПУ	км <sup>2</sup>	4550
при УНС	км <sup>2</sup>	2703
Полная статическая емкость при НПУ	км <sup>3</sup>	25.42
Полезная емкость между НПУ и УНС	км <sup>3</sup>	14.42

\* Все уровни водохранилища даны в Балтийской системе (БС).

С 1947 г. эксплуатация водохранилища приходилась на годы повышенной водности (табл. 2). Максимальный приток в водохранилище за этот период наблюдался в 1953 и 1955 гг. – 47.28 и 49.59 км<sup>3</sup>, соответственно. В 1953 г. наибольший среднемесячный приток приходился на апрель–май и составил 17.07 км<sup>3</sup>, а в 1955 г. при близком среднегодовом объеме притока за апрель–май потупило 36.88 км<sup>3</sup>. Высокий годовой объем притока 1953 г. вызван большим количеством осадков в течение августа–декабря, что обусловило рост притока до 21.27 км<sup>3</sup>, тогда как в 1955 г. за этот период его величина значительно ниже – 6.23 км<sup>3</sup>.

**Таблица 2.** Характеристики основных составляющих водного баланса Рыбинского водохранилища за периоды разной водности, км<sup>3</sup>

Период, гг.	Приход			Расход		
	Приток	Осадки	Сумма	Сток	Испарение	Сумма
Многоводные периоды						
1947–1962	36.41	2.05	38.46	34.66	2.24	36.90
1978–1995	35.94	2.50	38.44	33.55	1.78	35.33
2004–2014	34.41	2.42	36.83	34.60	1.56	36.16
Маловодные периоды						
1996–2003	27.88	2.21	30.09	27.15	1.58	28.73
1963–1977	26.59	2.11	28.70	25.68	2.05	27.73

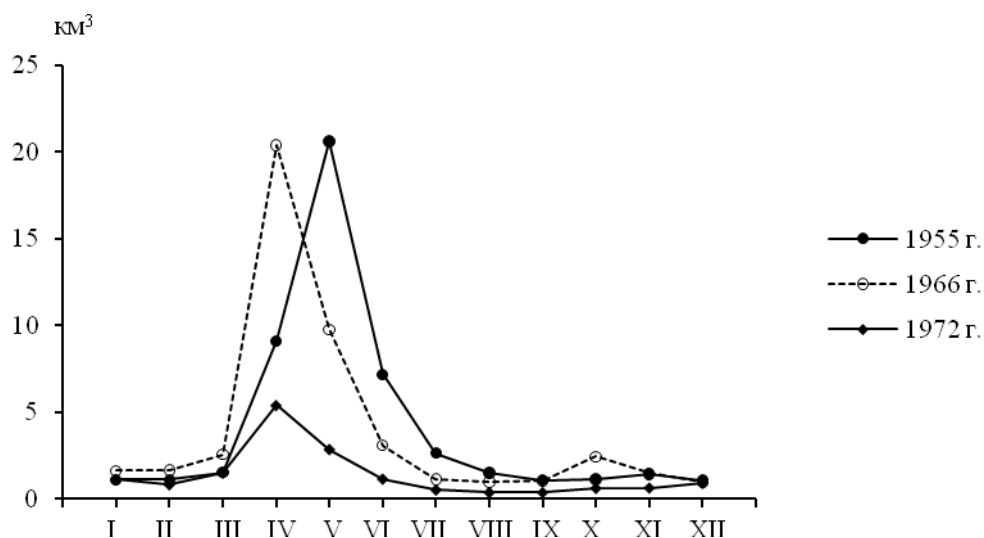
В маловодный период 1963–1977 гг. средний объем притока водохранилища составил 25.79 км<sup>3</sup>, при наименьшем его значении 16.20 км<sup>3</sup> в 1971 г. и 16.46 км<sup>3</sup> в 1972 г. Это были самые низкие величины за весь период нормальной эксплуатации водохранилища (Литвинов, 2000).

В отдельные годы приток существенно отличается от среднего за период не только по величине, но и по внутригодовому распределению (рис. 2).

За 70 лет существования водохранилища было 11 экстремально многоводных лет с объемом притока свыше 42.0 км<sup>3</sup>, экстремально маловодных с величиной притока меньше 23.0 км<sup>3</sup> – 8 (табл. 3). Максимальный объем притока наблюдался в 1990 г. – 53.39 км<sup>3</sup>, что обусловлено повышенной температурой воздуха в зимний период и распределением атмосферных осадков в течение года. При этом приток за февраль – май равен 24.13 км<sup>3</sup>, август – декабрь – 24.09 км<sup>3</sup>.

За 30 лет базового периода (1961–1990 гг.) среднегодовой приток составил 31.57 км<sup>3</sup> и близок к таковому за период эксплуатации водохранилища (32.79 км<sup>3</sup>). За этот период годовой приток в водохранилище 3 раза превышал 45.0 км<sup>3</sup> (1962, 1966, 1990 гг.) и был менее 20.0 км<sup>3</sup> в 1964, 1972, 1973 гг.

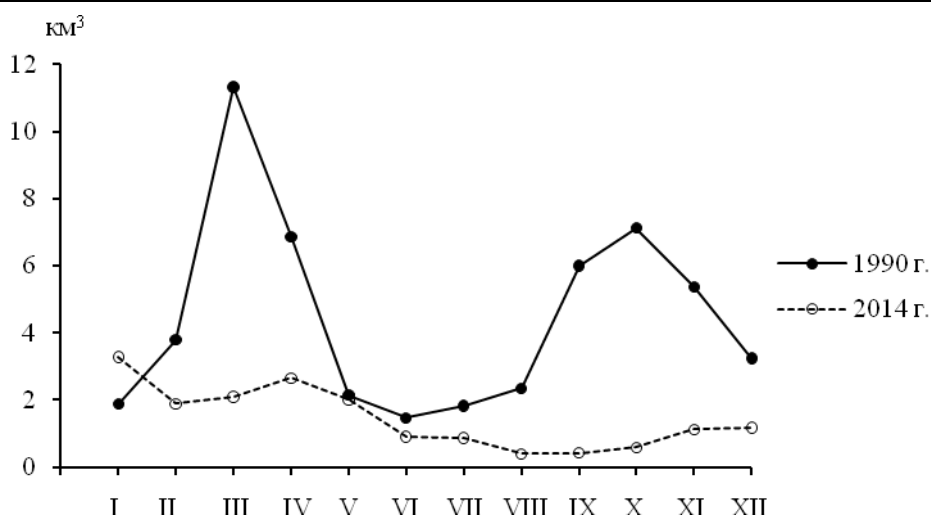
В современный период (2000–2014 гг.) величина притока изменялась от 17.40 км<sup>3</sup> в 2014 г. до 45.17 км<sup>3</sup> в 2004 г. при среднем значении 31.97 км<sup>3</sup>. За январь–май 2014 г. в водохранилище поступило 11.93 км<sup>3</sup>, а за оставшиеся 7 месяцев только 5.47 км<sup>3</sup> (рис. 3).



**Рис. 2.** Динамика притока Рыбинского водохранилища в многоводные – 1955, 1966 и маловодный – 1972 гг.

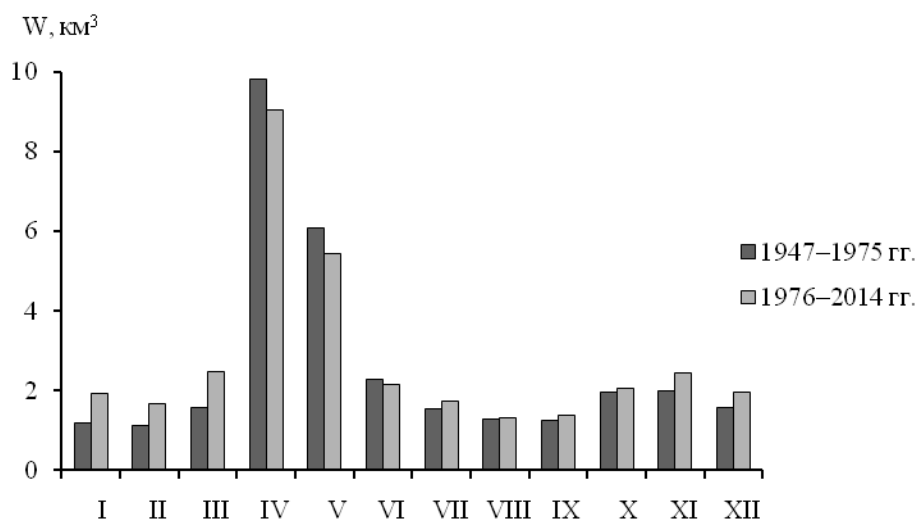
**Таблица 3.** Характеристика составляющих водного баланса Рыбинского водохранилища в экстремальные годы, км³

Годы	Многоводные годы		Годы	Маловодные годы	
	приток	сток		приток	сток
1953	47.28	44.09	1963	22.64	27.53
1955	49.49	47.51	1964	19.39	18.77
1957	44.18	42.26	1971	22.84	21.19
1958	44.25	42.77	1972	16.20	19.80
1962	45.84	42.61	1973	16.46	14.83
1966	47.10	49.22	1996	17.69	14.93
1990	53.39	42.13	2002	18.73	22.21
1991	43.64	46.10	2014	17.40	22.40
1998	44.00	45.94	–	–	–
2004	45.17	45.50	–	–	–
2009	42.53	43.93	–	–	–
Среднее	46.08	44.73	Среднее	18.92	20.21



**Рис. 3.** Динамика притока в экстремальные годы периода потепления. 1990 г. – многоводный, 2014 г. – маловодный.

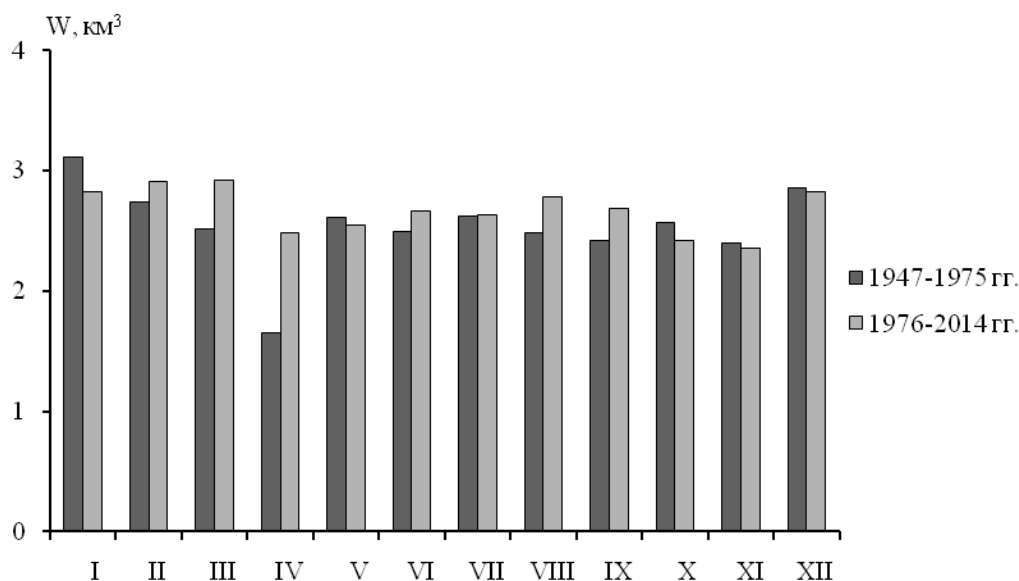
В период потепления внутригодовое распределение притока в водохранилище характеризуется значительным ростом в январе–марте (33–37%) и снижением (4.5–9.0%) в период половодья (рис. 4). В экстремальные годы эти различия наибольшие.



**Рис. 4.** Динамика притока Рыбинского водохранилища за отдельные периоды.

В расходной части водного баланса объем стока через Рыбинский гидроузел занимает первое место по величине и составляет в среднем  $33.55\text{--}34.66\text{ км}^3$  в многоводные периоды и  $25.68\text{--}27.58\text{ км}^3$  в маловодные. Следует отметить, что в многоводные периоды его величина меньше объема притока на  $1.75\text{--}2.39\text{ км}^3$ , в маловодные – разница уменьшается до  $0.7\text{--}0.9\text{ км}^3$ .

В течение года распределение стока происходит равномерно за исключением апреля, когда в период потепления его величина была на  $0.83\text{ км}^3$  больше, чем в первый период (1947–1975 гг.) (рис. 5).



**Рис. 5.** Динамика стока Рыбинского водохранилища за отдельные периоды.

В связи со значительной внутригодовой изменчивостью элементов водного баланса водохранилища велики вариации его водообмена. Интенсивность водообмена в водоеме во многом определяет обмен веществом и энергией между различными плесами водоема. Водообмен в водохранилище достигает максимальных значений в апреле, что обусловлено уменьшением объема воды в водохранилище в результате зимней сработки и резким увеличением притока в период половодья.

Уровень воды в водохранилище зависит от объема притока и режима эксплуатации. В годовом цикле динамики уровня четко выделяются три характерных периода: весенний (наполнение), летне-осенний (небольшая его сработка) и зимний (сработка). Кривые внутригодового хода среднемесячного уровня в различные по водности годы имеют однотипный характер. В многоводный период 1947–1962 гг. уровни на  $1.05\text{--}1.2\text{ м}$  превышали таковые в маловодные периоды. В многоводный период 1978–1995 гг. превышение составило всего  $0.5\text{--}0.7\text{ м}$  (Буторин, 1969; Литвинов, 2000).

Максимальная амплитуда изменения среднемесячного уровня наблюдалась в апреле многоводных периодов и составляла 4.61 м, минимальная – в июне–июле (1.3–1.7 м). В октябре–ноябре она вновь увеличивалась до 3.7–3.9 м. В маловодные периоды наибольшая разница среднемесячных значений уровня отмечалась в январе и декабре (2.9–2.7 м), в апреле – 2.2–2.7 м. Средняя амплитуда годовых колебаний уровня в первый многоводный период изменялась от 3.64 до 3.29 м, во второй – уменьшилась до 3.07 м (Литвинов, Рошупко, 2007).

Минимальный уровень водохранилища наблюдается в марте. Выделяются 4 года, когда его средние значения были ниже в апреле (1958, 2005, 2007, 2013 гг.) и 2 года с одинаковым уровнем в эти месяцы (1987, 1996 гг.). По многолетним данным средняя дата начала весеннего наполнения водохранилища 1 апреля, окончания наполнения – 28 мая. Средняя продолжительность наполнения составляет 58 сут, при интенсивности 6 см/сут. Максимальное значение уровня достигает в июне. Постепенное понижение начинается с июля, а наиболее интенсивное – с декабря. В отдельные многоводные годы в течение сентября–ноября за счет обильных осадков отмечается второй подъем уровня.

Продолжительность сработки водохранилища в среднем составляет 300 суток. Наиболее глубокая сработка происходит в годы повышенной водности, что обусловлено подготовкой водохранилища к приему больших объемов воды. Перед установлением ледостава по возможности не допускается повышение уровня воды в целях предотвращения захода рыбы на зимовку в осушенные летом мелководья.

В связи с мелководностью водохранилища межгодовые и сезонные колебания уровня приводят к значительным изменениям его площади и объема. При максимальном среднемесячном уровне водохранилища в июне 1959 г. 102.20 м БС его площадь составляла 4759 км<sup>2</sup>, объем 27.14 км<sup>3</sup>, при минимальном в 1973 г., равном 97.77 м, площадь уменьшилась до 2622 км<sup>2</sup>, объем – 10.40 км<sup>3</sup>. Отметки уровня, обусловленные изменением объема водохранилища при его сработке, приводят к существенным изменениям площади мелководной зоны, которая при НПУ равна 1847 км<sup>2</sup> (до изобаты 4 м). Максимальное понижение уровня в 2002 г. с мая по ноябрь на 2.91 м привело к уменьшению мелководий до 574 км<sup>2</sup>. На момент ледостава при среднемноголетнем понижении уровня на 1.8 м площадь мелководной зоны составляет 967 км<sup>2</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ многолетней изменчивости характеристик водного баланса Рыбинского водохранилища показал, что за весь период его существования отмечены три многоводных и два маловодных периода. В многоводные периоды объем притока на 20–27% превышал таковой в маловодные. Максимальный объем притока составлял 53.39 км<sup>3</sup>, минимальный 16.20 км<sup>3</sup>.

В период потепления внутригодовое распределение притока в водохранилище характеризуется значительным ростом в январе–марте (33–37%) и снижением (4.5–9.0%) в период половодья. Наиболее глубокая сработка водной массы водохранилища происходила в годы повышенной водности, что обусловлено его подготовкой к приему больших объемов воды. В связи с мелководностью водохранилища межгодовые и сезонные колебания уровня приводят к значительным изменениям его площади и объема.

Исследования гидрологических характеристик экосистемы Рыбинского водохранилища с момента его создания показали, что для оценки ее устойчивого функционирования, оптимизации водопользования и предотвращения возможных экологических рисков необходимы многолетние комплексные наблюдения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-05-00346-а) и Программы Президиума РАН: I.21П Биоразнообразие природных систем. Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга. 2.5. Влияние антропогенного регулирования уровня режима водохранилищ и температуры на динамику численности рыб различной экологии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 319 с. *Gidrologicheskie prochessy i dinamika vodnich mass v vodokhranilischakh Volzhskogo kaskada*. L.: Nauka, 1969. 319 s. [Butorin N.V. Hydrological Processes and Dynamics of Water Masses in the Volga Cascade Reservoirs. L.: Nauka, 1969. 319 p.]. In Russian.
- 26 лет Угличской и Рыбинской ГЭС. М.: Энергия, 1967. 311 с. *25 let Uglichskoy i Rybinskoy GES*. M.: Energiya, 1967. 311 s. [Twenty-six Years of Uglich and Rybinsk Hydroelectric Stations. M.: Energiya, 1967. 311 p.]. In Russian.

- Литвинов А.С. Энерго-и массообмен в водохранилищах Волжского каскада. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2000. 83 с. Litvinov A.S. Energo-i massoobmen v vodokhranilischakh Volzhskogo kaskada. L.: Nauka, 1969. 319 s. [Litvinov A.S. Energy and Mass Exchange in the Volga Cascade Reservoirs. Yaroslavl: YaGTU, 2000. 83 p.]. In Russian.
- Фортунов М.А. Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатели его режима // Тр. Ин-та биол. водохр. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1959. Вып. 2(5). С. 246–357. Fortunatov M.A. Tsvetnost i prozrachnost vody Rybinskogo vodokhranilisha kak pokazateli ego rezhima // Tr. In-ta biol. vodokhr. M.-L.: Izd-vo AN SSSR, 1959. Vyp. 2(5). S. 246–357. [Fortunatov M.A. Color and Transparency of Water in the Rybinsk Reservoir as Indicators of its Regime // Proceedings of the Institute of Biology of Reservoirs. M.-L.: Izd-vo AN SSSR, 1959. Is. 2(5). P. 246–357.]. In Russian.
- Litvinov A.S., Roshchupko V.F. Long-Term and seasonal Water Level Fluctuations of the Rybinsk Reservoir and their Role in the Functioning of its Ecosystem // Water. Resources. 2007. V. 34. No. 1. P. 27–34.

## **LONG-TERM CHANGES IN WATER BALANCE CHARACTERISTICS OF THE RYBINSK**

**A. S. Litvinov, A. V. Zakonnova**

*I.D. Papanin Institute for biology of inland waters Russian Academy of Sciences, 152742 Borok, Russia  
e-mail: litvinov@ibiw.yaroslavl.ru*

The analysis of the inflow, discharge and the level of the Rybinsk Reservoir has been made for the period 1947–2014. Three high-water and two low-water periods were observed in the reservoir since its putting into operation. During high water periods the total annual inflow exceeded by 20–27% the volume of inflow in low water years and 3.3 times in extreme years. Changes in the water level regime are shown and the data on average monthly and extreme parameters in periods of different water levels are presented. Annual and seasonal fluctuations of the level cause significant changes in the area and volume of the reservoir and its shallow zone.

*Keywords:* Rybinsk Reservoir, inflow, discharge, water regime periods, level.

## ИЛОНАКОПЛЕНИЕ В СИСТЕМЕ ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА

**В. В. Законнов**

*Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН  
152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: zak@ibiw.yaroslavl.ru*

На основании многолетних фондовых материалов ИБВВ РАН проанализированы особенности илообразования в водохранилищах Волжского каскада, в том числе по орографическим районам, соответствующим крупным или средним техногенным водоемам равнинного типа, различающихся по морфоструктурным, гидрометрическим показателям, гидродинамическими процессами и геолого-геоморфологическим строением ложа и берегов. Установлены закономерности распределения и накопления илистых отложений – основных гидроэкологических характеристик функционирования пресноводных экосистем. Составлены прогнозы пространственно-временного распределения и накопления илов к столетию создания каждого водохранилища и выделенных районов. Работа может быть использована гидрологами-седиментологами, гидробиологами и геохимиками для определения условий осадкообразования, продуктивности и токсичности нижнего яруса экосистем водохранилищ.

*Ключевые слова:* волжский каскад водохранилищ, орографические районы, осадкообразование, илонакопление, ситуационный прогноз.

Памяти Б. И. Новикова посвящается

### ВВЕДЕНИЕ

Создание техногенных (искусственных) водоемов объемом более 1 км<sup>3</sup> для многоцелевого назначения обусловило изучение процессов осадкообразования. На первом этапе их существования оно оценивалось как потенциально негативное, препятствующее нормальной эксплуатации водных объектов. Первые результаты, полная сводка которых приведена в работе Г.И. Шамова (1939), показали, что процесс образования осадков является наиболее существенным лишь в прудах и небольших горных водохранилищах. В крупных равнинных водохранилищах последствия накопления ДО (донных осадков) отмечены на отдельных участках (заливы, порты, прорези судоходных каналов), но в масштабах всего водоема они незначительны (Новиков, 1985; Законнов и др., 2010).

В последнее время начал развиваться, получая все большее признание новый аспект изучения ДО – экологический, согласно которому они являются важным абиотическим компонентом водных экосистем, активно участвуя в обмене веществом и энергией с водными массами (Денисова и др., 1975). Одним из показателей продуктивности дна и гидроэкологического состояния континентальных водоемов является распределение, накопление и качественный состав илистых отложений. Они представляют собой субстрат из минеральных частиц различной крупности с преобладанием алевритопелитовых фракций (< 0.1 мм) и соответствующих частиц органического происхождения обладающих повышенными сорбционными свойствами и активностью взаимодействия в системе: вода – дно. По оценке В.В. Гордеева (1983) в стоке рек волжско-камского бассейна преобладает иллит (44%), монтмориллонит (36%) и хлорит (20%) от суммы глинистых минералов (87%).

Места накопления илов – участки водоемов, где наблюдается слабая динамика гидрологических процессов, вызываемых стоковыми и ветровыми течениями. Это способствует безвозвратному захоронению взвешенных органо-минеральных и растворенных веществ различного происхождения (природных и антропогенных) гравитационно-сорбционным путем, а в экстремальных гидрометеорологических условиях – взмучиванию и вторичному загрязнению воды. Кроме того, илистые отложения являются средой обитания и пищевым объектом значительной группы гидробионтов – бактерий, бентоса и бентосоядных рыб. Все это определяет актуальность изучения не только в целом условий осадконакопления, но и составляющих этого процесса – образования крупнозернистых наносов (песков) и тонкодисперсных отложений (илов).

Роль и значение илообразования в равнинных водохранилищах впервые оценил Б.И. Новиков (1985). Он рассматривал илонакопление, как часть процесса занесения водоемов, касающееся, главным образом, мелких частиц, независимо от их генезиса, т.е. отождествлял понятия “занесение” и “заиление”, установленные А.И. Чеботаревым (1970). Однако все количественные показатели конкретизировал для площади, где происходит процесс илонакопления, таким образом, придерживался единого мнения с Н.В. Буториным, Н.А. Зиминовой и В.П. Курдиным (1975), что илонакопление – это часть процесса осадконакопления. Осадкообразование – это одновременное формирование на дне каменисто-песчаных наносов и илисто-глинистых минеральных и органических веществ, или накоп-

ление вторичных донных отложений. Оно идет в противофазе с формированием трансформированных грунтов, образовавшихся в результате размыва ложа и берегов, пептизации, подтопления, заболачивания, сплавинообразования, новообразования гидроморфных почв. В отдаленной перспективе (несколько тысячелетий) это приведет к уменьшению площадей, средней глубины, частичному или полному занесению водохранилищ.

Цель работы – оценить специфику формирования, распределения и накопления илистых отложений и выявить их закономерности в системе водохранилищ Волжского каскада.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основой работы послужили результаты мониторинга донных отложений водохранилищ Волги, выполненных до 1975 г. В.М. Широковым (1964), Н.Н. Виноградовой, К.К. Эдельштейном (1971), Н.В. Буториным, Н.А. Зиминской, В.П. Курдиным (1975), а затем автором (Законнов, 2007) с привлечением региональных исполнителей и судов различных учреждений (табл. 1).

**Таблица 1.** Материалы гидрологических съемок

Водохранилище	Год за- полнения	Годы расчетных грунтовых съемок / периоды расчетов						
Иваньковское	1937	1947/10	1957/20	1968/31	1976/39	1990/53	2012/75	<b>2037/100</b>
Угличское	1940	1950/10	1958/18	1968/28	1977/37	1991/51	2012/72	<b>2040/100</b>
Рыбинское	1941	1955/14	1965/24	1978/37	1992/51	2010/69	<b>2021/80</b>	<b>2041/100</b>
Горьковское	1955	1962/7	1980/25	1990/44	2010/55	<b>2035/80</b>	<b>2055/100</b>	–
Чебоксарское	1981	1981/0	1991/10	2001/20	2010/29	<b>2031/50</b>	<b>2051/70</b>	<b>2081/100</b>
Куйбышевское	1955	1963/8	1983/28	1993/38	2002/47	<b>2025/70</b>	<b>2050/100</b>	–
Саратовское	1967	1968/1	1985/18	2006/39	<b>2017/50</b>	<b>2042/75</b>	<b>2067/100</b>	–
Волгоградское	1958	1960/2	1985/27	2012/54	<b>2033/75</b>	<b>2058/100</b>	–	–

Выделено шрифтом – ситуационные прогнозы к соответствующим годам/периодам.

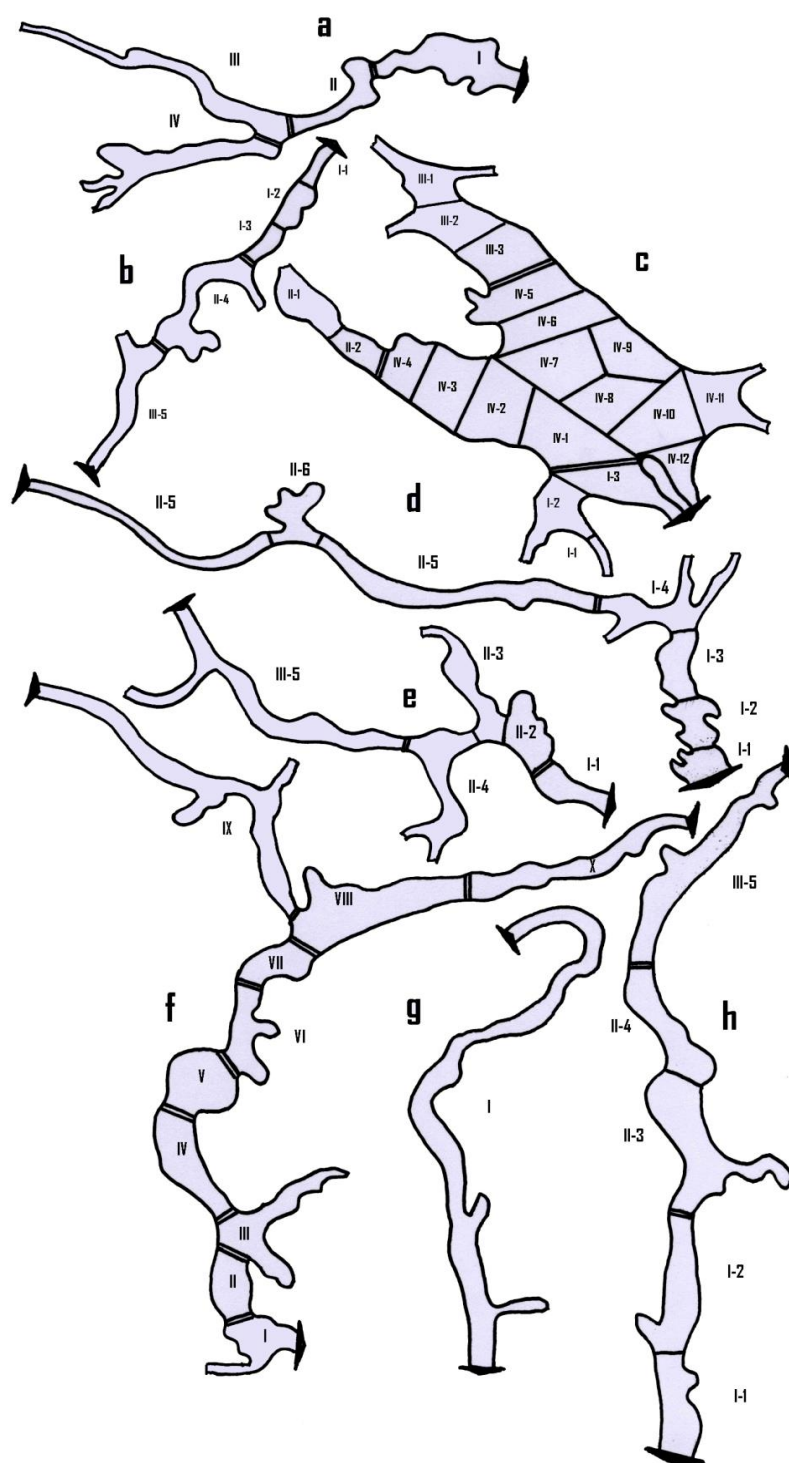
Все съемки осуществлялись по единой сетке станций с помощью грунтовых трубок ГОИН-1 и 1.5 по методикам, апробированным на водохранилищах Верхней Волги (Буторин и др., 1975). Толщину керна определяли от маркирующего слоя в виде дерновины или руслового песка. Согласно этим материалам, ошибка определения интенсивности осадконакопления составляла 10–20%, что вполне приемлемо для такого рода расчетов. Площади илонакопления рассчитывались по батиметрической карте на основании проектной морфометрической документации, выполненной до создания водохранилищ с выделением преимущественных типов осадков в заданных интервалах глубин, характеризующих литоральную, сублиторальную и профундальную зоны водоема и с учетом их вероятностного распределения. Ошибка метода составляет около 5% и зависит от количества станций.

За все время существования водохранилищ было выполнено более 15 тыс. гидрологических станций, что позволило с высокой достоверностью выявить особенности осадконакопления в пространственно-временном аспекте не только по каждому водохранилищу, но и по отдельным специфическим районам и глубинам.

Районирование водохранилищ по условиям илонакопления выполнено в соответствии с общепринятыми требованиями в лимнологии (рис. 1). Поэтому, кроме районов и плесов, водохранилища разбивались на участки (от 1 на Саратовском до 20 на Рыбинском). Каждый участок характеризовал: зоны переменного подпора – нижние и верхние (речные и приплотинные) бьефы гидроузлов, промежуточные (озерные), крупные обособленные мелководные заливы: Шошинский – IV; Моложский – II–1; Костромской – II–6; глубоководные: Ухро-Согожский – IV–11; Елпать-Унжа-Немдский – I–4; Черемшанский – III; Ерусланский – II–3), где осаждение взвешенных частиц и формирование донных осадков отличается особенностями проявления гидродинамических процессов. Таким образом, мы имеем 8 водохранилищ и 42 орографических района (19 озеровидных, 7 приплотинных, 9 речных и 7 заливов), на которых проведено от 3 до 6 грунтовых съемок. В результате получена обширная информация о пространственно-временной трансформации площадей, средней толщине илистых отложений как в многолетнем аспекте, так и по периодам между годами грунтовых съемок. Вместе с прогнозными расчетами это составляет исходную базу данных, позволяющую получить статистически достоверную количественную информацию.

Мониторинговые работы (до 6 грунтовых съемок на отдельных водохранилищах) показали идентичность процессов осадкообразования в каскаде, что позволило сделать ситуационные прогнозы для всей системы водохранилищ Волги вплоть до 100-летия их существования. По сути – это моделирование седиментационных потоков в естественных условиях.





**Рис. 1.** Районирование водохранилищ Волги по условиям седиментации. а – Ивановское, б – Угличское, с – Рыбинское, d – Горьковское, е – Чебоксарское, f – Куйбышевское, g – Саратовское, h – Волгоградское. Римские цифры – плесы, районы, арабские – участки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно генетической классификации грунтов и донных осадков водохранилищ равнинного типа в категорию или группу вторичных ДО входят все илистые органо-минеральные отложения (табл. 2).

Гранулометрический состав определен в сырых пробах с применением электромагнитной просеивающей установки “Analysette-3” Alfred Fritsch & CO. Органическое вещество определяли методом прокаливании в муфельной печи при температуре 600°C. Результаты анализов показали, что от-

дельные типы отложений всех водохранилищ Волжского каскада и их орографических районов не различаются между собой, что обусловлено спецификой формирования конкретных осадков (табл. 3).

Механический состав основных типов ДО характеризует четкую тенденцию увеличения дисперсности скелета проб по длине водоемов от верхней плотины к нижней. Содержание песчаных частиц размером  $> 0.1$  мм уменьшается в том же направлении. Сумма фракций, представленных размерами частиц 0.1–0.01 мм, достигает максимальных значений при переходе русловых (речных) участков в озеровидные, а также в расширениях и в устьях больших и малых притоков (заливах).

**Таблица 2.** Классификация илов водохранилищ Волги

Группа	Подгруппа	Тип	Основные физико-химические характеристики		
			Сумма фракций, %		Органическое вещество, %
			$>0.1$ мм	$<0.01$ мм	
Вторичные	Органические	Отложения из макрофитов	–	–	$>70$
		Торфянистый ил	$<20$	$>30$	40–70
		Торфогенный ил	$<30$	$>30$	30–40
	Минеральные	Глинистые илы: (серый)	$<30$	$>70$	10–30
		(бурый)	$<20$	$>80$	5–10
		(белый)	$<10$	$>90$	1–5
		Песчанистый ил	$<70$	$>30$	5–10

**Таблица 3.** Средние и экстремальные значения статистических показателей физико-химического состава илистых отложений

Тип	Число проб	Коэффициент сортировки	Коэффициент асимметрии	Средний диаметр частиц, мм	Органическое вещество
Отложения из макрофитов	12	3.0(20–41)	1.18 (0.93–3.6)	0.10(0.08–0.14)	72 (66–90)
Торфянистый ил	13	3.4(3.2–3.9)	0.18(0.07–0.40)	0.08(0.03–0.12)	54(40–70)
Торфогенный ил	14	3.1(2.7–3.4)	0.19(0.08–0.45)	0.06(0.05–0.07)	33(30–40)
Серый ил	107	2.5(15–30)	0.45(0.18–0.77)	0.05(0.01–0.12)	12(10–30)
Бурый ил	20	3.1(2.2–3.7)	0.42(0.10–0.87)	0.05(0.01–0.10)	6(5–10)
Белый ил	5	3.0(1.9–3.2)	0.35(0.10–0.60)	0.02(0.01–0.05)	2(1–5)
Песчанистый ил	120	2.1(0.9–3.0)	0.58(0.27–0.92)	0.08(0.03–0.15)	7(5–10)

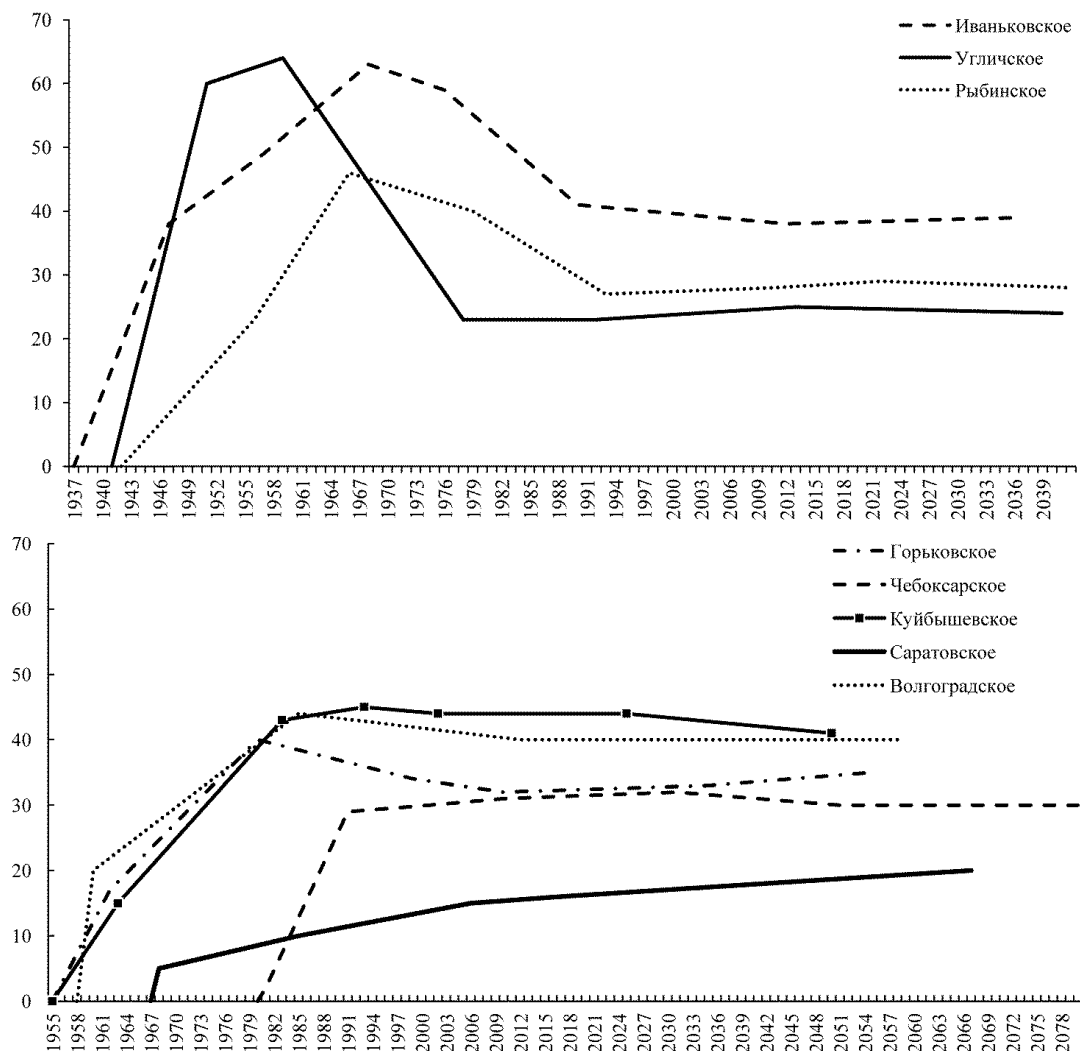
Особенно это четко заметно по коэффициентам сортировки. По мере приближения к гидроузлам ДО с высокой степенью сортировки ( $< 2$ ) сменяются плохо сортированными ( $\geq 2$ ). Это свидетельствует об аккумуляции взвесей без последующей активной пересортировки частиц в озерной части. При переходе от песчаных наносов к илистым в графике распределения фракций наблюдается двувёршинность. Например, в Рыбинском водохранилище плохая сортировка серых и особенно торфогенных и торфянистых илов говорит о слабой гидродинамической активности водных масс на участках их залегания.

Коэффициент асимметрии, в большинстве своем меньше единицы – это означает, что максимальное содержание фракций, состоящих из частиц крупнее медианного диаметра находится в первой половине нарастающего графика, а если во второй, то  $> 1$ .

Средний диаметр частиц, или медиана, колеблется в пределах 0.15–0.01 мм. Большинство илов водохранилищ Волги относится к алевроитовой фракции ( $> 50\%$ ), пелитовая фракция  $< 0.001$  мм находится в пределах 30–40%, а песчаная до 10%.

От съемки к съемке характер распределения тонкодисперсных отложений свидетельствует о том, что интенсивная стадия формирования илов (10–30 лет) сменилась на пассивную. Эти закономерности свойственные равнинным водохранилищам прослеживаются не только в каждом водоеме, но во всех выделенных орографических районах, только с разным масштабом их проявления (рис. 2, 3). Так, наиболее общая картина наблюдается на водохранилищах Верхней Волги и существенные различия для Средней и Нижней. В первых водохранилищах – резкое увеличение площадей, а потом постепенное уменьшение и стабилизация, во вторых – так же увеличение и сохранение максимального уровня распределения в течение длительного времени. Горьковское водохранилище является промежуточным по структуре распределения площадей илистых отложений. Исключение составляет русловое Саратовское водохранилище, в котором наблюдается постепенное увеличение ареалов илов в пространстве и во времени.

Осредненные значения изменения площадей илонакопления, как в целом по всем водохранилищам каскада, так и по отдельным орографическим районам, показали общность их распределения в озерных, мелководных закрытых заливах и приплотинных верхних бьефах (рис. 3). Коэффициент корреляции между ними при  $n_1 = 80$ ,  $n_2 = 190$ ,  $n_3 = 30$ ,  $n_4 = 70$ , соответственно,  $R^2_1 = 0.41$ ,  $R^2_2 = 0.45$ ,  $R^2_3 = 0.38$ ,  $R^2_4 = 0.33$  близки. В приплотинных участках он меньше и связан с усилением гидродинамических процессов при регулировании сбросов воды, обусловленных работой гидроузлов.



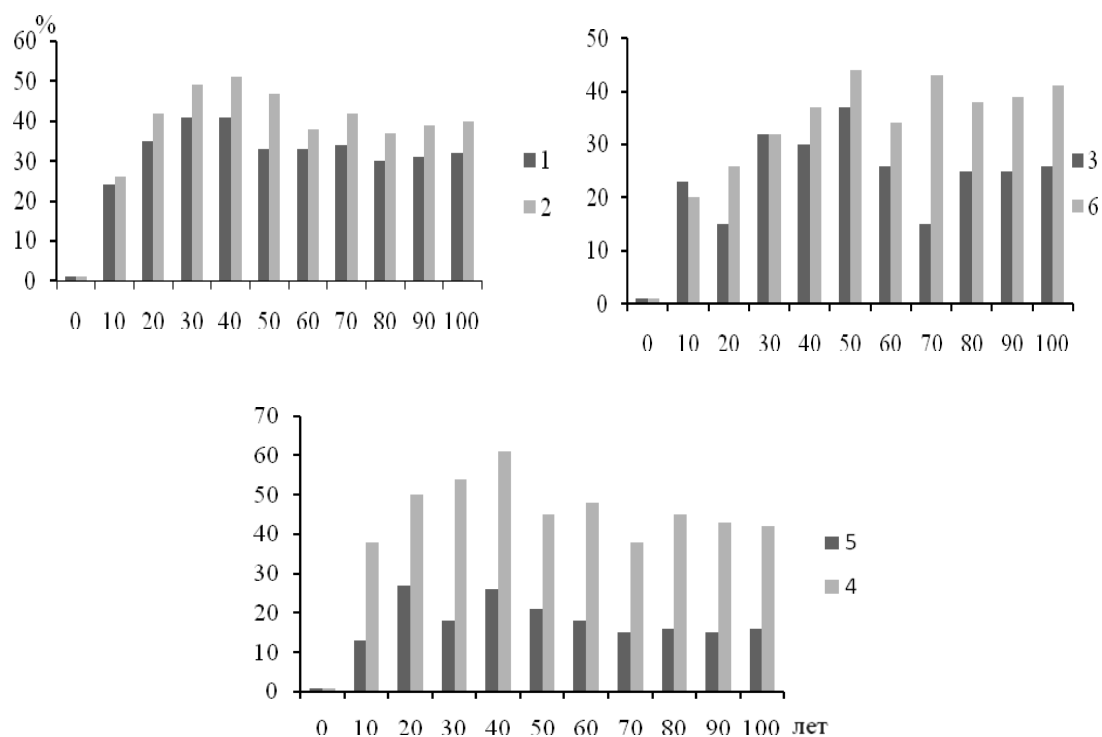
**Рис. 2.** Фактическая и прогнозная (после 2012 г.) трансформация площадей илонакопления в водохранилищах Волги.

Наибольшие различия отмечаются в речных участках и открытых глубоководных заливах, где динамика изменения площадей илов зависит от морфометрических характеристик и величин твердого стока, поступающего с основной рекой Волгой через плотины и многочисленные крупные реки с дельтами. Коэффициенты корреляции для них равны:  $R^2_5 = 0.16$ ,  $R^2_6 = 0.79$  ( $n_5 = 90$ ,  $n_6 = 40$  соответственно).

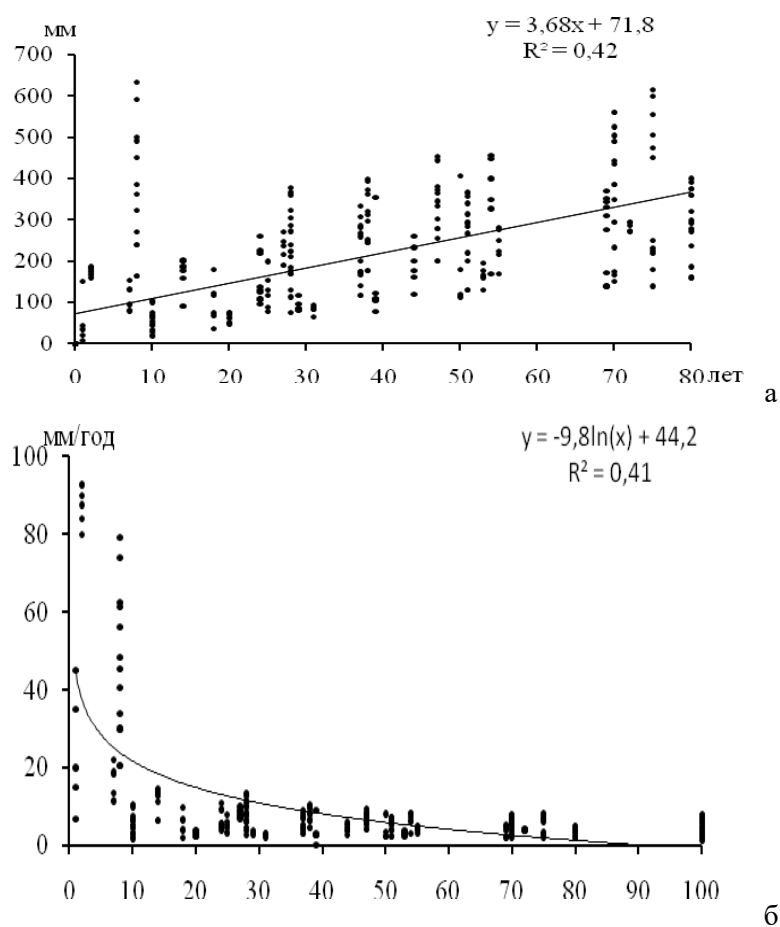
Закономерности трансформации площадей грунтов и ДО в целом по каскаду и определенным участкам описаны в работе (Законнов и др., 2010). Так, после завершения стадии активизации абразивно-эрозионных процессов и повышенных темпов седиментации наступает стабилизация, когда площади песчаных и глинистых илов не меняются, или происходит их слабая флуктуация в результате воздействия многолетних и сезонных природных и антропогенных факторов.

Зависимость увеличения площадей распределения илов в пространственно-временном аспекте не выражена и это вполне естественно, т.к. их ареалы формируются уже в первые годы существования водохранилищ и менее подвержены изменениям.

Мониторинговые материалы по осадконакоплению водохранилищ Волжского каскада, включающие прямые определения толщины кернов, позволили выявить тесные корреляционные связи толщины слоев ила и скоростями их седиментации во времени (рис. 4).



**Рис. 3.** Динамика и прогноз площадей илистых отложений в системе водохранилищ Волги. 1 – в целом по водохранилищам, 2 – озерные районы, 3 – мелководные заливы, 4 – приплотинные районы, 5 – речные районы, 6 – глубоководные заливы.



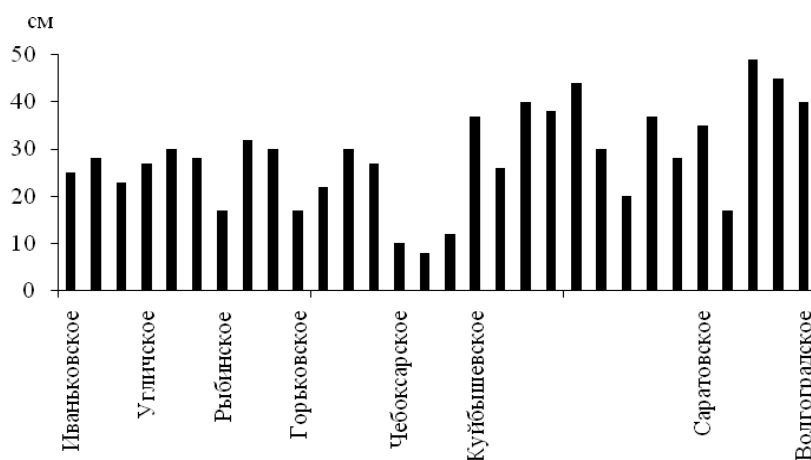
**Рис. 4.** Зависимость средней толщины илистых отложений (а) и интенсивности илонакопления (б) от продолжительности существования водохранилищ ( $n = 360$ ).

Это подтверждает накопительную функцию водоемов замедленного водообмена и стадийность формирования ложа и его структуры. Темпы илонакопления со временем уменьшаются.

Согласно балансам взвешенных веществ, основным источником поступления наносов является береговая абразия и эрозия ложа от 57% в Угличском до 87% в Рыбинском и Куйбышевском. Всего на дне водоемов накапливается от 62 до 96% осадков. Из них примерно 10–50% тонкодисперсных взвесей, поступающих с речным стоком и продукцией гидробионтов, формируя органо-минеральный состав илов. Сброс через гидросооружения находится в пределах от 4–5% в Рыбинском и Куйбышевском, до 40% в Чебоксарском и Саратовском.

По результатам последних грунтовых съемок толщина слоя илов постепенно увеличивается от водохранилищ Верхней Волги к Средней и Нижней (рис. 5). В первую очередь это связано с увеличением мелкодисперсных частиц в береговых откосах сложенных глинистой брекчией (бурый ил), известковисто-доломитовыми, глинисто-мергелистыми породами (белый ил), а также хвалынской глиной и лессовидными суглинками, которые становятся преобладающими в бассейнах рек в зоне перехода от степной к полупустынной местности.

Чебоксарское, как самое молодое водохранилище в каскаде, является исключением из этого правила. Благодаря высокому коэффициенту водообмена ( $K_v = 19.8$ ) и значительным скоростям сточковых течений, условия илообразования в нем минимальные. Повышение уровня НПУ до 65 и 68 м БС (Балтийской системы) приведет к уменьшению проточности, и толщина илистых отложений может сравняться с Горьковским. Таким образом, из транзитного водоема оно превратится в накопитель взвесей и загрязняющих веществ, поступающих по Волге и Оке из Центрального промышленного района, а также по рекам Ветлуге и Суре, где зафиксированы максимальные показатели твердого стока (70–150 мг/л). Пока приемником (ловушкой) тонкодисперсных взвесей и загрязняющих веществ является речной и последующие орографические районы Куйбышевского водохранилища. Саратовское, как и Чебоксарское имеют повышенный коэффициент водообмена ( $K_v = 18.2$ ). Тем не менее, длительный период эксплуатации и большая протяженность (340 км) способствуют накоплению илов в приплотинной 100 км акватории, где повышается глубина и ширина водоема, что приводит к резкому снижению гидродинамических процессов и созданию благоприятных условий для седиментации.



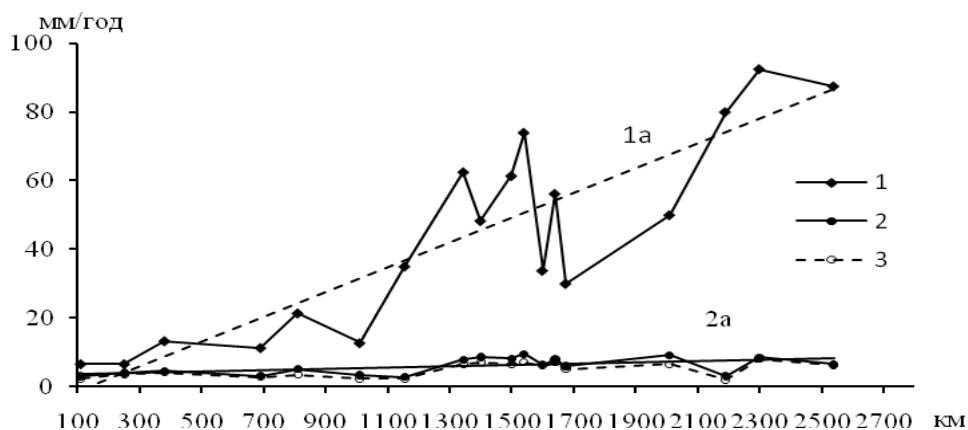
**Рис. 5.** Средняя толщина илов в системе водохранилищ Волги по результатам последних грунтовых съемок (2002–2012 гг.).

Волгоградское является классическим в системе крупных равнинных водохранилищ, когда в речных (русловых) верхних участках наблюдается уменьшение толщины и объема илов, затем повышение в средних районах, а далее пониженные темпы илонакопления в приплотинных – верхних бьефах гидроузлов. Орографические районы Волгоградского водохранилища (I–1 и I–2) находятся под воздействием работы Волжского гидроузла, обеспечивающего регулирование стока для р. Ахтубы и Нижней Волги. Поэтому значительная часть взвесей (до 30%) сбрасывается в нижний бьеф, и далее поддерживая и формируя дельту Волги.

Открытые глубоководные заливы на Горьковском (I–4), Куйбышевском (III) и Волгоградском (II–3) перехватывают часть твердого стока притоков и уменьшают толщину слоя илов по затопленному руслу Волги.

Максимальная толщина илов, зарегистрированная в Ивановском водохранилище, составляет 120 см, Угличском – 85, Рыбинском – 300, Горьковском – 96, Чебоксарском – 110, Куйбышевском – 120, Саратовском – 65, Волгоградском – 85 см.

Сводка показателей илонакопления подтверждает, что среднегодовая потеря полного объема чаши водохранилищ за счет отложения илов невелика и не представляет каких-либо препятствий для эксплуатации равнинных водохранилищ в продолжение нескольких тысяч лет. Незначительна по сравнению со средней глубиной водохранилищ средняя толщина слоя илов. Однако с точки зрения влияния на гидрологические и гидрохимические процессы более важным показателем является интенсивность илонакопления и ее изменения в пространстве и во времени, описываемые уравнением гиперболического типа (рис. 46). Кроме того, вновь поступающие порции осадочного материала могут привести к уплотнению нижележащих слоев, что отмечено для прудов и малых водохранилищ (Прыткова, 1981). В крупных водохранилищах это также имеет место (Новиков, 1985). На основании материалов по водохранилищам Волги, этот процесс происходит в кернах, толщиной более 1 м, сложенных однородным материалом. При наличии различных осадкообразующих источников и их изменяющейся интенсивности во временном ряду картина смазывается. Однако с явлением уплотнения илов необходимо считаться, так как оно приводит к уменьшению скорости илонакопления в многолетнем аспекте. При средней толщине илистых отложений до 50 см, уплотнением слоев можно пренебречь. Географическая зональность илонакопления, как и осадконакопления, также имеет место в системе водохранилищ Волги (Законнов, Законнова, 2007). На рис. 6 она характеризуется трендами, как по результатам первых грунтовых съемок, когда отмечалась максимальная интенсивность илонакопления (лавинная седиментация), так и по итогам последних и прогнозных.



**Рис. 6.** Географическая зональность илонакопления. 1 – первая съемка (1a – линия тренда,  $y = 0.036x - 4.79$ ,  $R^2 = 0.77$ ), 2 – последняя съемка (2a – линия тренда,  $y = 0.019x + 3.45$ ,  $R^2 = 0.30$ ), 3 – прогноз.

Интенсивность илонакопления в каскаде подчинена географической зональности по целому ряду показателей, описанных ранее. Однако главными факторами являются изменение природно-климатических зон водосборных бассейнов в меридиональном направлении и повышение концентраций взвеси из основных источников (абразия берегов и эрозия ложа, сток взвешенных наносов по основной реке и боковых притоков), обусловленные увеличением периода открытой воды (особенно в осенне-зимнее время), продолжительностью скорости ветра  $> 15$  м/с усиливающих гидродинамические процессы, литологией осадочных пород и количеством пыльных бурь (эоловые осадки).

Характер пространственно-временного распределения и накопления тонкодисперсных отложений свидетельствует о том, что интенсивная стадия формирования ложа сменилась на пассивную.

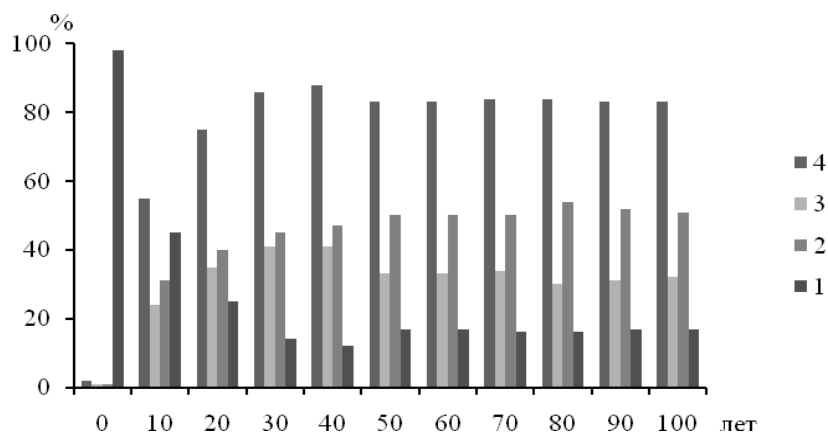
### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Водохранилища, в отличие от древних озерных систем, находятся под влиянием изменяющихся естественных и антропогенных факторов, поэтому период стабилизации распределения и накопления различных типов грунтового комплекса наступит не скоро. Гидродинамические процессы и морфометрические особенности приводят к большой пестроте распределения грунтов и донных отложений и определяют направленность путей их формирования.

Наибольшее разнообразие илов наблюдается в литоральной части водохранилищ (до 4 м изобаты – зоны распространения водной растительности) вследствие изменчивости гидродинамических процессов, связанных с изрезанностью берегов, наличием заостровных пространств и их зарастаемо-

стью. В сублиторали (до 10 м изобаты) накапливаются промежуточные – песчанистые илы, формирующиеся под действием стоковых и ветровых течений – это зона трансседиментации. Профундаль с глубинами более 10 м занята тонкодисперсными илами. Здесь происходит безвозвратное илонакопление.

Материалы грунтовых съемок показали резкое сокращение площадей, занятых почвами, переход их в категорию трансформированных грунтов и новообразованных почв – заболачивающихся и болотно-луговых, а также увеличению ареалов крупнозернистых наносов – песков (рис. 7). Обособленно выделились зоны накопления тонкодисперсных отложений – илов, в основном приуроченные к затопленным руслам рек, озеровидным расширениям, пойменным террасам и приплотинным участкам – верхним бьефам.



**Рис. 7.** Распределение площадей основных типов грунтов и ДО в водохранилищах Волги. 1 – трансформированные грунты, 2 – крупнозернистые наносы, 3 – тонкодисперсные отложения, 4 – вторичные осадки.

Полученные количественные характеристики илообразования по результатам мониторинговых гидрологических съемок водохранилищ Волги ( $n = 80$ ) наглядно демонстрируют, что процессы осадконакопления – образование вторичных осадков ( $R^2_4 = 0.64$ ) в большей степени зависят от накопления крупнозернистых наносов ( $R^2_2 = 0.77$ ) и в меньшей степени от тонкодисперсных ( $R^2_3 = 0.41$ ). Формирование и распределение трансформированных грунтов имеет зеркальное отображение к величинам осадконакопления со знаком минус ( $R^2_1 = -0.64$ ). Отрицательное значение доказывает тот факт, что водохранилища постепенно теряют часть акватории за счет отчуждения водной поверхности косами, пересыпями, валами в пределах существующих отметок НПУ. Отчуждение идет двумя путями, в результате вдоль берегового переноса песчаных наносов и за счет формирования отложений из отмерших макрофитов в защищенных от волнения мелководных заливах и заостровных пространствах или одновременно с участием обоих процессов. Так по нашим оценкам, потери акватории составили: Ивановское водохранилище – 40 км<sup>2</sup>, Угличское – 23 км<sup>2</sup>, Рыбинское – 70 км<sup>2</sup>, Горьковское – 25 км<sup>2</sup>, Куйбышевское – 30 км<sup>2</sup>. По Саратовскому и Волгоградскому водохранилищу материалы отсутствуют, но ориентировочно составляют 20–30 км<sup>2</sup>.

Исследованиями установлено, что в каждом отдельно взятом водохранилище и их орографических районах происходит увеличение толщины слоя осадков, но среднегодовое накопление уменьшается и выравнивается с хорошо выраженным линейным трендом от северных водохранилищ бассейна Волги к южным.

Увеличение сроков эксплуатации водохранилищ привело к дифференциации темпов осадкообразования. Наиболее четко она проявляется в изменении интенсивности осадконакопления – суммарного процесса осаждения крупнозернистых наносов и тонкодисперсных отложений и менее четко по другим видам седиментации – занесению (к общей площади акватории) и заилению (к площади накопления илов). Последние в большей степени зависят от азональных факторов, связанных с особенностями режима эксплуатации (уровнями наполнения) и проточностью.

Изменения в распределении площадей и темпов седиментации в каждом равнинном водохранилище будут индивидуально. Но общие закономерности сохраняются, только с разным масштабом их проявления. Поэтому полученные результаты могут быть использованы на других крупных равнинных водохранилищах, где мониторинг за состоянием рельефа и структуры дна отсутствует или имеет прерывистый ряд наблюдений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 160 с. Butorin N.V., Ziminova N.A., Kurdin V.P. Donnye otlozheniia verkhnevolzhskikh vodokhranilishch. L.: Nauka, 1975. 160 S. [Butorin N.V., Ziminova N.A., Kurdin V.P. Bottom Sediments in the Upper Volga Reservoirs. L.: Nauka, 1975. 160 p.]. In Russian.
- Виноградова Н.Н., Эдельштейн К.К. К характеристике взвесей и грунтов Горьковского водохранилища // Комплексное исследование водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1971. Вып.1. С. 112–121. Vinogradova N.N., Edelshtein K.K. K kharakteristike vzvesei i gruntov Gor'kovskogo vodokhranilishcha // Kompleksnoe issledovanie vodokhranilishch. M.: Izd-vo MGU, 1971. Vyp. 1. S. 112–121. [Vinogradova N.N., Edelshtein K.K. To the Characteristic of Suspended Particles and Grounds in the Gorky Reservoir // Complex Studies of Reservoirs. M.: MSU Publishing House, 1971. Is.1. P. 112–121]. In Russian.
- Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 159 с. Gordeev V.V. Rechnoi stok v okean i cherty ego geokhimii. M.: Nauka, 1983. 159 s. [Gordeev V.V. River Runoff to the Ocean and Features of its Geochemistry. M.: Nauka, 1983. 159 p.]. In Russian.
- Денисова А.И., Нахшина Е.П., Паламарчук И.К. Роль донных отложений в процессах самоочищения и самозагрязнения водоемов // Самоочищение, биопродуктивность и охрана водоемов и водотоков Украины. Киев: Наук. думка, 1975. С. 86–88. Denisova A.I., Nakhshina E.P., Palamarchuk I.K. Rol' donnykh otlozhenii v protsessakh samoochishcheniia i samozagriznenniia vodoemov // Samoochishchenie, bioproduktivnost' i okhrana vodoemov i vodotokov Ukrainy. Kiev: Nauk. dumka, 1975. S. 86–88. [Denisova A.I., Nakhshina E.P., Palamarchuk I.K. The Role of Bottom Sediments in Self-purification and Self-pollution Processes in Waterbodies // Self-purification, Bioproductivity and Protection of Waterbodies and Water Courses of Ukraine. Kiev: Nauk. dumka, 1975. P. 86–88.] In Russian.
- Законнов В.В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: ИГРАН, 2007. 39 с. Zakonnov V.V. Osadkoobrazovanie v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada. Avtoref. dis. ... dokt. geogr. nauk. M.: IGRAN, 2007. 39 s. [Zakonnov V.V. Sediment Formation in Reservoirs of the Volga Cascade. Extended Abstract of Dr. Sci. (Geogr.) Dissertation. M.: Inst. Geogr. RAS, 2007. 39 p.]. In Russian.
- Законнов В.В., Законнова А.В. Географическая зональность осадкообразования в системе волжских водохранилищ // Изв. РАН. Сер. геогр. 2008. № 2. С. 105–111. Zakonnov V.V., Zakonnova A.V. Geograficheskaiia zonalnost' osadkoobrazovaniia v sisteme volzhskikh vodokhranilishch // Izv. RAN. Ser. Geogr. 2008. № 2. S. 105–111. [Zakonnov V.V., Zakonnova A.V. Geographical Zonality of Sediment Formation in the System of the Volga Reservoirs // Izv. RAS. Ser. geogr. 2008. No. 2. P. 105–111.] In Russian.
- Законнов В.В., Поддубный С.А., Законнова А.В., Касьянова В.В. Осадкообразование в зонах переменного подпора водохранилищ Волжского каскада // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 4. С. 425–433. Zakonnov V.V., Poddubnyi S.A., Zakonnova A.V., Kas'yanova V.V. Osadkoobrazovanie v zonakh peremennogo podpora vodokhranilishch Volzhskogo kaskada // Vod. resursy. 2010. T. 37. № 4. S. 425–433. [Zakonnov V.V., Poddubnyi S.A., Zakonnova A.V., Kasyanova V.V. Sedimentation in the zones under the alternating-time of the Volga cascade reservoirs // Vodn. Resur. 2010. V. 37. No. 4. P. 425–433.] In Russian.
- Новиков Б.И. Донные отложения днепровских водохранилищ. Киев: Наук. думка, 1985. 169 с. Novikov B.I. Donnye otlozheniia dneprovskikh vodokhranilishch. Kiev: Nauk. Dumka, 1985. 169 s. [Novikov B.I. Bottom Sediments in the Dnieper Reservoirs. Kiev: Nauk. Dumka, 1985. 169 p.]. In Russian.
- Прыткова М.Я. Осадконакопление в малых водохранилищах. Л.: Наука, 1981. 151 с. Prytkova M.Ya. Osadkoobrazovanie v malykh vodokhranilishchakh. L.: Nauka, 1981. 151 s. [Prytkova M.Ya. Sediment Accumulation in Small Reservoirs. L.: Nauka, 1981. 151 p.]. In Russian.
- Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 306 с. Chedotarev A.I. Hidrologicheskii slovar'. L.: Gidrometeoizdat, 1970. 306 s. [Chebotarev A.I. Hydrological Dictionary. L.: Gydrometeoizdat, 1970. 306 p.]. In Russian.
- Шамов Г.И. Заиление водохранилищ. М.-Л.: Гидрометеиздат, 1939. 378 с. Shamov G.I. Zailenie vodokhranilishch. M.-L.: Gidrometeoizdat, 1939. 378 s. [Shamov G.I. Siltation in Reservoirs. M.-L.: Gydrometeoizdat, 1939. 378 p.]. In Russian.
- Широков В.М. Формирование подводного рельефа Куйбышевского водохранилища. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Казань, КГУ, 1964. 19 с. Shirokov V.M. Formirovanie podvodnogo rel'efa Kuibyshevskogo vodokhranilishcha. Avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. Kazan', KGU, 1964. 19 s. [Shirokov V.M. Formation of Underwater Relief in the Kuibyshev Reservoir. Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation. Kazan: KSU, 1964. 19 p.]. In Russian.

## SILT ACCUMULATION IN THE SYSTEM OF THE VOLGA CASCADE RESERVOIRS

**V. V. Zakonnov**

*I.D. Papanin Institute for biology of inland waters Russian Academy of Sciences, 152742 Borok, Russia  
e-mail: zak@ibiw.yaroslavl.ru*

Based on long-term archival materials of the IBIW RAS the patterns of silt formation in the reservoirs of the Volga cascade including orographic regions corresponding to large and medium floodplain reservoirs of tech-



nogenous origin which differ in morphostructural, hydrometric parameters, hydrodynamic processes and geologo-geomorphological structure of the floor and shores have been analyzed. The patterns of distribution and accumulation of silty sediments as the main hydroecological characteristics of functioning of freshwater ecosystems have been determined. The forecasts of spatial and temporal distribution and accumulation of silts have been made for the centenary of the construction of each reservoir and distinguished regions. The work can be used by hydrologists-sedimentologists, hydrobiologists and geochemists to determine the conditions of silt formation, productivity and toxicity of the lower layer of reservoirs' ecosystems.

*Keyword:* reservoirs of the Volga cascade, orographic regions, silt formation, silt accumulation, situational-forecast.

## ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКОСИСТЕМЫ УГЛИЧСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

**М. В. Гапеева, В. В. Законнов**

*Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН*

*152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: gmv@ibiw.yaroslavl.ru*

Определены концентрации общих растворенных форм Al, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Pb в воде, общих водорастворимых форм в донных осадках Угличского водохранилища. Показано, что концентрации Al, Ni, Cu, Zn, Fe, Mn в воде локально превышают ПДК для водоемов рыбохозяйственного использования, а Cu, Fe и Mn – санитарно-гигиенические нормативы. Концентрации общих растворенных форм всех металлов в донных отложениях превышают ПДК для грунтов пресноводных водоемов. Содержание водорастворимых форм металлов в процентах по сравнению с их общими формами составляет максимально для Cu – 0.6%, минимально для Pb – 0.02%. Повышенные процентные соотношения легкоподвижных (водорастворимых) форм металлов наблюдаются в устьях рек и вблизи крупных населенных пунктов. Во всех средах отмечены высокие корреляции металлов с содержанием Fe и Mn.

*Ключевые слова:* водохранилище, тяжелые металлы, вода, донные отложения, масспектрометрия.

### ВВЕДЕНИЕ

Угличское водохранилище – техногенный водоем, появившийся на р. Волге вблизи г. Углич во время постройки Угличской ГЭС в 1940 г. Оно занимает часть территории Ярославской (Угличский р-н), но в основном Тверской областей (Кимрский, Кашинский, Калязинский р-ны). Водоем является водохранилищем руслового типа протяженностью 145 км по судовому ходу, шириной до 5 км и глубиной 5.4 м (максимальной 21.1 м при НПУ). Образуя акваторию, площадью 249 м<sup>2</sup>, оно затопило низкие участки поймы р. Волги. Глубины до 5 м составляют 36% от его площади. Режим течений не постоянен и зависит от работы Ивановского и Угличского гидроузлов. Коэффициент водообмена – 9.0 год<sup>-1</sup>. Колебания уровня воды при сезонных регулировках стока достигают 7 м. В навигационный период они близки к НПУ и не превышают 113.0 м БС (Балтийской системы) (Буторин, 1969). В балансе взвешенных веществ размыв берегов и эрозия ложа составляют 59%, сток органоминеральных речных взвешенных и влекомых наносов около 38%, продукция гидробионтов – 3%. В расходной части осадконакопление составляет около 60%, а сброс через гидросооружение – 40%. За все время существования водохранилища седиментационный баланс практически не изменился (Законнов, 2007). Площадь водосбора Угличского водохранилища 60 тыс. км<sup>2</sup>, из которых леса занимают 42%, болота 11%, озера 2%, сельскохозяйственные угодья и селитебные территории более 30%, заброшенные земли 10–15% (Экологический атлас, 2015). Водосбор расположен в лесной зоне с умеренно-континентальным климатом. Почвенный покров представлен дерново-подзолистыми почвами и их разновидностями, в числе которых около четверти – подзолисто-болотные и болотистые гидроморфные почвы с высоким содержанием железа и марганца.

По данным лаборатории гидрологии ИБВВ РАН в среднем многолетнем аспекте сток по р. Волга составляет в водохранилище 8.2 км<sup>3</sup>. Боковая приточность – 3.4 (1.0–6.5) км<sup>3</sup>, а сброс через Угличский гидроузел 11.6 (3.5–22.8) км<sup>3</sup> в год. Поступление загрязняющих веществ с площади водосбора по р. Волга и ее притоков, а также городов Тверь, Конаково, Дубна, Кимры, Белый городок, Кашин, Калязин и других населенных пунктов формируют гидрохимический естественный и антропогенный фон экосистемы Угличского водохранилища. В 2012 г. в створах Угличского водохранилища д. Абрамово (ниже г. Кимры), д. Селище (на границе с Ярославской обл.) и п. Белый Городок вода характеризовалась как “очень загрязненная” (класс и разряд качества – 3б). В створах ниже г. Калязин, устье р. Дубна и г. Дубна (Северная канава) вода характеризовалась как “грязная” (класс и разряд качества – 4а). По сравнению с 2011 г. в 2012 г. в створах устье р. Дубна, д. Абрамово (ниже г. Кимры) и д. Селище качество воды не изменилось. Ухудшение качества воды наблюдается в створах г. Дубна (Северная канава), ниже г. Калязин и п. Белый Городок. К наиболее загрязненным водотокам Ивановского и Угличского водохранилищ относились реки, протекающие по территории Московской области (Лама, Дубна, Сестра и Кунья), вода которых стабилизировалась на уровне разряда “а” 4-го класса качества (“грязная”. Качество воды Угличского водохранилища сохраняется в течение многих лет на уровне 4 класса (“загрязненная”) (Абакумов, 1999).

Цель работы – дать объективную геохимическую оценку экосистемы Угличского водохранилища по содержанию тяжелых металлов в системе вода–донные отложения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования использовали образцы воды и донных отложений (ДО) Угличского водохранилища, отобранные по единой сетке станций в 2012 г. – 140 станций и повторенных в 2013–2014 гг. В основном это были глинистые отложения устьевых участков многочисленных притоков, заливов и вблизи крупных населенных пунктов. Все гидрологические исследования проводили по единым методикам, апробированным на водохранилищах Верхней Волги (Буторин и др., 1975).

Районирование Угличского водохранилища по условиям осадконакопления выполнено в соответствии с общепринятыми требованиями в лимнологии (Законнов, 2007): I – нижний район, озерный – (Угличская ГЭС – д. Панкратово), площадь  $F = 91 \text{ км}^2$ , длина  $L = 45 \text{ км}$ ; II – средний район, озерно-речной (д. Панкратово – д. Новое Селище),  $F = 128 \text{ км}^2$ ,  $L = 55 \text{ км}$ ; III – верхний район, речной (д. Новое Селище – Ивановская ГЭС),  $F = 30 \text{ км}^2$ ,  $L = 45 \text{ км}$ .

Выделенные районы имеют не только морфологические, но и гидродинамические особенности, которые оказывают влияние на режим течений и обуславливают их экологическое состояние.

Пробы воды фильтровали через мембранный фильтр 0.45 мк и подкисляли до 0.1N по азотной кислоте. Для определения водорастворимых форм ТМ в ДО навеску 100 г воздушно-сухого грунта заливали 400 мл отстоянной водопроводной воды, интенсивно перемешивали 2 часа, после чего центрифугировали 10 мин при 4500 об/мин. Грунт для определения общих форм металлов просушивали в течение 2–3-х часов при температуре 105.0°C.

Интервал навесок ДО – 0.3–0.5г. Образцы проб в тefлоновых автоклавах подвергали мокрому озолению с использованием 3 мл 65% азотной кислоты (Merck ос.ч) и 3 мл 30% перекиси водорода (ос.ч.) в микроволновой печи SpeedWave MWS-3+ согласно рекомендуемой программе: экспозиция 45 минут, при температуре 140°C. Затем пробы фильтровали через беззольные фильтры с белой лентой. Полученные растворы разбавляли водой, очищенной в установке Distillacid до 15 мл. Этот метод переводит в раствор почти все элементы, которые могут стать “экологически приемлемыми”. В результате элементы, связанные в структуре силикатов, обычно не растворяются.

Концентрации Al, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Pb определяли на приборе ICP MS DRC-е с использованием внешней калибровки и внутреннего стандарта In.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Уровни содержания общих растворенных форм металлов в воде Угличского водохранилища, за исключением Cu, Mn и Fe не превышают санитарно-гигиенические нормы в водоемах России. Рыбохозяйственные ПДК металлов в воде превышены для Al, Mn, Fe, Ni, Cu (Перечень..., 1999), однако следует иметь ввиду, что рыбохозяйственные ПДК даются для ионных форм металлов, пересчитанных из соответствующих солей, которые составляют лишь доли от их общих форм.

Большинство рассматриваемых металлов достоверно связаны с железом и марганцем, что указывает на их основную форму миграции, а именно, адсорбцию на гидроксидах железа и марганца (табл. 1, 2).

**Таблица 1.** Статистические характеристики концентраций металлов в воде Угличского водохранилища, мкг/л

Металл	ПДКр/х	ПДКс-г	Среднее	Медиана	Максимум	Асимметрия	Экссесс
Al	40	200	17.42	11.59	79.31	3.11	10.25
Cr	7	50	3.73	4.85	5.20	-1.41	0.03
Mn	10	100	12.73	9.40	59.03	3.27	11.22
Fe	50	300	344.77	155.19	2591.67	3.60	12.98
Co	5	100	0.14	0.14	0.17	0.97	-0.21
Ni	10	20	4.02	2.51	16.41	2.64	7.17
Cu	1	100	21.61	13.31	134.27	3.56	12.76
Zn	10	10	20.36	11.72	98.41	3.12	10.39
Cd	5	1	0.02	0.01	0.05	1.12	0.78
Ba	100	100	46.00	45.51	51.60	-1.24	3.45
Pb	10	10	0.91	0.44	5.21	3.43	12.06

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции металлов с железом ( $p < 0.05$ ) в воде Угличского водохранилища

Металл	Al	Fe	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Ba	Pb
Fe	0.96	1.00	0.97	0.90	1.00	0.96	0.67	-0.78	0.99
Mn	0.96	0.97	1.00	0.95	0.98	0.98	0.73	-0.76	0.97

Частотные распределения концентраций некоторых элементов (табл. 1) асимметричны и приближаются к логнормальному закону, как например для Cu. Логнормальное распределение относится

к числу типичных распределений микроэлементов в объектах окружающей среды. По данным Н. Nishida, М. Miyai (1984) в донных осадках металлы, происходящие из одного источника, имеют логнормальное распределение.

Предельно-допустимые нормы для водных вытяжек из донных отложений не установлены. Из данных табл. 3 видно, что концентрации металлов в водном экстракте низкие. Статистическое распределение концентраций металлов, так же, как и в воде, асимметрично, как например, для Cu.

**Таблица 3.** Статистические характеристики концентраций металлов в водной вытяжке донных осадков Угличского водохранилища, мкг/г

Металл	Среднее	Медиана	Максимум	Асимметрия	Экссесс
Al	2.065	0.0007	27.41	3.52	12.54
Cr	0.175	0.168	0.38	-0.20	-1.28
Mn	0.148	0.00001	1.59	3.22	10.41
Fe	0.263	0.0005	1.83	2.06	4.46
Co	0.001	0.00001	0.01	4.48	20.32
Ni	0.007	0.00003	0.07	2.98	7.67
Cu	0.023	0.0002	0.08	0.76	-1.18
Zn	0.012	0.001	0.05	1.11	-0.70
Ba	1.881	0.32	7.64	1.14	-0.19

Уровни содержания общих форм исследованных металлов в ДО Угличского водохранилища приведены в табл. 4. Все элементы, кроме Al, достоверно связаны с Fe и Mn (табл. 5).

**Таблица 4.** Статистические характеристики концентраций общих форм металлов в донных осадках Угличского водохранилища, мкг/г

Металл	Среднее	Медиана	Максимум	Асимметрия	Экссесс
Al	2586	3193	8471	0.36	-1.13
Cr	39.2	38.0	68.2	-0.40	-1.18
Mn	549	470	1429	0.66	0.15
Fe	14544	13548	26273	-0.22	-0.85
Co	6.9	7.6	12.3	-0.53	-0.78
Ni	21.2	20.4	38.77	-0.46	-0.43
Cu	15.56	14.02	33.9	1.61	2.25
Zn	66.7	63.0	147.5	1.08	1.72
Cd	0.24	0.25	0.64	-0.74	-0.40
Ba	115.0	109.2	205.5	-0.27	-0.65
Tl	0.12	0.12	0.23	-0.36	-0.81
Pb	9.4	8.3	19.6	0.35	-0.34

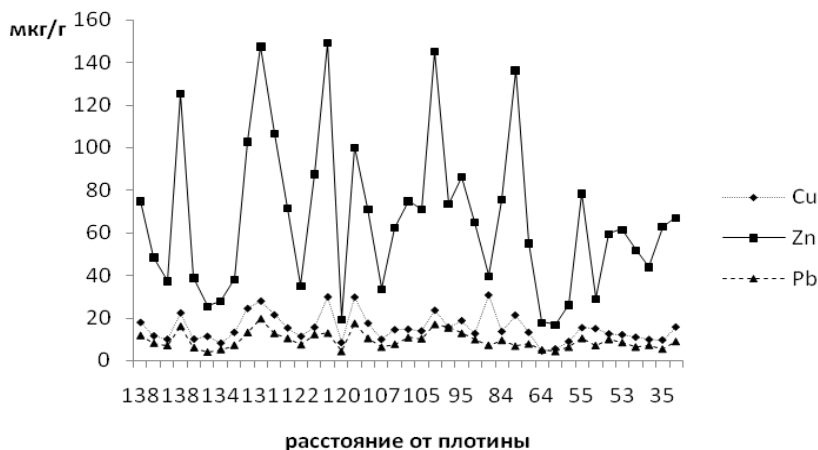
**Таблица 5.** Коэффициенты корреляций общих форм металлов с Fe и Mn ( $p < 0.05$ ) в ДО Угличского водохранилища

Металл	Fe	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Tl	Pb
Fe	1.00	0.88	0.76	0.94	0.89	0.56	0.67	0.62	0.85	0.81
Mn	0.76	0.58	1.00	0.74	0.64	0.31	0.45	0.34	0.54	0.54

В настоящем исследовании, так же, как и раньше, самым загрязненным участком является озерно-речной район II (45–131 км от плотины, рис. 1) (Гапеева и др., 1997).

Характерной особенностью данного участка является то, что все крупные речные притоки Волги – Дубна, Медведица, Нерль, Кашинка, Жабня попадают в этот район. Образующие при этом устьевые зоны формируют баровые отмели, затрудняющие свободный водообмен. Это приводит к увеличению аккумулярующего эффекта – интенсивному накоплению влекомых и взвешенных наносов и выпадению на дно сорбированных ими загрязняющих веществ, приносимых реками. Общая направленность процессов миграции металлов сверху вниз (вода–дно) характерна для всех водоемов замедленного водообмена и определяет их общую тенденцию к самоочищению водных масс от поступающих в них соединений тяжелых металлов (Мартынова, 2014). Неорганическая адсорбция является наиболее эффективным способом уменьшения концентрации металлов в речных водах, причем основную роль играют взвешенные вещества. Донные отложения – чрезвычайно сложная сорбционная система, поскольку включает огромное количество минеральных и органических соединений, способных сорбировать ионы и соединения тяжелых металлов, причем часто конкурирующих между собой за связывание металлов (Forstner, 1983). Общая последовательность, в которой располагаются природные сорбенты по их способности аккумулировать тяжелые металлы, такова: гидрат оксида марганца > гуминовые кислоты > гидрат оксида железа III > глинистые минералы (Тарновский,

1980). Следует отметить, что основные классы природных сорбентов изучены не полностью. Наибольшее количество работ посвящено гидратам оксидов железа и марганца, которые из-за высокой сорбционной способности часто называют “сборщиками” микроэлементов. Увеличение концентраций Fe и pH в воде приводит к образованию гидрокарбонатов железа с последующими процессами гидролиза и образованием гидроксидов железа, которые в виде малорастворимых соединений могут сорбироваться в ДО. Из образуемых в пресных природных водах соединений железа наименьшей константой устойчивости обладает комплекс  $[\text{FeH}(\text{CO}_3)]^{2+}$  ( $\lg K_{\text{уст}}=5.00$ , где  $K_{\text{уст}}$  – коэффициент устойчивости) в результате гидролиза образуются малорастворимые гидроксиды железа. Это объясняет увеличение содержания железа в ДО и его снижение в воде. В Угличском водохранилище содержание железа высокое, а так как гидроксиды железа относятся к природным сорбентам тяжелых металлов, то можно предположить, что миграция элементов осуществляется именно за счет этого соединения. Подтверждением служат корреляционные данные, приведенные в табл. 2 и 5.



**Рис. 1.** Распределение общих форм Zn, Cu, Pb в ДО Угличского водохранилища.

К настоящему времени государственные нормативы относительно ПДК металлов в ДО не разработаны, поэтому приходится в качестве критериев оценки загрязнения ДО тяжелыми металлами использовать величины, принятые в других государствах (Persaud, 1990; MacDonald et al., 2000). Однако, как следует из табл. 6 наблюдаются большие различия этих нормативов. При сравнении уровней содержания общих форм металлов в водохранилище с датскими критериями, концентрации Cr, Cu, Ni, Zn соответствуют самому низкому риску загрязнения металлами, Cr и Zn превышают канадские временные значения критерия качества, Cu превышают ПДК, установленные в США. Концентрации Mn по критерию США – PEC, по критерию Онтарио–Severe могут вызвать неблагоприятные биологические эффекты. Концентрации Fe по нормативу Онтарио могут вызывать слабые биологические нарушения.

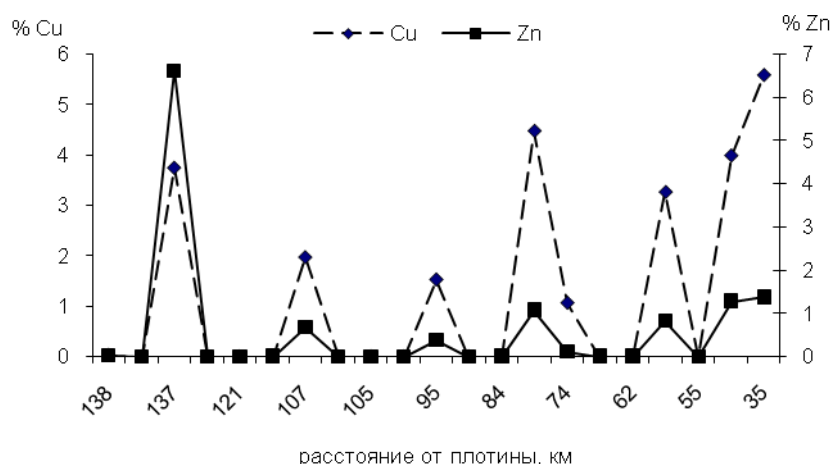
**Таблица 6.** Критерии оценок качества по содержанию металлов в пресноводных ДО, мкг/г

Элемент	США			Онтарио		Дания	ПДК Канада	
	TEC	PEC	NEC	Low	Severe	Target values	LSQG	PEL
Cd	0.592	11.7	41.1	0.6	10	0.8	0.6	3.5
Cr	56	159	312	26	110	100	37.3	90.0
Cu	28	77	54.8	16	110	36	35.7	197
Fe	–	–	–	2(%)	4(%)	85	–	–
Mn	1673	1081	819	460	1100	–	–	–
Ni	39.6	38.5	37.9	16	75	35	–	–
Zn	159	1532	541	120	820	–	123	315
Pb	34.2	396	68.7	31	250	85	35	91.3

Примечание. TEL – Threshold Level Concentration; PEC – Probable Effect Level concentration; NEC – No Observed Effect concentration; Low – Lowest Effect Level; Severe – Severe Effect Level; LSQGL – Interim Sediment Quality Guideline; PEL – Probable Effect Level.

Из многочисленных литературных данных известно, что самую достоверную информацию о загрязнении несут легкоподвижные формы металлов, а в результате антропогенного загрязнения повышается содержание именно таких форм. Высокое процентное соотношение легкоподвижных (водорастворимых) по отношению к общим формам металлов наблюдается в устьях рек и вблизи круп-

ных населенных пунктов (рис. 2). Первый пик – Волга, Дубна, второй – Медведица, третий – Нерль, четвертый – Кашинка, пятый – Жабня.



**Рис. 2.** Доля (%) водорастворимых форм тяжелых металлов от их общих форм в ДО Угличского водохранилища.

## ВЫВОДЫ

Угличское водохранилище используется для энергетики, судоходства, рыболовства. Концентрации тяжелых металлов в воде водохранилища локально превышают соответствующие ПДК для водоемов рыбохозяйственного использования. Наиболее загрязнен озерно-речной участок водохранилища. Высокие значения статистических связей металлов с Fe как в воде, так и в донных осадках соответствуют общей направленности процессов миграции металлов вода–донные отложения, характерной для всех водоемов замедленного водообмена. Такой процесс миграции ТМ определяет их общую тенденцию к самоочищению водных масс. Металлы довольно прочно удерживаются сорбентами донных отложений водохранилища, водорастворимые формы металлов составляют лишь 0.02–6% от их общих форм. Асимметричность распределения металлов изменяется в ряду: вода > водная вытяжка > общие формы в ДО. Донные отложения интегрируют металлы из многих источников и статистические распределения их становятся ближе к нормальным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абакумов В.А., Бреховских В.Ф., Обридко С.В. Анализ гидробиологических и гидрохимических показателей качества воды Угличского водохранилища // Водные ресурсы. 1999. Т. 26, № 6. С. 726–730. Abakumov V.A., Brekhovskikh V. F., and Obridko S. V. The Dynamics of Hydrobiological Characteristics of Water Quality in the Uglich Reservoir // Water Resources. 1999. T. 26. № 6. S. 651–654.
- Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 320 с.
- Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. Донные отложения Верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 160 с.
- Гапеева М.В., Законнов В.В., Гапеев А.А. Локализация и распределение тяжелых металлов в донных отложениях водохранилищ Верхней Волги // Водные ресурсы. 1997. Т. 24, № 2. С. 174–180. Gapeeva M.V., Zakonnov V.V., Gapeev A.A. Localization and Distribution of Heavy Metals in Bed-Load Deposits of the Upper Volga // Reservoirs Water Resources. 1997. Vol. 24, № 2. S. 153–159.
- Законнов В.В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада. Автореф. дисс. доктора географических наук. М.: ИГ РАН. 2007. 39 с.
- Мартынова М.В. Железо и марганец в пресноводных отложениях. М., 2014. 213 с.
- Перечень рыбохозяйственных нормативов предельно-допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды, водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: Изд-во ВНИРО, 1999. 304 с.
- Тарновский А.А. Геохимия донных отложений современных озер. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. 172 с.
- Экологический атлас Ярославской области // Environmental Atlas of Yaroslavl region / Департамент охраны окружающей среды природопользования Ярославской области; научный редактор Г.А. Фоменко. Ярославль, 2015. 154 с.
- Forstner U. Sediment oxygen demand chemical substances // Water Res. 1983. Vol. 9, № 17. P. 1081–1093.
- Nishida H., Miyai M. Distribution function of heavy metals in river sediment // Bull. Environ. Toxicol. 1984. V. 32. P. 212–219.

- Persaud D., Jaagumagi R., Hayton A. The provincial sediment quality guidelines. Ontario Ministry of the Environment. 1990.
- MacDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.O. Development and evaluation of consensus – based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2000. V. 39. P. 20–31.

## **THE GEOCHEMICAL CHARACTERISTIC OF THE ECOSYSTEM OF THE UGLICHSKY RESERVOIR**

**M. V. Gapeeva, V. V. Zakonnov**

*I.D. Papanin Institute for biology of inland waters Russian Academy of Sciences, 152742 Borok, Russia  
e-mail: gmv@ibiw.yaroslavl.ru*

Concentration of general dissolved forms Al, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Pb in water, the general water-soluble forms in sediments of the Uglichsky reservoir are defined. It is shown that Al, Ni, Cu, Zn, Fe, Mn concentrations in water locally exceed maximum concentration limit for fish economic reservoirs, and Cu, Fe and Mn - sanitary-and-hygienic specifications. Concentration of the general dissolved forms of all metals in sediments exceed maximum concentration limit for sediments fresh-water reservoirs. Percentage water-soluble forms of metals with their general forms makes as much as possible for Cu – 0.6%, it is minimum for Pb – 0.02%. The raised percentage parities are observed in the mouths rivers and near to large settlements. In all environments high correlations of metals with maintenance Fe and Mn are noted.

*Keywords:* reservoir, heavy metals, water, sediment, ICP MS DRC-e.

## ВЫБОР ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ РЯДОМ НАБЛЮДЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ КОМПОНЕНТОВ ЭКОСИСТЕМЫ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА)

Л. А. Кучай, Е. Н. Соколова

*Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина*

*152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: lak@ibiw.yaroslavl.ru*

В работе анализируется метод моделирования компонентов экосистемы Рыбинского водохранилища, представленных рядами наблюдений, которые рассматриваются, как динамический процесс. Модель – дифференциальное уравнение второго порядка с косинусоидальным членом в правой части. Показано, что моделью биотического компонента экосистемы может быть уравнение с бистабильным субгармоническим режимом поведения.

*Ключевые слова:* водная экосистема, модель, дифференциальное уравнение, фазовый портрет.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о роли внешней среды и эндогенных ритмах остается определяющим во временной динамике компонентов водных экосистем (Максимов, 1989; Домбровский и др., 1980). Режимы годовых колебаний численности и биомассы гидробионтов, возникающие в результате взаимодействия упомянутых факторов, характеризуются циклическими всплесками амплитуды и имеют неустойчивые периоды, непосредственную связь которых с какими-либо очевидными периодическими изменениями среды проследить достаточно трудно. Факт существования незатухающих колебаний означает, в частности, жесткое воздействие на систему извне. Под системой в этом контексте понимается отдельно взятый процесс, представленный рядом наблюдений, моделью которого может быть динамическая система с воздействием, описываемая дифференциальным уравнением второго порядка с косинусоидальным членом в правой части. Эта система обладает двухпериодным решением, одно из которых устойчиво. При малой амплитуде воздействия она сохраняет собственный период колебаний, но увеличение интенсивности воздействия параметров внешней среды приводит к возникновению в ее поведении непериодических колебаний (возникновению стохастического режима). При этом на фазовой плоскости существует область, ограничивающая решение (существует аттрактор), и при стохастическом режиме поведения системы амплитуда колебаний ограничена (Николис, Пригожин, 1990), что характерно и для рядов наблюдения численности и биомассы гидробионтов водной экосистемы. Это свидетельствует о возможности использования такого уравнения в качестве модели годовой динамики биомассы гидробионтов, в частности фито- и зоопланктона.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общий вид уравнения, описывающего систему с воздействием, сведенного к системе двух уравнений, имеет вид (Березовская, 1996):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y \\ \frac{dy}{dt} &= a_0 + a_1x + a_2y - a_3x^3 + a_4xy - a_5x^2y + A\cos(\omega t). \end{aligned}$$

Эта система имеет конечное число типов поведения с переходом от одного к другому при изменении параметров системы, через бифуркации. Причем, если  $a_0=a_3=a_4=A=0$ , то имеем систему, известную под именем Ван-дер-Пола (одна стационарная точка: неустойчивый фокус, предельный цикл) (Паркер, Чжуа, 1987). При  $a_0=a_4=a_5=0$  получается система Дуффинга (три стационарные точки: два устойчивых фокуса, седло, предельный цикл) (Holden, Muhamad, 1982; Паркер, Чжуа, 1987). Если же положим  $a_0=a_1=a_4=0$ , то имеем систему, полученную Ueda и Akamastu (Holden, Muhamad, 1982) (три стационарные точки: два неустойчивых фокуса, седло, предельный цикл). В отличие от системы Дуффинга, последняя система является осциллятором в отсутствии какого-либо воздействия, а сочетания значений  $A$  и  $\omega$ , а также знака величины  $A$ , позволяют наблюдать периодическое, квазипериодическое и хаотическое поведение решения на фазовой плоскости (Holden, Muhamad, 1982). Система, представляющая собой композицию, образованную из уравнений Ван-дер-Пола и Дуффинга ( $a_0=a_4=0$ ), приведена в работе В.В. Суханова (1997).

Идентификация модели системы, представленной рядом наблюдения (временной последовательностью), делает необходимым анализ ее фазового портрета, который позволяет сначала безмодельным способом определить некоторые ключевые особенности системы. Для этого исходная временная по-



следовательность  $X(t)$  разворачивается в ряд последовательностей с возрастающими сдвигами  $\tau$  (идентификация аттрактора по данным наблюдения, Николис, Пригожин, 1990, приложение IV).

Здесь рассматривается двумерное фазовое пространство ( $\tau = 1$ ) и фазовые портреты, построенные по рядам наблюдения биотических компонентов экосистемы Рыбинского водохранилища: фитопланктона (биомасса, мг/л, 1954–1985 гг., данные Л.Г. Корневой); хлорофилла 'а' (концентрация в двухметровом поверхностном слое воды, мкг/л, 1969–2010 гг., данные И.Л. Пыриной); зоопланктона (сырая биомасса, мг/л, 1956–1992 гг., данные В.Н. Столбуновой).

Биотические и абиотические компоненты экосистемы могут обладать различными типами динамики. Тип поведения наблюдаемой величины, проявившийся в фазовом портрете, указывает критерии поиска модели. К сожалению, ряды данных не велики, что не дает возможности объемного исследования. Однако, проявление некоторых неизвестных свойств рассматриваемых компонентов возможно.

В таблице 1, составленной на основе работы Березовской Ф.С. (1996), приведены режимы поведения динамической системы, и соответствующие им, известные по литературе, исследованные и представленные дифференциальными уравнениями системы с идентичным типом поведения.

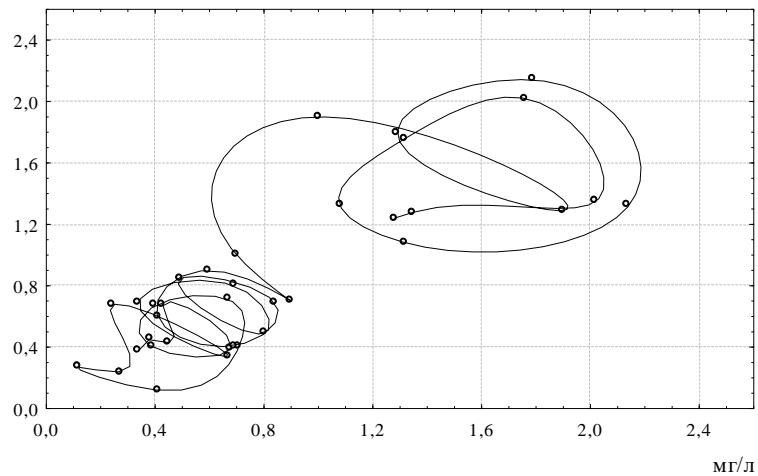
**Таблица 1.** Режимы поведения динамической системы

Режим	Тип устойчивости	Уравнение
Колебательный	1 стационар. точка, неустойчивый фокус, предельный цикл.	$d^2x/dt^2 + (x^2-1) \cdot dx/dt + x = Y \cdot \cos(\omega t)$ (при $Y = 0$ уравнение Ван-дер-Пола)
Бистабильный	3 стационар. точки, 2 неустойчивых фокуса, седло, предельный цикл.	$d^2x/dt^2 - a \cdot (1-x^2)dx/dt + x^3 = Y \cdot \cos(\omega t)$ (уравнение Akamastu-Ueda)
	3 стационар. точки, 2 устойчивых фокуса, седло, предельный цикл	$d^2x/dt^2 + a \cdot dx/dt + b \cdot x + x^3 = Y \cdot \cos(\omega t)$ (уравнение Duffing'a)

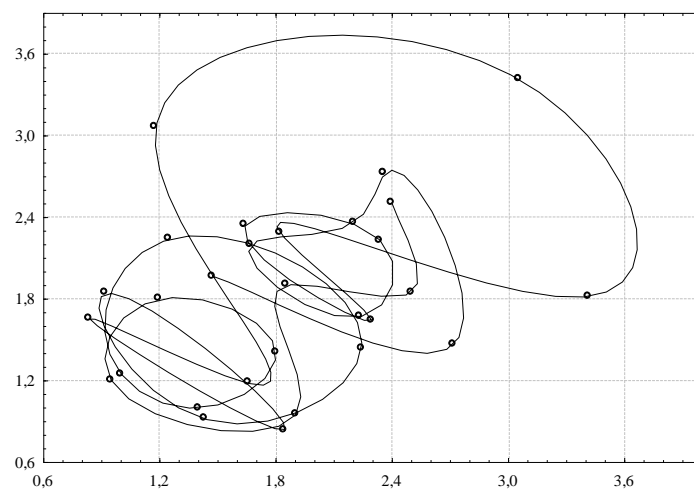
Надо отметить, что приведенные системы обладают фазовыми портретами, расположенными симметрично относительно начала и осей координат, тогда как портреты, построенные по рядам наблюдений, расположены целиком в первом квадранте и симметричны относительно биссектрисы угла, образованного осями координат первого квадранта. Таким образом, для использования названных систем в качестве модели компонентов экосистемы, они должны быть преобразованы с помощью процедуры переноса начала координат и поворота осей на  $-45^\circ$ . Качественное поведение систем при этом не меняется.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

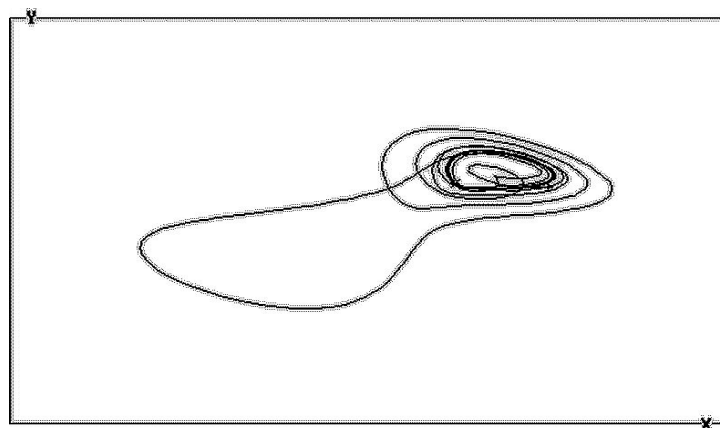
Рассмотрим выбор модели для биотического компонента экосистемы на примере фитопланктона и зоопланктона. В динамике зоопланктона (фазовый портрет, рис. 1) явно выражено наличие периодов повышенных величин биомассы и пониженных со своими центрами, что соответствует двум точкам притяжения траектории, разделяющим фазовое пространство на две области. Единственного периода колебаний в динамике зоопланктона выделить не удастся. В области низких значений выделяются циклы, равные  $\approx 4$  годам. В области высоких значений на фазовом портрете наблюдаются 2 цикла по 6 лет. Точки перехода из одной области фазового пространства в другую, соответствуют годам максимального значения величины солнечной активности в ее 11-летнем цикле (1979–1980 гг.) Отметим, что в динамике зоопланктона и фитопланктона наблюдаются совпадающие области низких значений, а также – одинаковые точки перехода из одной области фазового пространства в другую. Оба компонента обладают бистабильным поведением. Следовательно, наиболее адекватной моделью для них представляется динамическая система, которая обладает тремя стационарными точками, из которых две являются фокусами (точками притяжения), третья – седло, и предельный цикл. Из приведенных выше систем такими свойствами обладают система Uedu-Akamastu и система Дуффинга. Отличие их в том, что фокусы Дуффинга являются устойчивыми, а фокусы Akamastu – неустойчивыми, что делает эту последнюю систему пригодной для анализа динамики биотического компонента, обладающего собственным периодом колебания. С экологической точки зрения переход из области притяжения одной точки в область притяжения другой в системе Дуффинга происходит только под воздействием условий внешней среды, а в отсутствии этого воздействия система попадает в одно из устойчивых состояний и находится там, пока не изменится внешняя среда.



**Рис. 1 а.** Фазовый портрет динамики биомассы зоопланктона (данные наблюдения 1956–1992 гг.).



**Рис. 1 б.** Фазовый портрет динамики биомассы фитопланктона (данные наблюдения 1954–1983 гг.).



**Рис. 2.** Режим поведения динамической системы в отсутствии воздействия.

На рис. 2 приведена модель такого поведения. Таким образом, система Дуффинга может служить моделью динамики фитопланктона.

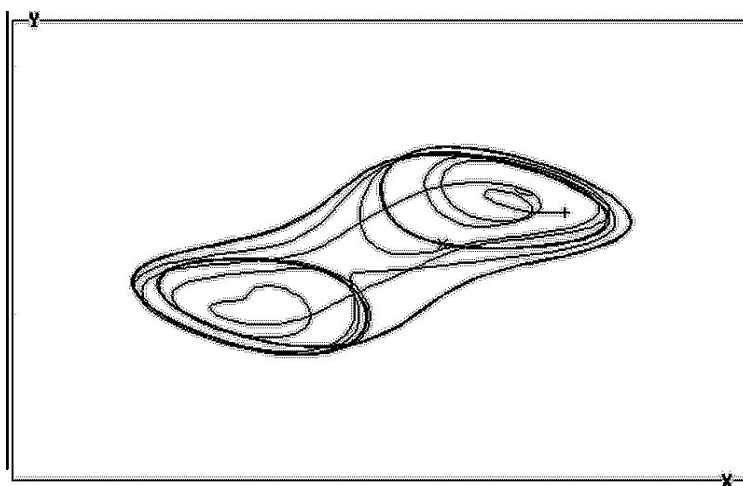
Для динамики зоопланктона также характерна бистабильность, но при наличии собственного периода колебаний траектория может переходить из одной области фазового пространства в другую и без воздействия извне. В таком случае моделью может быть система и с неустойчивыми фокусами, поскольку выход из состояния приближения к одной точке притяжения может быть предусмотрен поведением компонента. Заметим, что оба уравнения содержат демпфирующий член (коэффициент при  $x$ , неравный нулю), с помощью которого возможно ограничение амплитуды в периодической динамике модели компонента

Эксперимент с моделью заключается в анализе ее поведения при изменении параметров системы, а также амплитуды и периода внешнего воздействия. В результате эксперимента с моделью фитопланктона получаем:

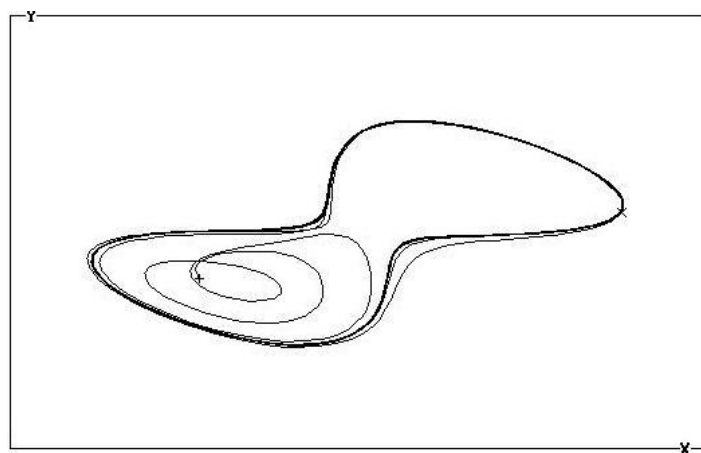
— при малой амплитуде воздействия система стремится к одному из двух устойчивых состояний (в зависимости от начальных условий), и поскольку не обладает собственным периодом колебаний, остается в области притяжения этой устойчивой точки с периодом колебания, равным периоду внешнего воздействия (фазовый портрет такого решения – предельный цикл вокруг устойчивой точки, рис. 2).

— увеличение коэффициента демпфирующего члена в уравнении приводит к субгармоническому поведению в одной области фазового пространства (появление “петелек”, т.е. гармоник в динамике);

— при увеличении же амплитуды воздействия система переходит в другую область фазового пространства и обратно (как и ведет себя реальная система), в рисунке траектории появляются “петельки”; в системе возникает субгармоническое колебание, период которого, может быть *кратен* периоду внешнего воздействия (рис. 3,  $\omega=1.047$ , Твн. возд. =  $2\pi/\omega = 6$  лет, Тсист.  $\approx 19$ , т.е. равен утроенному периоду внешнего воздействия), а может быть “*навязан*” системе (рис. 4,  $\omega = 0.57$ , Твн. возд. = 11 лет, Тсист. = 11 лет).

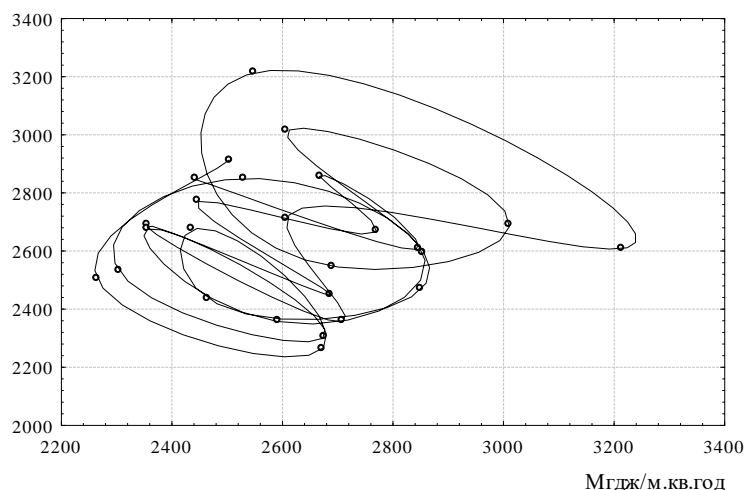


**Рис. 3.** Фазовый портрет динамики биомассы фитопланктона (модель, уравнение Дuffинга,  $\omega = 1.047$ ).

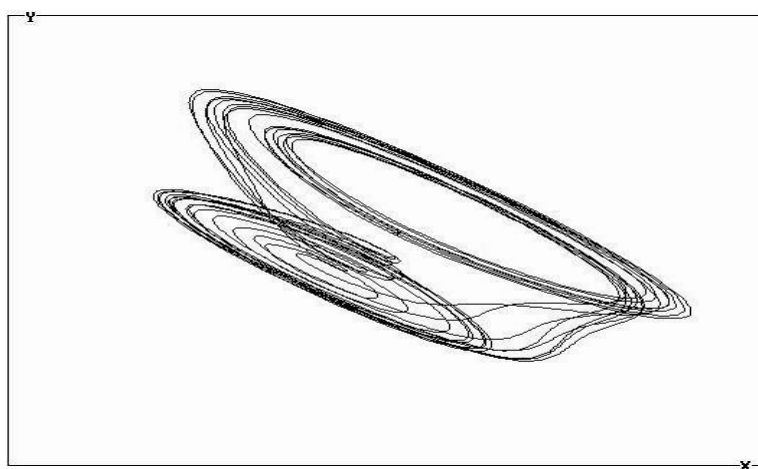


**Рис. 4.** Фазовый портрет динамики биомассы фитопланктона (модель, уравнение Дuffинга,  $\omega = 1.256$ ).

На рис. 5 и 6 приведены фазовые портреты интенсивности суммарной солнечной радиации, поступающей на поверхность водоема, построенные по данным наблюдения и модели. Анализ ритмики солнечной активности и фитопланктона показал следующее: если величина солнечной активности достаточно велика, то фитопланктон располагается в области низких значений; при подъеме активности от минимума к максимуму (4 года) в динамике фитопланктона наблюдается либо цикл периода 4 года, либо возникают гармоники этого цикла – 2 по 2 года; при спаде активности солнца от максимума к минимуму (6–7 лет) наблюдаются 2 цикла по 3 года, либо один – 3 года, другой – 4 года.



**Рис. 5.** Фазовый портрет динамики интенсивности суммарной солнечной радиации (данные наблюдения 1969–1997 гг.).



**Рис. 6.** Фазовый портрет динамики интенсивности солнечной радиации (модель, упрощенная система ДUFFINGA).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассматриваются *качественные* модели динамических систем, которые представлены временными последовательностями, и о полном совпадении количественных данных с результатами экспериментов ожидать не приходится.

Однако, в результате такого анализа становится очевидным, что такой компонент, как фитопланктон всегда будет иметь цикл в своей динамике, “навязанный” ему извне, т.е. неким внешним фактором. Более того, как показали эксперименты, этот цикл может быть кратен циклу внешнего воздействия. Наличие в экспериментах таких ситуаций, как “зацикливание” в одной из областей фазового пространства означает, что возможно существует еще фактор (или ряд факторов), заставляющих систему перейти в другую область.

Что касается использования выбранных уравнений, то, возможно, косинусоидальный член в уравнении должен содержать *амплитуду воздействия не параметром, а функцией*. Работа продолжается.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14–05–00346.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Березовская Ф.С. Стереотипы динамики экологических систем и бифуркации в моделях // Исследования по математической биологии. Пущино: Наука, 1996. С. 49–60. Berezovskaya F.S. Stereotipy dinamiki ekologicheskikh system i bifurkatsii v modelyakh // Issledovaniya po matematicheskoy biologii. Puschino: Nauka, 1996. S. 49–60. [Berezovskaya F.S. Stereotypes of the dynamics of ecological systems and bifurcation in models // Studies in mathematical biology. Pushchino: Nauka, 1996, P. 49–60.] In Russian
- Виленкин Б.Я. Периодические изменения численности популяции животных // Проблемы космической биологии. М.: Мир, 1980. С. 166–186. Vilenkin B. YA. Periodicheskie izmeneniya chislennosti populyatsii zhivotnykh //

- Problemy kosmicheskoy biologii. M.: Mir, 1980. S. 166–186. [Vilenkin B. Ya. Periodic changes in the number of animal population // Problems of space biology. M.: Mir, 1980, P. 166–186.] In Russian
- Домбровский Ю.А., Маркман Г.С. Пространственная и временная упорядоченность в экологических и биохимических системах. Ростов-на-Дону: Ростовский Университет, 1989. 118 с. Dombrovskiy YU.A., Markman G.S. Prostranstvennaya i vremennaya uporyadochennost v ekologicheskikh i biokhimicheskikh sistemakh. Rostov-na-Donu: Rostovskiy Universitet, 1989. 118 s. [Dombrovsky Yu.A., Markman G.S. Spatial and temporal order in ecological and biochemical systems. Rostov-on-Don: Publishing House of Rostov University, 1989, 118 p.] In Russian
- Максимов А.А. Природные циклы. Причины повторяемости экологических процессов. Л.: Наука, 1989. 236 с. Maksimov A.A. Prirodnye tsykly. Prichiny povtoryaemosti ekologicheskikh protsessov. L.: Nauka, 1989. 236 s. [Maksimov A.A. Natural cycles. Causes of ecological processes recurrence. L.: Nauka, 1989, 236 p.] In Russian
- Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Мир, 1990, 342 с. Nikolis G., Prigozhin I. poznanie slozhnogo. M.: Mir, 1990. 342 s. [Nikolis G., Prigozhin I. Exploring complexity. M.: Mir, 1990, 342 p.] In Russian
- Суханов В.В. Резонансы в колебаниях популяционной численности // Ж. Общая биология. 1997. т.58. № 1. С. 5–25. Sukhanov V.V. Rezonansy v kolebaniyakh populyatsionnoy chislennosti // Zh. Obschaya biologiya. 1977. T. 58. № 1. S. 5–25. [Sukhanov V.V. Resonances in fluctuations in population size // Zh. General biology, 1997, vol. 58, No. 1, P. 5–25.] In Russian
- Паркер Т.С., Чжуа Введение в теорию хаотических систем для инженеров // Ж. ТИИЭР. 1987. Т. 75, № 8. С. 6–11. Parker T.S., Chzhua Vvedenie v teoriyu khaoticheskikh system dlya inzhenerov // Zh. TIIEER. 1987. T. 75, № 8. S. 6–11. [Parker T.S., Chua. Introduction to the theory of chaotic systems for engineers // Zh. TIIEER. 1987. Vol. 75, No. 8. P. 6–11.] In Russian
- Holden, Muhamad Forced nonlinear oscillators // Chaos. 1982. P. 28–33.

## SELECTION OF A DYNAMIC MODEL OF THE SYSTEM REPRESENTED BY A SERIES OF OBSERVATIONS (BY THE EXAMPLE OF ECOSYSTEM COMPONENTS OF THE RYBINSK RESERVOIR)

**L. A. Kuchai, E. N. Sokolova**

*I.D. Papanin Institute for biology of inland waters Russian Academy of Sciences, 152742 Borok, Russia  
e-mail: Lak@ibiw.yaroslavl.ru*

This study analyzes a method for modeling the components of the Rybinsk Reservoir ecosystem, represented by a series of observations, which are considered as a dynamic process. The model is a second order differential equation with a cosine term in its right side. It is shown that an equation with a bistable subharmonic behavior can be a model of the ecosystem biotic component.

**Keywords:** aquatic ecosystem, model, differential equation, phase portrait.

## ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЫБИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

**И. Э. Степанова**

*Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН*

*152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: iris@ibiw.yaroslavl.ru*

Прослежена история исследований элементов азота и фосфора в водохранилище в период с 1939–1940 гг. (в реках, впоследствии его образующих) до наших дней. Рассмотрены сезонная и межгодовая динамика, пространственное распределение, соотношение форм биогенных элементов, балансовые модели, взаимосвязь с гидрологическими условиями, время и скорость оборота фосфора, суточные вариации концентраций неорганических форм азота и фосфора, кинетические закономерности всех стадий процесса нитрификации, дана оценка естественной потенциальной нитрификационной способности (ЕПНС) водных масс водохранилища, и состояния водоема при помощи потенциала регенерации по биогенным элементам.

*Ключевые слова:* азот, фосфор, Рыбинское водохранилище.

Определение содержания неорганических соединений азота и фосфора началось еще перед заполнением водохранилища в основных реках, его питающих: в 1939–1940 гг. и первой половине 1941 г. был изучен гидрохимический режим рек Мологи, Шексны, Волги, Чагодоши, Сутки и Сити (Щербаков, 1950). Уровень нитритов, нитратов, фосфатов и аммонийного азота в первых трех реках исследовались ежемесячно (табл. 1). Пробы воды из р. Молога брались в следующих точках: у г. Молога, Весьегонск, Устюжна, д. Трезубово (65 км от устья), п. Пестово. На Волге пробы отбирались всегда в одном и том же месте, немного выше впадения левобережного притока, р. Сутки, около с. Коприно, расположенного между мостом железной дороги Ярославль – Бологое и устьем р. Молога. На Шексне пробы всегда брались в устье, в 0.5–1 км от г. Щербаков (Рыбинск).

**Таблица 1.** Уровень биогенных элементов в реках (средние за 1939–1940 гг.)

Месяц	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
<b>р. Волга</b>				
февраль	0.003	0.68	0.15	0.12
март	0.010	0.04	-	0.04
апрель	0.006	0.60	0.10	0.10
май	0.017	1.10	0.11	0.12
июнь	0.003	0.18	0.06	0.10
июль	0.002	0.05	0.06	0.03
август	0.001	0.03	0.05	0.05
сентябрь	0.010	0.04	0.06	0.05
ноябрь	0.001	0.10	0.05	0.04
декабрь	0.004	0.45	0.30	0.13
<b>р. Молога</b>				
У г. Молога				
февраль	0.013	0.35	0.26	0.13
апрель	0.007	0.45	0.10	0.11
май	0.018	1.40	0.15	0.20
июнь	0	0	-	0.17
август	0	0.01	0.04	0.05
декабрь	0.003	0.30	-	0.20
У д. Трезубово				
март	0	0.06	-	0.06
апрель	0.004	0.20	-	0.04
май	0.006	0.37	0.16	0.10
июль	0	0	0.07	0.05
август	0	0.003	0.09	0.05
ноябрь	0.001	0.01	0.07	0.07
У г. Весьегонска				
март	0.002	0.45	0.13	0.15
июль	0	-	-	0.10
сентябрь	0	0	0.08	0.07
У Устюжны				
октябрь	0	0	0.08	0.07

Месяц	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
У п. Пестово				
март	0.007	0.42	0.19	0.19
Р. Шексна				
февраль	0.003	0.37	0.27	0.09
март	0.006	0.40	0.16	0.10
май	0.005	0.20	0.19	0.14
июль	0.003	0.02	0.09	0.06
август	0.001	0.01	0.05	0.07
декабрь	0.002	0.30	0.10	0.14
Р. Сутка				
февраль	-	0.08	0.44	0.08
май	0.006	0.23	0.14	0.15
июль	0	0	0.04	0.11
декабрь	0.007	0.60	-	0.13
Р. Сить				
июль	0	0	0.06	0.04
август	0	0	0.06	0.03
Р. Чагодоша				
октябрь	0	0	0.30	0.09

Уровень неорганических форм азота и фосфора в реках, впоследствии формирующих водохранилище, был довольно высокий. Концентрация нитритов и нитратов в реках Волга и Молога достигала максимума в период весеннего половодья (0.022 и 1.4 мг N/л соответственно). Минимум содержания всех форм азота приходился на период вегетации, причем нитриты и нитраты исчезали полностью, а аммонийный азот и фосфаты оставались в небольшом количестве.

В 1943 г. ежемесячно проводились наблюдения за уровнем биогенных элементов по поперечному разрезу через Волжский плес по линии Борок – с. Коприно (Кудрявцев, 1950). Наблюдения велись на следующих участках: 1) бывшая правобережная пойма, 2) бывшее русло Волги, 3) залитые луга левобережной поймы, 4) залитое низинное болото. Начиная с конца 1944 г. исследования проводились и в Красном ручье – в узком заливе отрога. С 1946 г. также иногда наблюдения проводились в южной части отрога у с. Сменцево, в р. Сутка у деревень Плесо, Поздеевка, Золотково и Плишкино, а также в рр. Шуморовка и Ильдь. Несколько раз пробы отбирались в р. Молога и ее притоках (Сити и Чеснаве) в районе с. Брейтово. В связи с большим поднятием уровня воды в водохранилище и затоплением новых участков суши пункты наблюдений были дополнены еще одним, вновь залитым пунктом – болотом Хохотка, примыкающим непосредственно к Красному ручью. Содержание аммонийного азота в эти годы в Волжском плесе колебалось от 0 до 2.39 мг N/л. Нулевые значения были отмечены летом 1946 г. в правобережной пойме, в поверхностных слоях на русле, и на залитых лугах. В среднем за исследуемые годы сезонные изменения уровня аммонийного азота на всех исследуемых участках плеса не были выражены (табл. 2).

**Таблица 2.** Содержание аммонийного азота в Волжском плесе (среднее за 1943–1946 гг.)

Месяцы	Правобережная пойма	Русло		Залитые луга	Залитое болото
		Поверхностные	Придонные		
январь	0.26	0.25	0.20	0.23	0.25
февраль	0.20	0.19	0.16	0.12	0.33
март	0.31	0.27	0.30	0.22	0.36
апрель	0.27	0.23	0.21	0.26	0.24
май	0.14	0.20	0.18	0.24	0.24
июнь	0.23	0.19	0.25	0.22	0.18
июль	0.26	0.18	0.43	0.17	0.31
август	0.28	0.25	0.31	0.21	0.21
сентябрь	0.21	0.21	0.23	0.18	0.21
октябрь	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
ноябрь	0.20	0.15	0.14	0.13	0.10
декабрь	0.30	0.27	0.28	0.25	0.33

Уровень нитратов снижался в летний период, однако, не до нулевых значений (табл. 3). Наибольшие концентрации фосфатов были отмечены в период половодья в поверхностных и придонных слоях вод русла и на залитых лугах (табл. 4).

Впервые содержание общего азота (мг N/л) в водоеме было определено в русловой части Волжского плеса в 1944–1945 гг. (Кудрявцев, 1950) (табл. 5).

**Таблица 3.** Содержание нитратов в Волжском плесе (средние за 1943–1946 гг.)

Месяцы	Правобережная пойма	Русло		Залитые луга	Залитое болото
		Поверхностные	Придонные		
январь	0.29	0.26	0.29	0.28	0.25
февраль	0.24	0.26	0.27	0.30	0.27
март	0.27	0.28	0.26	0.27	0.39
апрель	0.47	0.37	0.34	0.42	0.14
май	0.17	0.11	0.13	0.21	0.17
июнь	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
июль	0.08	0.07	0.12	0.05	0.09
август	0.09	0.08	0.07	0.09	0.07
сентябрь	0.32	0.31	0.30	0.33	0.32
октябрь	0.14	0.14	0.13	0.11	0.13
ноябрь	0.16	0.14	0.15	0.15	0.13
декабрь	0.20	0.19	0.14	0.17	0.15

**Таблица 4.** Содержание фосфатов (в мг P/л) в Волжском плесе (средние за 1943–1946 гг.)

Месяцы	Правобережная пойма	Русло		Залитые луга	Залитое болото
		Поверхностные	Придонные		
январь	0.048	0.041	0.040	0.037	0.032
февраль	0.021	0.023	0.031	0.047	0.025
март	0.027	0.030	0.027	0.022	0.011
апрель	-	0.065	0.065	-	-
май	0.026	0.054	0.044	0.053	0.044
июнь	0.030	0.030	0.030	0.028	0.031
июль	0.020	0.025	0.024	0.025	0.023
август	0.027	0.034	0.043	0.036	0.032
сентябрь	0.046	0.052	0.047	0.050	0.047
октябрь	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
ноябрь	0.036	0.029	0.029	0.029	0.027
декабрь	0.014	0.014	0.013	0.014	0.011

**Таблица 5.** Содержание общего азота (мг N/л) в русловой части Волжского плеса

1944 г								1945 г	
июнь		июль		сентябрь		октябрь		март	
дно	пов.	дно	пов.	дно	пов.	дно	пов.	дно	пов.
1.06	1.07	1.47	1.47	0.48	0.49	0.80	0.84	0.51	0.49

Наибольшее количество общего азота в этот период содержалось в летние месяцы. Придонные и поверхностные пробы не отличались по содержанию общего азота.

В 1946–1947 гг. в Главном плесе водохранилища недалеко от затопленного г. Молога были произведены ежедекадные определения нитратного азота и фосфатов (Воронков, 1951).

Было отмечено, что, несмотря на то, что фотосинтез наиболее активно протекает в поверхностном и слое 1–2 м, и биогенные элементы потребляются в процессе фотосинтеза, вследствие перемешивания водных слоев в водохранилище концентрации элементов азота и фосфора находились примерно одинаковом уровне на всех горизонтах даже в летнее время. Исключение составило 27 июля 1946 г., когда в придонных слоях произошло резкое увеличение содержания фосфатов (табл. 6). Во время вегетационного периода содержание фосфатов и нитратов резко уменьшалось во всей толще воды: содержание нитратов падало до 0 и в целом не превышало 0.06 мг/л. Концентрация фосфатов все-таки оставалась довольно высокой даже в период вегетации водорослей (от 10 до 100 мкг/л). На основании этого было предположено, что в водохранилище первичная продукция в большинстве случаев лимитируется соединениями азота. В вегетационный период происходит постоянное пополнение фосфатов путем регенерации их в процессе разложения органического вещества, который гораздо проще и быстрее восстановления нитратов. Была вычислена суточная скорость потребления фосфатов: в среднем она составила 0.008 мг P/л (табл. 6).

Летний период 1947 г. отличался менее ветреными погодными условиями, чем период 1946 г., поэтому колебание содержания биогенных элементов было не столь резко выражено. В безветренный период



происходит усиленное развитие фитопланктона, запасы элементов азота истощаются фактически полностью во всей толще воды, что впоследствии лимитирует развитие водорослей. Рост фитопланктона поддерживается нитратами и нитритами, поступающими со дна водоема (табл. 7).

**Таблица 6.** Сезонные колебания содержания нитратов и фосфатов в отдельных слоях воды в 1946 г.

Слой воды, м		Июль			август			Сентябрь		октябрь
		7	16	27	7	18	27	11	29	29
0–1	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.061	0.008	0.024	0.007	0.081	0.100	0.100	0.096	0.098
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.04	0	0	0.06	0.04	0.20	0.12	0.10	0.20
1–2	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.075	0.007	0.026	0.008	0.077	0.100	0.100	0.097	0.098
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.04	0	0	0.08	0.04	0.18	0.10	0.12	0.20
2–3	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.066	0.005	0.028	0.010	0.073	0.100	0.100	0.094	0.098
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.04	0	0.01	0.07	0.07	0.020	0.12	0.12	0.19
3–5	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.088	0.005	0.041	0.011	0.074	0.100	0.098	0.094	0.096
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.04	0.01	0.08	0.04	0.06	0.23	0.13	0.12	0.20
5–7	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.091	0.005	0.082	0.012	0.074	0.100	0.094	0.094	0.095
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.04	0.01	0.120	0.07	0.05	0.23	0.10	0.12	0.19

Фосфаты в верхних слоях воды не истощаются полностью, и колебание их содержания хорошо отображает характер суточной жизнедеятельности фитопланктона. В период максимальной ассимиляционной деятельности фитопланктона (20.30–0.30) содержание фосфатов повышается. В остальное время суток количество их либо уменьшается, либо остается на прежнем уровне, когда потребление их уравнивается поступлением и регенерацией (табл. 8).

В начале 1950-х гг. исследования пространственного и сезонного распределений биогенных элементов было продолжено (Киреева, 1955; Аничкова, 1959). Отмеченное в это время резкое уменьшение количества фосфатов в трех (кроме Волжского) плесах водохранилища (до 1–6 мкг/Р л, табл. 9) в период вегетации свидетельствует о его переходе из разряда водоемов, лимитированных по азоту, в водоемы, в которых фотосинтез лимитирован по фосфору. Это обстоятельство может служить свидетельством окончания распада органического вещества затопленной растительности и стабилизации состояния водоема. Напротив, содержание фосфора в воде Волжского плеса было максимальным, а амплитуда колебаний его концентрации – минимальной, указывая на возможное загрязнение речных вод бытовыми и промышленными стоками городов, расположенных на берегах р. Волга.

Содержание аммонийной формы азота изменялось в течение года от 0.05 до 0.57 мг/л. Наиболее высоким оно было в Моложском и Шекснинском плесах, что, вероятно, определяется болотным питанием притоков (табл. 11). В весенних водах Волжского и Центрального плесов вследствие прошедшей в зимний период нитрификации содержание нитратов достигало своего максимума, а летом и осенью их концентрация варьировала около величины 0.05 мг N/л по всей акватории водохранилища (табл. 10).

В 1965 г. в водохранилище было проведено определение содержания общего фосфора и фосфатов (табл. 12) (Монакова, 1968). Было отмечено, что в марте его количество было примерно одинаковым для всех исследованных станций (кроме Лавровских створов, Волжский плес, где его содержание было в 2.5 раза выше). Процентное содержание органического фосфора в общем варьировало от 19 до 68%. В июле количество органического фосфора (в связи с цветением сине-зеленых водорослей) резко возросло во всех плесах, особенно в центральном (в 4 раза). Доля органического фосфора в общем увеличилась и составила от 42 до 99%. Наиболее богатыми общим фосфором и фосфатами были Шекснинский и Волжский плесы.

При изучении сезонного распределения форм азота и фосфора в 1960-е гг. Трифионовой Н.А. было отмечено, что наибольшие изменения азотсодержащих компонентов в водной массе Волжского плеса происходят в подледный период. Так, содержание аммонийной формы азота за время, прошедшее с февраля до середины апреля (когда идет поступление весенних талых вод) возрастало в 10–15 раз (Трифенова, 1971), чего не отмечалось в первые годы после заполнения водохранилища. Впервые было определено содержание всех форм азота и фосфора: общих, неорганических, органических.

Были выделены некоторые общие закономерности, характерные для всего водоема: максимальные концентрации общего и минимальные минерального азота отмечены в летнее время; основной формой этого элемента являлась органическая, составляющая от 68 до 98% общей (Трифенова, 1969, 1974). Максимальные значения неорганических форм азота и фосфора были характерны для вод Волжского и Шекснинского плесов (табл. 13).

**Таблица 7.** Сезонные колебания содержания нитратов и фосфатов в 1947 г.

Слой воды, м		январь		Апрель		май			июнь			июль		август		сентябрь	
		29	2	16	27	7	16	26	5	16	28	6	11	20	30	9	25
0-1	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.036	0.025	0.108	0.160	0.015	0.011	0.008	0.015	0.019	0.017	0.029	0.028	0.032	0.034	0.032	0.035
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.16	0.23	0.07	0.04	0.04	0	0	0.02	0.01	0.02	0.02	0	0.04	0.05	0.04	0.03
1-2	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.037	0.025	0.106	0.160	0.018	0.014	0.010	0.016	0.021	0.019	0.027	0.020	0.033	0.037	0.036	0.031
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.20	0.23	0.07	0.04	0.03	0	0	0.02	0.02	0.01	0.02	0	0.04	0.04	0.02	0.02
2-3	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.037	0.025	0.103	0.160	0.014	0.014	0.011	0.024	0.021	0.026	0.026	0.010	0.035	0.039	0.038	0.031
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.14	0.23	0.07	0.04	0.03	0	0	0.03	0.02	0.01	0.02	0	0.05	0.05	0.02	0.02
3-5	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.036	0.025	0.111	0.160	0.014	0.014	0.011	0.036	0.024	0.032	0.026	0.013	0.035	0.040	0.043	0.031
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.12	0.23	0.07	0.04	0.04	0.01	0	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.06	0.03	0.03	0.02
5-7	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-	0.025	0.120	0.159	0.012	0.014	0.016	0.041	0.036	0.030	0.028	0.020	0.036	0.041	0.049	0.033
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	0.23	0.07	0.06	0.04	0.02	0.01	0.02	0.04	0.04	0.04	0.01	0.06	0.02	0.04	0.03

**Таблица 8.** Суточные изменения в содержании нитритов, нитратов и фосфатов в районе декадной точки (10–11 августа 1947 г.)

Глубина	12.30			16.30			20.30			0.30			4.30			8.30			12.30		
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
0	0.015	0.01	0	0.008	0	0	0.012	0	0	0.014	0	0	0.021	0.01	0	0.008	0	0	0.020	0	0
0.5	0.032	0	0	0.008	0	0	0.012	0	0	0.021	0	0	0.010	0	0	0.040	0	0	0.017	0	0
1.0	0.030	0	0	0.020	0	0	0.019	0	0	0.021	0	0	0.010	0	0	0.010	0	0	0.012	0	0
2.0	0.010	0.01	0	0.018	0	0	0.022	0	0	0.020	0	0	0.018	0	0	0.09	0	0	0.009	0	0
3.0	0.010	0.01	0	0.039	0	0	0.020	0	0	0.020	0	0	0.019	0	0	0.012	0	0	0.022	0	0
5.0	0.016	0.01	0	0.032	0	0	0.021	0	0	0.021	0	0	0.020	0.01	0	0.021	0	0	0.013	0	0
8.5	0.034	0.02	0	0.037	0.01	0	0.026	0.01	0	0.038	0.1	0	0.036	0.01	0	0.032	0.03	0	0.020	0.01	0

**Таблица 9.** Распределение фосфатов, мг Р/л в 1952–1953 гг. (по: Киреева, 1955)

Месяцы	Шекснинский плес	Моложский плес	Волжский плес	Центральный
Май	0.018	0.020	0.026	0.029
Июнь	0.018	0.008	0.022	0.009
Июль	0.001	0.006	0.012	0.004
Сентябрь	0.018	0.018	0.015	0.002
Октябрь	0.010	0.019	0.016	0.011
Ноябрь	-	-	0.012	0.035
среднее	0.012	0.014	0.018	0.013

**Таблица 10.** Распределение нитратов (мг N/л)

Месяцы	Шекснинский плес	Моложский плес	Волжский плес	Центральный
Май	0.10	0.09	0.17	0.18
Июнь	0.07	0.06	0.04	0.05
Июль	0.04	0.05	0.06	0.06
Сентябрь	0.08	0.10	0.05	0.04
Октябрь	0.04	0.05	0.04	0.05
Ноябрь	-	-	-	-
среднее	0.07	0.07	0.07	0.08

**Таблица 11.** Распределение аммиачного азота, мг N/л

Месяцы	Шекснинский плес		Моложский		Волжский	Центральный
	пов.	Дно	пов.	дно	пов	среднее
Май	0.35	0.05	0.20	0.07	0.20	0.17
Июнь	0.38	0.13	0.07	0.07	0.11	0.14
Июль	0.04	0.06	0.05	0.05	0.06	0.08
Сентябрь	0.48	0.35	0.57	0.18	0.28	0.33
Октябрь	0.31	0.15	0.25	0.13	0.31	0.14
среднее	0.31	0.14	0.23	0.10	0.19	0.17

**Таблица 12.** Содержание общего фосфора и фосфатов в плесах водохранилища в 1965 г, мкг Р/л

	Моложский	Шекснинский	Волжский	Главный	Среднее
общий фосфор					
Зима	0.023	-	0.034	0.034	0.033
Весна	0.045	0.067	0.073	0.034	0.046
Лето	0.031	0.061	0.064	0.029	0.036
Осень	0.032	0.064	0.070	0.044	0.048
среднее	0.033	-	0.060	0.035	0.041
фосфаты					
Зима	0.013	-	0.027	0.019	0.019
Весна	-	0.012	-	-	-
Лето	0.012	0.020	0.031	0.006	0.008
Осень	0.016	0.032	0.049	0.016	0.021
Среднее	0.014	0.021	0.036	0.014	0.016

Трифоновой Н.А (1969) был впервые составлен баланс биогенных элементов в водохранилище (табл. 14, за период с 15 мая по 23 июля 1965 г.). В результате превышения притока над стоком через Рыбинский гидроузел и испарением количество азота увеличилось на 6.5 т. Около 444 т дали атмосферные осадки. Среднее содержание азота в атмосферных осадках – принято за 0.60 мг N/л. Среднее содержание общего азота в дождевой воде – 0.65.

За период с мая по июль содержание азота увеличилось за счет размыва торфяников примерно на 275 т (с учетом того, что торф содержит в среднем 1% азота). Около 900 т поступило из донных отложений. Остальная часть – 7.9 тыс. образовалась, по всей вероятности, в результате фиксации атмосферного азота. Эта величина, составляющая около 45% от общего количества азота, поступившего в водохранилище за исследуемый период, соответствует среднесуточной фиксации азота, равной 0.005 мг N/л. Следовательно, процесс молекулярной азотфиксации является существенным источником пополнения водоема азотом.

Исходя из среднееголетней величины накопления азота в донных отложениях (Трифопова, 1967), вычисленной на основе определения количества донных отложений, накопившихся в водохранилище за время его существования, и содержания азота в них, можно предположить, что за два ме-

сяца наблюдений из водной массы могло перейти в донные отложения около 2.5 тыс т. азота, то есть потеря азота за счет оседания взвесей составила 0.001 мг N/л.

**Таблица 13.** Содержание форм азота и фосфора в 1965 г.

Плес	Робщ	Рмин	Нобщ	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Весна						
Волжский	0.067	0.031	1.60	0.72	0.008	0.46
Моложский	0.035	0.002	0.80	0.003	0.001	0.34
Шекснинский	0.046	0.010	0.83	0.07	0.001	0.21
Главный	0.037	0.005	1.03	0.26	0.002	0.28
Лето						
Волжский	0.072	0.027	1.61	0.26	0.008	0.09
Моложский	0.036	0.007	1.56	0.007	0.002	0.15
Шекснинский	0.052	0.012	1.51	0.009	0.006	0.11
Главный	0.033	0.004	1.45	0.13	0.006	0.07
Осень						
Волжский	0.073	0.044	1.57	0.26	0.005	0.02
Моложский	0.038	0.013	0.90	0.10	0.000	0.19
Шекснинский	0.056	0.021	1.53	0.17	0.002	0.09
Главный	0.047	0.013	1.17	0.17	0.002	0.02
Зима						
Волжский	0.051	0.031	1.69	0.38	0.031	0.56
Моложский	0.033	0.021	0.79	0.08	0.021	0.06
Главный	0.033	0.013	1.13	0.28	0.016	0.19

**Таблица 14.** Элементы баланса азота в Рыбинском водохранилище с 15 мая по 23 июля 1965 г.

Элементы баланса	Объем воды	Общ. азот, тыс. т
Приходные		
Наличие на 15 мая	18.908	19.494
Приток с Волгой	2.482	3.934
Мологой	0.967	1.006
Шексной	1.266	1.367
Малыми реками	2.183	2.622
Поступление с осадками	0.740	0.444
Поступление из донных отложений	-	0.940
Поступление в результате размыва торфяников (27.5 тыс. т)	-	0.275
Всего	25.546	30.082
Расходные		
Сброс через гидроузел	1.887	27.685
Испарение	0.930	0.001
Всего	2.817	2.397
Остаток на 23 июля – по балансу	23.729	27.685
Наличие на 23 июля (рассчитано по объему водохранилища и концентрации в воде)	23.540	35.604
Разность между расчетным и балансовым наличием	-0.189	7.919

В 1968 г. Былинкиной А.А. были изучены время и скорость оборота минерального фосфора в поверхностных водах водохранилища (табл. 15).

**Таблица 15.** Время и скорость оборота минерального фосфора в воде Рыбинского водохранилища (1968 г.)

Место отбора	Исх. t воды	Колеб. t в опыте	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мкг P/л	Время об. час	V об., мкг P/л
16–22 июля					
Коприно	17.0	15.0–21.5	57.0	54.4	1.0
Волково	17.1	15.0–21.6	48.0	62.0	0.8
26 сентября – 1 октября					
Коприно	10.8	12.0–17.5	37.0	3.6	0.3
Волково	11.0	13.0–17.5	11.5	74.2	0.2

В Рыбинском водохранилище время оборота фосфора колебалось от 1.7 до 74.2 часа. Величины же скорости оборота фосфатов изменялись от 0.2 до 13.6 мкг P/л. Полученные данные свидетельствуют о более интенсивных биохимических процессах в мелководной зоне (табл. 16). Осенью происходит снижение интенсивности биохимических процессов и скорость оборота фосфора уменьшает-

ся в несколько раз. Колебание величин времени и скорости оборота фосфатов в водохранилище свидетельствует о динамичности этих процессов на разных участках водоема и в различные сезоны года.

**Таблица 16.** Время и скорость оборота минерального фосфора в воде мелководной зоны Рыбинского водохранилища

Дата отбора	Исх. Т воды	Колеб. t в опыте	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мкг Р/л	Время об., час	V об., мкг Р/л
25 июня	23.5	20.5–23.4	37.0	3.6	10.3
23 августа	19.2	20.0–21.2	23.1	1.7	13.6
12 сентября	11.5	12.8–14.5	46.7	10.4	4.5

В 1970-е гг. Кожарой В.Л. была дана обобщающая характеристика гидрохимического режима Рыбинского водохранилища (Рыбинское водохранилище и его жизнь, 1974; Волга и ее жизнь, 1978). Отмечено, что пространственная и сезонная неоднородность содержания минеральных и органических форм азота и фосфора в водоеме определяется, главным образом, характером питания и особенностью его морфометрии. В Волжском плесе концентрация этих элементов в течение почти всех сезонов года значительно выше, чем в водной массе остальных частей водохранилища, формируемых водами половодья северных рек Молога и Шексна, площадь водосбора которых характеризуется большей залесенностью и заболоченностью почв, меньшей сельскохозяйственной освоенностью. На режим биогенных элементов в водоеме также большое влияние оказывают сточные воды городов, особенно Твери и Череповца (Драчев, 1971, 1976), причем в Волжский плес поступает большое количество промышленных сточных вод с высоким содержанием аммонийного азота.

В конце 1970-х – начале 1980-х гг. подробные исследования пространственного распределения биогенных элементов в водоеме (Разгулин и др., 1982, 1983, 1984) показали, что в Главном плесе содержание неорганических форм азота было довольно высоким даже в период вегетации синезеленых и зеленых водорослей и отмечалась тенденция его снижения от весны к осени (табл. 17). Однако в других плесах четких закономерностей не прослеживалось. Наиболее высокое их содержание в этот период, как и в предыдущий, было характерно для волжских вод. В Шекснинском плесе уровень биогенных элементов был фактически всегда, как в моложском и главном, однако, следует учесть, что была исследована только нижняя часть плеса (станции Любец и Мякса).

**Таблица 17.** Содержание биогенных элементов в 1982 г. (по: Разгулин, 1983 г.)

Плес	Робщ	Рмин	Нобщ	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Весна					
Волжский	0.071	0.030	2.25	1.10	0.15
Моложский	0.050	0.030	1.00	0.17	0.02
Шекснинский	0.070	0.040	1.00	0.42	0.02
Главный	0.096	0.040	1.60	0.76	0.07
Лето					
Волжский	0.080	0.030	1.14	0.36	0.08
Моложский	0.080	0.020	0.70	0.09	0.04
Шекснинский	0.060	0.030	0.88	0.13	0.06
Главный	0.066	0.016	1.07	0.37	0.07
Осень					
Волжский	0.090	0.070	1.18	0.43	0.07
Моложский	0.054	0.025	0.75	0.07	0.03
Шекснинский	0.070	0.022	0.92	0.16	0.06
Главный	0.068	0.018	1.11	0.24	0.05
Зима					
Волжский	0.071	0.045	2.13	0.85	0.26
Главный	0.065	0.037	1.17	0.49	0.10

В 1980 г. на основании определения содержания азота и фосфора в водохранилище и некоторых реках, его питающих в различные сезоны года, а также данных по водному балансу, составлен баланс общих форм биогенных элементов (Разгулин, 1982) (табл. 18).

Около 80% общего поступления биогенов с речным стоком приходилось на Волгу и Мологу, 6% на Шексну и 14% на малые реки. Изменение запаса вещества в водной массе рассчитывалось отдельно для каждого плеса. Среднее содержание общего азота в атмосферных осадках было 0.75 мг N/л, общего фосфора – 0.04 мг Р/л. Общее поступление азота в водохранилище с дождем и снегом равнялось 1.37 тыс. т., а фосфора – 67 т. Большая часть биогенов поступает в водохранилище со сточными водами г. Череповец.

**Таблица 18.** Баланс общих форм биогенных элементов в 1980 г.

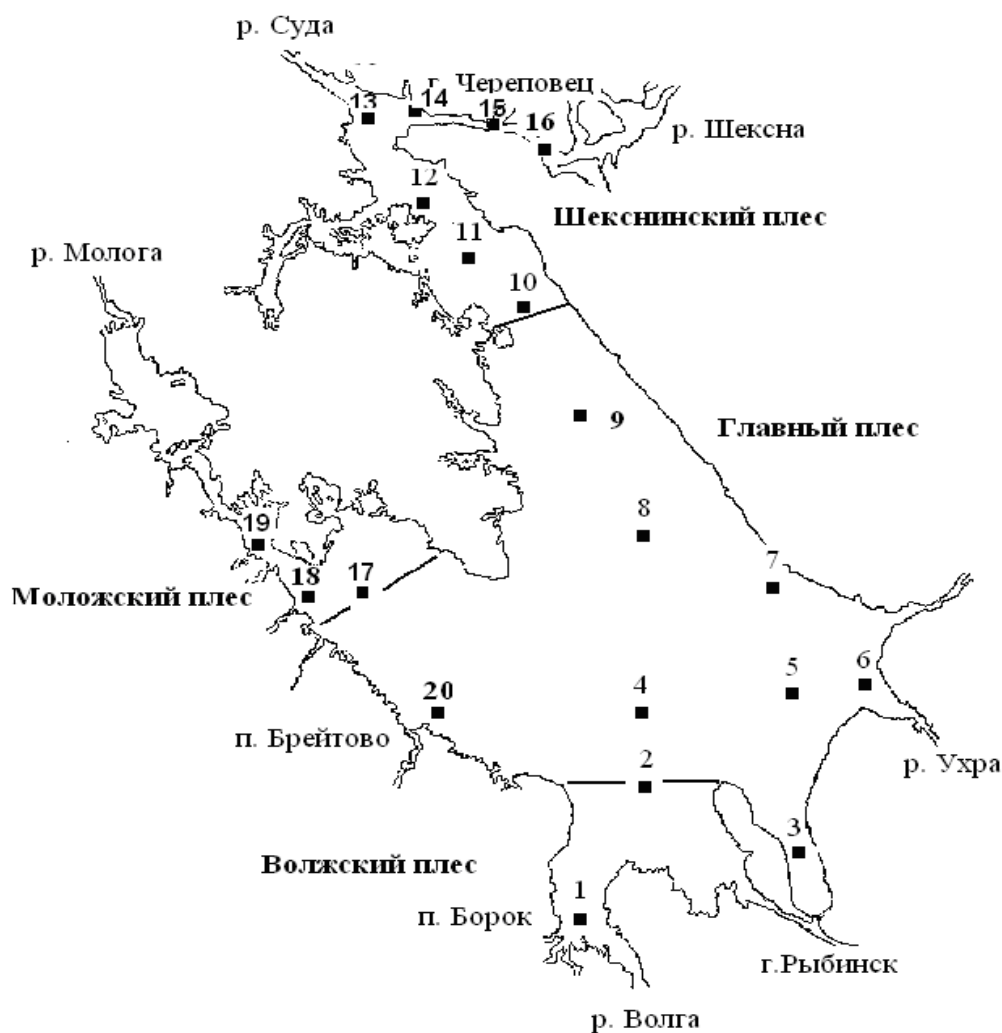
	Общий азот		Общий фосфор	
	тыс.т.	%	тыс. т.	%
Приход				
С речным стоком	35.36	73	1881	38.4
С атмосферными осадками	1.41	0.5	67	1.3
Со сточными водами	4.00	8	163	3.3
Из донных отложений	6.00	13	494	10.0
Размыв берегов и дна	1.96	4	2288	45
С грунтовыми водами	-	-	-	-
При таянии льда	-	-	-	-
Всего	48.73	100	4893	100
Расход				
Сброс через Рыбинский гидроузел	26.03	53.8	1089	23.8
Аккумуляция в водной массе	6.07	12.7	197	4.3
Аккумуляция в грунтах	16.30	33.7	3300	71.9
Фильтрация в ложе водохранилища	-	-	-	-
При образовании льда	-	-	-	-
Всего	48.4	100	4586	100
Невязка	0.33	0	307	6.2

В среднем, общее поступление минеральных форм биогенных элементов в Рыбинское водохранилище со сточными водами Череповца составляет 4000 т азота и 163 т фосфора. Грунты водохранилища выделяют в год около 6000 т азота, в основном, в аммонийной форме (Трифорова, 1967). Интенсивность выделения минерального фосфора иловыми отложениями составляет 0.5–0.8 мг Р/сутки (Трифорова, Былинкина, 1977). Площадь, занятая илами, была равна 58% всей площади дна водохранилища (Законнов, 1981), следовательно, за год грунтами водоема выделяется около 494 т фосфора. В результате размыва берегов и ложа водохранилища в год поступает 3269 тыс. т. взвешенного вещества. Содержание общего фосфора и азота в осадочных породах равно 0.06 и 0.07%. Рассчитанное количество азота и фосфора, поступающего в водоем при размыве берегов и дна, составляет соответственно 1960 и 2288 т в год. По данным количественной оценки основных составляющих прихода и расхода химических веществ составлен ориентировочный баланс биогенных элементов в 1980 г. Средние многолетние величины накопления азота и фосфора грунтах водохранилища составили 16.3 тыс. т и 3.3 т соответственно.

Следовательно, в балансе азота более 70% общего поступления приходится на речной сток, тогда как фосфора всего 36%. Значительный вклад дают выделения биогенных элементов из донных отложений – 13% для азота и 9.4 для фосфора. Оценка поступления минеральных форм биогенных элементов со сточными водами Череповца показывает, что сброс этих элементов превышает биогенный сток р. Шексна в два раза по азоту и в 1.5 раза по фосфору и что Череповецкий промузел является мощнейшим источником поступления биогенов в водохранилище. При среднегодовой площади водохранилища 3405.7 км<sup>2</sup> азотная нагрузка составила 14.3 г м<sup>-2</sup>год<sup>-1</sup>, для фосфора – 1.4 г м<sup>-2</sup>год<sup>-1</sup>. Биогеноудерживающая способность грунтов Рыбинского водохранилища, равная процентному отношению годовой величины аккумуляции элемента в донных отложениях к общему его приходу, составляет 33% для азота, и 67% для фосфора (такой высокий процент связан с замедленным водообменом). Балансовые расчеты показали, что накопления ионов в водоеме не происходит.

При сравнении концентраций минеральных и общих форм азота и фосфора в 1965 и 1989 гг. (Былинкина, 1993) можно отметить, что они сохранились на прежнем уровне в Главном плесе водохранилища. Однако в Шекснинском плесе в районе г. Череповец содержание биогенов было высоким. На глубоководных станциях Волжского плеса летом 1989 г., в отличие от 1965 г., получены более низкие концентрации общего азота и более высокие (в среднем на 20%) общего фосфора. Уровень нитритного и нитратного азота был одинаков. В последующее десятилетие сведения о содержании биогенов в водохранилище были отрывочными.

В конце прошлого века и начале нынешнего изучение биогенных элементов в водах водохранилища было продолжено Бикбулатовым Э.С., Бикбулатовой Е.М., Степановой И.Э. Содержание азота и фосфора исследовалось на всей акватории водохранилища в 2006–2010 гг., в остальные исследованные годы наблюдения проводились только на 6 стандартных станциях – Коприно и Молога (Волжский плес), Наволок, Измайлово, Средний Двор, Брейтово (Центральный плес) (рис. 1).



**Рис. 1.** Карта-схема расположения станций наблюдения на Рыбинском водохранилище. 1 – ст. Коприно, 2 – ст. Молога, 3 – ст. Волково, 4 – ст. Наволок, 5 – ст. Всехсвятское, 6 – ст. Ухра, 7 – ст. Измайлово, 8 – ст. Средний двор, 9 – ст. Гаютино, 10 – ст. Мякса, 11 – ст. Любец, 12 – ст. Ваганиха, 13 – ст. Устье Суды, 14 – Устье Кошты, 15 – ст. Ягорба, 16 – ст. Кабачино, 17 – ст. Первомайские острова, 18 – Устье Себлы, 19 – ст. Противье, 20 – ст. Брейтово.

Ими разработана методология и метод определения азот и фосфорсодержащих соединений природных вод, способных принимать активное участие в формировании первичной продукции и на этой новой основе количественной оценке важнейшей характеристики любого водоема – его степени трофии (Бикбулатов, 2002). Для корректной оценки трофического состояния водоемов по фосфору было рекомендовано использовать величину  $P = (P_{\text{мин}} + RPP)$ , где  $P_{\text{мин}}$  – концентрация ортофосфатов, а  $RPP$  – потенциал регенерации, представляющий собой часть фосфора, заключенную в лабильной фракции органического вещества (табл. 19). Результаты, полученные с применением этого показателя, согласуются с оценками трофического статуса Рыбинского водохранилища по ряду биологических критериев, тогда как часто применяемое для указанных целей  $P_{\text{общ}}$  выводит водные массы за естественные для этого водоема пределы мезотрофии и придает им эвтрофный статус, а использование только  $P_{\text{мин}}$  ставит их в один ряд с олиготрофными водами. Также был вычислен потенциал регенерации по азоту –  $RPN$  (табл. 20).

На основании материалов, полученных в 2001–2011 гг. на станциях по всей акватории водоема проведен анализ различных соотношений форм биогенных элементов в Рыбинском водохранилище и по ним дана оценка его экологического состояния (Степанова, 2013, 2015) (табл. 21).

Наиболее информативным является отношение концентрации общего азота (TN) к общему фосфору (TP), среднее значение которого по всем станциям за исследуемый период составило 17.0, что в целом свидетельствует об отсутствии лимитирования развития фитопланктона в водоеме обоими элементами в настоящее время. Высокие значения абсолютной концентрации нитратного азота и его доли в сумме минерального азота (являющиеся немаловажными показателями нарастания эвтрофикации), а также процентного содержания неорганического фосфора в Волжском и верхней части

Шекснинского плеса позволяют оценить их состояние как эвтрофное. Максимальные количества неорганических форм биогенов содержались в исследуемый период в Шекснинском плесе водохранилища во все изученные годы (Степанова, 2013) (табл. 22).

**Таблица 19.** Результаты трансформации фосфорсодержащих компонентов, мкг Р/л (числитель и знаменатель – в июле и октябре, в скобках – в январе)

Станция	Исходное содержание			После 30 сут			
	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{P}_{\text{орг}}$	$\text{P}_{\text{общ}}$	$\text{PO}_4^{3-}$	RPP	RPP, %	RPP/ $\text{PO}_4^{3-}$ , %
Коприно	25	32	57	34	9	28	27
	89	10	99	88	0	0	0
Молога	11	33	44	21	10	30	48
	32	32	64	32	0	0	0
Наволоч	7	17	24	12	5	29	42
	20	45	65	20	0	0	0
Измайлово	7	13	20	12	5	39	42
	18	45	63	18	0	0	0
Средний Двор	12	12	24	17	5	42	29
	20	49	69	23	3	6	13
Брейтово	11	21	32	24	13	62	54
	22	25	47	22	0	0	0

**Таблица 20.** Результаты трансформации азотсодержащих компонентов воды Рыбинского водохранилища, мкг N/л и регенерационный потенциал по азоту – RPN

Станция	Исходное содержание				После 30 сут			
	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_{\text{орг}}$	$\text{N}_{\text{общ}}$	$\text{NO}_3^-$	RPN	RPN*	RPN/ $\text{NO}_3^*$
Коприно	70	37	673	780	216	109	16	50
Молога	62	53	605	720	248	133	22	54
Наволоч	35	100	565	700	224	89	16	40
Измайлово	35	90	485	610	164	39	8	24
Средний Двор	30	58	552	640	175	87	16	50
Брейтово	30	62	648	740	230	138	21	60

Примечание: \* – RPN в % от исходного содержания  $\text{N}_{\text{орг}}$ .

**Таблица 22.** Содержание биогенных элементов в Рыбинском водохранилище в 2007–2008 гг.

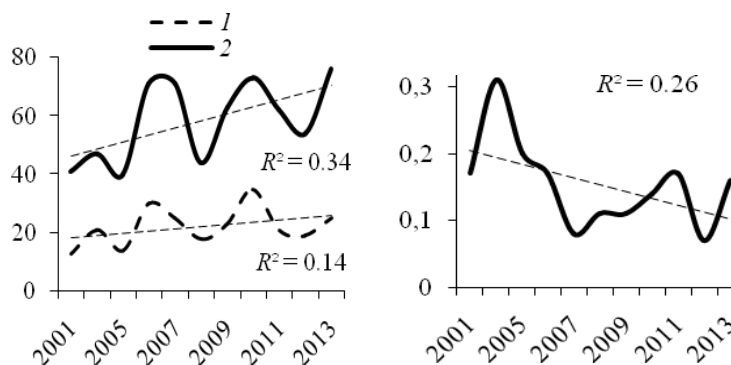
Плес	$\text{P}_{\text{общ}}$	$\text{P}_{\text{мин}}$	$\text{N}_{\text{общ}}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_2^-$
			лето		
Волжский	0.086	0.034	1.16	0.12	0.006
Моложский	0.063	0.034	1.00	0.033	0
Шекснинский	0.150	0.072	1.66	0.170	0.014
Главный	0.050	0.016	0.93	0.07	0.002
			осень		
Волжский	0.11	0.048	1.77	0.11	0.001
Моложский	0.065	0.026	1.22	0.009	0
Шекснинский	0.24	0.11	2.05	0.16	0.004
Главный	0.073	0.032	1.11	0.016	0.001

По данным 2001–2012 гг. изучена взаимосвязь гидрологических характеристик с уровнем биогенных элементов в водохранилище (Литвинов, Степанова, 2015). При изучении попарных корреляций по 6-ти стандартным станциям в период открытой воды не было обнаружено высоких коэффициентов корреляции среднемесячных концентраций всех форм азота и фосфора со среднемесячной температурой воды в поверхностном слое. Однако, построенные по среднемесячным данным графики зависимости биогенных элементов от температуры продемонстрировали некоторые тенденции в распределении исследуемых параметров. Следовательно, сезонные изменения температуры воды существенно влияют на распределение различных форм биогенных элементов. В летний период концентрация неорганических соединений азота и фосфора достигает своего годового минимума. Для начала лета при повышении температуры характерно постепенное снижение концентрации минеральных форм азота (особенно нитратов) при сохранении содержания органического азота,  $\text{N}_{\text{орг}}$  составляет более пятидесяти процентов от общего. В середине и конце лета в связи с большим прогревом водных масс и интенсификацией развития фитопланктона этот процент увеличивается и достигает 70–95%. Концентрации нитритов падают до аналитического нуля. Осенью, при понижении температуры, с началом массового отмирания первичных продуцентов, начинается деструкция лабильной органи-



ческой составляющей клеточного материала и в окружающую среду начинают поступать конечные продукты распада в виде неорганических форм биогенов. В первую очередь происходит аммонификация и в воде обнаруживаются повышенные количества ионов аммония. Одновременно деструкции подвергаются и фосфорсодержащие органические продукты с выделением в воду фосфатов. Выделившиеся ионы аммония и фосфаты повторно не вовлекаются в фотосинтез. Восстановленные соединения азота подвергаются дальнейшей трансформации. В конце сентября – начале октября на всех станциях начинает повышаться концентрация нитратов. Процессы нитрификации, начинающиеся осенью при низких температурах, продолжаются весь подледный период; при температурах, близких к нулевой, аммоний переходит в наиболее окисленную форму азота – нитраты. Весной их концентрация достигает своего максимума. В это же время наблюдается и наибольшее содержание фосфатов.

При изучении межгодовой динамики уровня биогенных элементов в период потепления выявлено (Степанова, 2013), что отличительной особенностью являются межгодовые различия в сезонном распределении концентраций нитратов, которые заключаются в сроках наблюдения минимальных концентраций нитратов и в степени их потребления фитопланктоном за вегетационный период: минимальные уровни во все годы наблюдались в августе месяце, за исключением 2013 г. (в сентябре) и 2010 г. (самого теплого за период наблюдений), когда уровень нитратов снизился до минимума уже в июле и держался на этом уровне и в сентябре. Минимальное снижение уровня нитратов было в многоводном 2004 г., в 3.5 раза, а максимальное – в 2013 г., когда их концентрация уменьшилась в 50 раз. В период потепления отмечаются тренды увеличения концентрации фосфатов и общего фосфора, снижения уровня нитратов (рис. 2) и увеличение органического азота при постоянном общем, а также уменьшения процента нитратов в неорганическом азоте.



**Рис. 2.** Многолетняя динамика содержания биогенных элементов в водохранилище в 2001–2013 гг. а – фосфаты (1) и общий фосфор (2); б – нитраты, пунктир – линии тренда.

Количество гидроксилamina, важнейшего продукта нитрификационных и денитрификационных процессов, впервые определенное в течение нескольких лет подряд, варьировало в пределах 0–9 мкг/л (в среднем 1.7), свидетельствуя о низкой интенсивности соответствующих процессов и отсутствии загрязнения этим веществом (Bikbulatova, 2007).

Предложен новый подход к оценке естественной нитрифицирующей способности (ЕПНС) природных вод, заключающийся в экспериментальном определении кинетических параметров процессов трансформации азотсодержащих соединений в аэробных условиях и последующей их оценке и трактовке. Для различных водных масс и гидрологических фаз в жизни Рыбинского водохранилища впервые установлены продолжительность инкубационного периода, скорости процессов преобразования различных азотсодержащих компонентов, в том числе ионов аммония, гидроксилamina и нитритов (табл. 23). Показано, что нитрифицирующая способность является мощнейшим фактором в самоочищении водоема от органических загрязнений (Stepanova, 2014).

Также были вычислены константы скоростей реакции превращения аммония в нитраты (табл. 24). Скорости процессов бактериального преобразования азотсодержащих компонентов в водных массах водохранилища различаются на всех стадиях процесса нитрификации. Значения констант скорости их протекания изменяются от 0.0005 до 0.09. Впервые были определены кинетические закономерности протекания второй фазы нитрификации – образования промежуточного продукта – гидроксилamina, скорость которой чрезвычайно мала и является лимитирующей во всем процессе.

**Таблица 21.** Среднемесячные, минимальные и максимальные значения содержания (мгN/л или мгР/л) различных форм биогенных элементов и их соотношения за 2001–2012 гг. (в среднем по всему водоему)

	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N общ	Р мин	Р общ	N/P	N мин	N орг	Nмин/N орг	Nорг/N общ	Nмин/Нобщ	Рмин/Робщ
май													
Среднее	0.05	0.005	0.34	0.99	0.021	0.048	21.3	0.45	0.57	0.92	0.57	0.44	0.45
Max	0.20	0.046	0.96	3.25	0.055	0.080	50.0	1.04	2.43	3.46	0.88	1.18	0.93
Min	0.01	0	0.04	0.34	0.005	0.019	8.5	0.12	0.12	0.13	0.18	0.12	0.13
июнь													
Среднее	0.06	0.007	0.23	1.02	0.018	0.048	22.9	0.31	0.71	0.63	0.67	0.33	0.45
Max	0.20	0.023	0.88	2.2	0.062	0.092	47.8	1.00	1.80	5.03	0.89	0.83	0.83
Min	0.01	0.001	0.06	0.42	0.004	0.009	8.0	0.10	0.07	1.12	0.17	0.11	0.13
июль													
Среднее	0.06	0.008	0.109	0.94	0.020	0.063	15.6	0.19	0.72	0.33	0.78	0.22	0.33
Max	0.15	0.018	0.43	4.83	0.063	0.243	18.0	0.61	4.22	1.88	0.98	0.65	0.86
Min	0.01	0	0	0.30	0.004	0.020	5.0	0.03	0.10	0.02	0.35	0.22	0.04
август													
Среднее	0.07	0.004	0.230	0.88	0.022	0.065	14.8	0.19	0.78	0.17	0.88	0.12	0.33
Max	0.23	0.018	0.066	2.01	0.005	0.245	54.2	8.06	1.93	1.61	1.00	0.22	0.86
Min	0.007	0	0	0.40	0.22	0.024	4.4	0.01	0.26	0.01	0.38	0.01	0.04
сентябрь													
Среднее	0.06	0.003	0.086	1.02	0.026	0.067	17.2	0.014	0.89	0.20	0.85	0.15	0.37
Max	0.28	0.020	0.004	2.75	0.095	0.012	79.2	0.48	2.70	0.95	0.99	0.49	0.96
Min	0.01	0	0.39	0.34	0.005	0.176	4.9	0.01	0.20	0.01	0.51	0.01	0.04
октябрь													
Среднее	0.06	0.004	0.14	0.93	0.14	0.065	20.5	0.14	0.88	0.26	0.83	0.17	0.49
Max	0.16	0.017	0.87	3.62	1.43	0.197	181	0.090	3.22	1.96	0.99	0.66	0.90
Min	0.009	0	0.006	0.36	0.002	0.002	0.2	0.01	0.02	0.01	0.34	0.01	0.04

**Таблица 23.** Естественная потенциальная нитрификационная способность (ЕПНС) водных масс Рыбинского водохранилища

Станция	ЕПНС, мкг/л	V <sub>нитр</sub> , мкг/л сут	N <sub>общ</sub> , мкг/л	N <sub>орг</sub> , мкг/л	% минер.
1 октября					
Коприно	93	3	936	257	28
Молога	148	5	835	673	18
Наволоок	289	10	1020	925	27
Измайлово	165	6	882	755	20
Ср. Двор	218	7	940	988	21
Брейтово	254	8	876	785	34
26 октября					
Коприно	76	3	928	358	10
Наволоок	103	3	800	627	12
Брейтово	90	3	835	665	10
14 марта					
Коприно	526	10	1990	444	21
24 мая					
Коприно	321	10	1030	744	31
Молога	171	6	966	758	17
Наволоок	226	8	755	518	36
Измайлово	197	7	966	710	22
Ср. Двор	308	10	980	738	36
Брейтово	127	4	755	553	16
26 июля					
Коприно	181	6	708	504	12
Молога	212	7	712	558	23
Наволоок	147	5	650	535	20
Измайлово	126	4	702	522	16
Ср. Двор	156	5	675	462	24
Брейтово	213	7	722	606	26

**Таблица 24.** Константы скоростей реакций  $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NH}_2\text{OH} \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$

Станция	k 1, час <sup>-1</sup>	k 2, час <sup>-1</sup>	k 3, час <sup>-1</sup>
1 октября			
Коприно	0.002	0.04	0.005
Молога	0.004	0.04	0.008
Наволоок	0.004	0.05	0.010
Измайлово	0.003	0.06	0.012
Ср. Двор	0.003	0.04	0.009
Брейтово	0.004	0.05	0.015
24 октября			
Коприно	0.001	0.04	0.004
Наволоок	0.001	0.04	0.002
Брейтово	0.0005	0.04	0.02
14 марта			
Коприно	0.016	0.06	0.004
24 мая			
Коприно	0.004	0.08	0.012
Молога	0.002	0.07	0.005
Наволоок	0.001	0.01	0.004
Измайлово	0.002	0.03	0.005
Ср. Двор	0.001	0.05	0.002
Брейтово	0.002	0.03	0.006
26 июля			
Коприно	0.002	0.01	0.003
Молога	0.001	0.04	0.004
Наволоок	0.002	0.06	0.005
Измайлово	0.002	0.06	0.005
Ср. Двор	0.002	0.06	0.005
Брейтово	0.004	0.09	0.008

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За 75 лет исследования уровня биогенных элементов в водоеме всеми вышеперечисленными исследователями была проделана важнейшая работа по изучению множества параметров, позволяющая оценить состояние водохранилища по ним в тот или иной промежуток времени; прослежены сезонные изменения концентраций как органических, так и неорганических соединений азота и фосфора, а также межгодовые изменения и их связь с гидрологическими условиями; для некоторых периодов составлены балансовые расчеты; рассчитаны время и скорость оборота фосфора; суточные вариации концентраций неорганических форм азота и фосфора; определены кинетические закономерности всех стадий процесса нитрификации в водоеме в различные сезоны, дана оценка естественной потенциальной нитрификационной способности (ЕПНС) водных масс водохранилища, и состояния водоема при помощи потенциала регенерации по биогенным элементам. В настоящее время в среднем по уровню соединений азота и фосфора Рыбинское водохранилище относится к мезотрофным водоемам, однако высокие значения абсолютной концентрации нитратного азота и его доли в сумме минерального азота (являющиеся немаловажными показателями нарастания эвтрофикации), а также процентного содержания неорганического фосфора в Волжском и верхней части Шекснинского плеса позволяют оценить их состояние как эвтрофное. При сравнении полученных данных по содержанию биогенных элементов за период с 2001 по 2013 гг. с таковыми за 1970–80-е гг., можно отметить, что они находятся в пределах естественных сезонных и межгодовых колебаний и в последние 40 лет существенных изменений в их режиме в Рыбинском водохранилище не произошло и водоем продолжает находиться на стадии стабилизации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аничкова Н.И. Некоторые черты гидрохимического режима северной части Рыбинского водохранилища. Труды Дарвинского государственного заповедника. 1959. В. 5. С. 191–208. Anichkova N.I. Nekotorye cherty gidrochimicheskogo rezhima severnoy chasti Rybinskogo vodokhranilisha. Trudy Darvinskogo gosudarstvennogo zapovdnika. 1959. V. 5. P. 191–208. [Anichkova N.I. Some Features of the Hydrochemical Regime in the Northern Part of the Rybinsk Reservoir. Proceedings of the Darwin State Nature Reserve. 1959. Is. 5. P. 191–208] In Russian
- Бикбулатов Э.С., Степанова И.Э. Оценка трофности Рыбинского водохранилища с помощью потенциала регенерации биогенных элементов // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 6. С. 721–726. Bikbulatov E.S., Stepanova I.E. Otsenka trofnosti Rybinskogo vodokhranilisha s pomoshchu potentsiala regeneratsii biogennykh elementov // Vodn. Resur. 2002. T. 29. № 6. P. 721–726. [Bikbulatov E.S., Stepanova I.E. Assessment of the Trophic State of the Rybinsk Reservoir using Regeneration Potential of Biogenic Elements // Water Resour. 2002. Vol. 29. № 6. P. 721–726] In Russian
- Bikbulatova E.M., Stepanova I.E. Bikbulatov E.S. Concentration and Localization of Hydroxylamine in the Reservoirs and Lakes in the Territory of European Russia. Water Resour. 2007. T. 34. № 5. P. 554–562. / DOI: 10.1134/S0097807807050107.
- Былинкина А.А. Содержание азота и фосфора в воде Рыбинского водохранилища в период автотрофной стадии его функционирования // Современное состояние экосистемы Рыбинского водохранилища. С-Пб.: Гидрометеоиздат. 1993. С. 28–41. Bylinkina A.A. Soderzhanie azota i fosfora v vode Rybinskogo vodokhranilisha v period avtotrofnoy stadii ego funktsionirovaniya // Sovremennoe sostoyanie ekosistemy Rybinskogo vodokhranilisha. 1993. P. 28–41. [Bylinkina A.A. The Content of Nitrogen and Phosphorus in Water of the Rybinsk Reservoir during an Autotrophic Stage of its Functioning // The Modern State of the Ecosystem in the Rybinsk Reservoir. St-Petersburg.: Gidrometeoizdat. 1993. P. 28–41] In Russian
- Былинкина А.А. О времени и скорости оборота минерального фосфора в поверхностных водах // Материалы к совещанию по прогнозированию содержания биогенных элементов и органического вещества в водохранилищах. Рыбинск. 1969. С. 37–44. Bylinkina A.A. O vremeni i skorosti oborota mineralnogo fosfora v poverkhnostnykh vodakh //Materialy k soveschaniyu po prognozirovaniyu sodержaniya biogennykh elementov i organicheskogo vtschestva v vodokhranilishakh. Rybinsk. 1969. P. 37–44. [Bylinkina A.A. About the Time and Rate of Mineral Phosphorus Cycle in Surface Waters // Materials of the Meeting on Prediction of the Content of Biogenic Elements and Organic Matter in Reservoirs. Rybinsk. 1969. P. 37–44] In Russian
- Волга и ее жизнь. Л.: «Наука». 1974. 349 с. Volga i ee zhizn. L.: Nauka, 1974. 349 P. [The Volga River and its Life. L.: Nauka. 1974. 349 p] In Russian
- Воронков П.П. Основные черты формирования гидрохимического режима Рыбинского водохранилища //Труды ГГИ. В. 11. 1951. С. 167–237. Voronkov P.P. Osnovnye cherty formirovaniya gidrochimicheskogo rezhima Rybinskogo vodokhranilisha // Trudy GGI. V. 11. 1951. P. 167–237 [Voronkov P.P. The Main Features of Formation of the Hydrochemical Regime in the Rybinsk Reservoir // Proceedings of GGI. Is. 11. 1951. P. 167–237] In Russian
- Воронков П.П. Основные черты режима биогенных соединений водохранилищ Волжской системы в связи с их первичной продукцией. Труды ГГИ. В.37. 1953. С. 62–80. Voronkov P.P. Osnovnye cherty rezhima biogennykh soedinenii vodokhranilish Volzhskoi sistemy v svyazi s ikh pervichnoi produktsiyei // Trudy GGI V.37. 1953. P. 62–80. [Voronkov P.P. The Main Features of the Regime of Biogenic Compounds in the Volga System Reservoirs in Respect to their Primary Production. Proceedings of GGI. Is. 37. 1953. P. 62–80] In Russian

- Драчев С.М., Былинкина А.А., Калинина Л.А. Антропогенный фактор формирования качества воды и режима биогенных элементов в водохранилищах Верхней Волги // Волга – 1. Проблемы изучения рационального использования биологических ресурсов водоемов. Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство. 1971. С. 28–32. Drachev S.M., Bylinkina A.A., Kalinina L.A. Antropogenniy faktor formirovaniya kachestva vody i rezhima biogennykh elementov v vodokhranilischakh Verkhnei Volgi // Volga – 1. Problemy izuchtniya ratsionalnogo ispolzovaniya biologicheskikh resursov vodoemov. 1971. P. 28–32 [Drachev S.M., Bylinkina A.A., Kalinina L.A. Anthropogenic Factor of Formation of Water Quality and Regime of Biogenic Elements in Reservoirs of the Upper Volga // Volga – 1. Problems of the Study of Rational Use of Biological Resources in Waterbodies. Kuibyshev: Kuibyshev Publishing House. 1971. P. 28–32] In Russian.
- Драчев С.М., Калинина Л.А. О влиянии бытовых и промышленных стоков на содержание связанного азота в водохранилищах Верхней Волги // Материалы к совещанию по прогнозированию содержания биогенных элементов и органического вещества в водохранилищах. Рыбинск. 1969. С. 92–100. Drachev S.M., Kalinina L.A. O vliyaniy bytovykh i promyshlennykh stokov na sodержanie svyazannogo azota v vodokhranilischakh // Materialy k soveschaniyu po prognozirovaniyu sodержaniya biogennykh elementov i organicheskogo veshchstva v vodokhranilischakh. Rybinsk. 1969. P. 92–100. [Drachev S.M., Kalinina L.A. About the Effect of Domestic and Industrial Sewages on the Content of Bound Nitrogen in Reservoirs of the Upper Volga // Materials of the Meeting on Prediction of the Content of Biogenic Elements and Organic Matter in Reservoirs. Rybinsk. 1969. P. 92–100] In Russian
- Драчев С.М., Былинкина А.А., Трифонова Н.А., Кудрявцева Н.А. Влияние антропогенных факторов на содержание биогенных элементов и солевой состав водохранилищ Волги // Биологические продукционные процессы в бассейне Волги. Л.: Наука. 1976. С. 18–24. Drachev S.M., Bylinkina A.A., Trifonova N.A., Kudryavtseva N.A. Vliyanie antropogennykh faktorov na sodержanie biogennykh elementov i solevoy sostav vodokhranilisch Volgi // Biologicheskie produktzionnye protsessy v basseine Volgi. L.: Nauka. 1976. P. 18–24. [Drachev S.M., Bylinkina A.A., Trifonova N.A., Kudryavtseva N.A. About the Effect of Anthropogenic Factors on the Content of Biogenic Elements and Salt Composition in the Volga Reservoirs // Biological Production Processes in the Volga River Basin. L.: Nauka. 1976. P. 18–24.] In Russian.
- Законнов В.В. Распределение донных отложений в Рыбинском водохранилище // Биология внутренних вод. Информационный бюллетень 1981. № 51. С. 68–72. Zakonnov V.V. Raspredelenie donnykh otlozheniy v Rybinskom vodokhranilische // Biologiya vnutrennikh vod. Informatsionnyi bulletin. 1981. № 51. P. 68–72. [Zakonnov V.V. Distribution of Bottom Sediments in the Rybinsk Reservoir // Biology of Inland Waters. Information Bulletin 1981. № 51. P. 68–72] In Russian.
- Киреева А.С. Некоторые данные по гидрохимии Рыбинского водохранилища // Труды биологической станции «Борок». 1955. В. 2. С. 335–350. Kireeva A.S. Nekotorye dannye po gidrokhimii Rybinskogo vodokhranilisha // Trudy biologicheskoy stantsii Borok. 1955. V. 2. P. 335–350. [Kireeva A.S. Some Data on Hydrochemistry of the Rybinsk Reservoir // Proceedings of the Borok Biological Station. 1955. Is. 2. P. 335–350.] In Russian.
- Мосевич Н.А., Мосевич М. В. Основные черты гидрохимического режима и микробиологические процессы в Рыбинском водохранилище // Труды проблемного и тематического совещания ЗИН АН СССР. 1954. В. 2. С. 11–21. Mosevich N.A., Mosevich M.V. Osnovnye cherty gidrokhimicheskogo rezhima i mikrobiologicheskie protsessy v Rybinskom vodokhranilische // Trudy problemnogo i tematicheskogo soveschaniya ZIN AN SSSR. 1954. V. 2. P. 11–21 [Mosevich N.A., Mosevich M.V. The Main Features of Hydrochemical Regime and Microbiological Processes in the Rybinsk Reservoir // Proceedings of Problem and Thematic Conference of ZIN AN USSR. 1954. Is. 2. P. 11–21] In Russian.
- Кудрявцев Д.Д. Материалы к гидрохимической характеристике Волжского отрога Рыбинского водохранилища 1943–1946 гг. // Труды биологической станции Борок. 1950. В. 1. С. 35–78. Kudryavtsev D.D. Materialy k gidrokhimicheskoi kharakteristike Volzhskogo otroga Rybinskogo vodokhranilisha 1943–1946 gg. // Trudy biologicheskoi stantsii Borok. 1950. V. 1. P. 35–78 [Kudryavtsev D.D. Materials to Hydrochemical Characteristic of the Volga Reach in the Rybinsk Reservoir in 1943–1946 // Proceedings of the Borok Biological Station. 1950. Is. 1. P. 35–78] In Russian.
- Кудрявцев Д.Д. Сравнительная характеристика гидрохимического режима водохранилищ Верхней Волги: Ивановского, Угличского и Рыбинского // Труды биологической станции «Борок». В. 1. 1950. С. 79–96. Kudryavtsev D.D. Sravnitel'naya kharakteristika gidrokhimicheskogo rezhimavodokhranilisch Verkhney Volgi: Ivankovskogo, Uglichskogo i Rybinskogo // Trudy biologicheskoy stantsii Borok. 1950. V. 1. P. 79–96 [Kudryavtsev D.D. Comparative Characteristic of Hydrochemical Regime in the Upper Volga Reservoirs: Ivankovo, Uglich and Rybinsk // Proceedings of the Borok Biological Station. 1950. Is. 1. P. 79–96] In Russian.
- Монакова С.В. Минеральный и органический фосфор в воде Рыбинского водохранилища в 1965 году // Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения. Л.: Наука. 1968. С. 217–222. Monakova S.V. Mineralnyy i organicheskiy fosfor v vode Rybinskogo vodokhranilisha // Khimizm vnutrennikh vodoemov I factory ikh zagryazneniya i samoochischneniya. L.: Nauka. 1968. P. 217–222 [Monakova S.V. Mineral and Organic Phosphorus in Water of the Rybinsk Reservoir in 1965 // Chimism of Inland Waterbodies and Factors of their Pollution and Self-purification. L.: Nauka. 1968. P. 217–222.] In Russian.
- Разгулин С. М., Гапеева М.В., Литвинов А.С. Баланс биогенных элементов и ионов в Рыбинском водохранилище в 1980 году // Гидрохимические исследования волжских водохранилищ. Рыбинск: Типография № 2. 1982. С. 81–91. Razgulin S.M., Gapeeva M.V., Litvinov A.S. Balans biogennykh elementov i ionov v Rybinskom vodokhranilische v 1980 godu // Gidrokhimicheskie issledovaniya volzhskikh vodokhranilisch. 1982. P. 81–91.

- [Razgulin S.M., Gapeeva M.V., Litvinov A.S. Balance of Biogenic Elements and Ions in the Rybinsk Reservoir in 1980 // *Hydrochemical Studies of the Volga Reservoirs*. Rybinsk: Printing House № 2. 1982. P. 81–91] In Russian.
- Разгулин С.М. Сезонная динамика и баланс биогенных элементов в Рыбинском водохранилище // *Географические аспекты рационального природопользования в Верхневолжском Нечерноземье*. Ярославль, 1984. С. 71–76. Razgulin S.M. Sezonnaya dinamika i balans biogennykh elementov v Rybinskom vodokhranilische // *Gegraficheskie aspekty ratsionalnogo priridopolzovaniya v Verkhnevolzhskom Nechozozeme*. Yaroslavl: tipografiya politekhicheskogo instituta. 1984. С. 71–76. [Razgulin S.M. Seasonal Dynamics and Balance of Biogenic Elements in the Rybinsk Reservoir // *Geographical Aspects of the Rational Nature Management in the Upper Volga Non-Chernozem Zone*. Yaroslavl. 1984. P. 71–76.] In Russian.
- Разгулин С.М., Гапеева М.В. Динамика основных ионов Рыбинского водохранилища в 1978–1979 гг. // *Биология внутренних вод. Информационный бюллетень*. 1983. № 58. С. 50–53. Razgulin S.M., Gapeeva M.V. Dinamika osnovnykh ionov Rybinskogo vodokhranilisha v 1978–1979 gg. // *Biologiya vnutrennikh vod. Informatsionnyi bulletin*. 1983. № 58. P. 50–53. [Razgulin S.M., Gapeeva M.V. Dynamics of the Main Ions in the Rybinsk Reservoir in 1978–1979 ee. // *Biology of Inland Waters. Information Bulletin*. 1983. № 58. P. 50–53.] In Russian.
- Степанова И.Э., Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М. Закономерности динамики содержания биогенных элементов в водах Рыбинского водохранилища за годы его существования // *Вода: химия и экология*. № 1. 2013. С. 15–28. Stepanova I.E., Bikbulatov E.S., Bikbulatova E.M. Zakonomernosti dinamiki soderzhaniya biogennykh elementov v vodakh Rybinskogo vodokhranilisha za gody ego suschestvovaniya // *Voda: khimiya i ekologiya*. № 1. 2013. P. 15–28. [Stepanova I.E., Bikbulatov E.M., Bikbulatova E.M. Patters of Dynamics of the Content of Biogenic Elements in Waters of the Rybinsk Reservoir during the Years of its Existence // *Water: Chemistry and Ecology*. № 1. 2013. P. 15–28.] In Russian.
- Stepanova I.E. Nitrification Kinetics in Water of the Rybinsk Reservoir // *Russian Journal of General Chemistry*. 2014. Vol. 84. № 13. P. 2656–2660.
- Степанова И.Э., Бикбулатова Е.М. Значимость соотношений форм биогенных элементов для оценки современного состояния Рыбинского водохранилища // *Поволжский экологический журнал*. 2015. № 3. С. 330–337. Stepanova I. E., Bikbulatova E.M. Znachimost sootnoshenii form biogennykh elementov dlya otsenki sovremennogo sostoyaniya Rybinskogo vodokhranilisha // *Povolzhskiy ekologicheskii zhurnal*. 2015. № 3. P. 330–337. [Stepanova I.E., Bikbulatova E.M. Importance of the Ratio of Forms of Biogenic Elements for Assessment of the Modern State of the Rybinsk Reservoir // *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2015. № 3. P. 330–337.] In Russian.
- Степанова И.Э. Сезонная и межгодовая динамика содержания соединений азота и фосфора в Рыбинском водохранилище // *Экология. Экономика. Информатика. Ростов-на-Дону*. 2014. Т. 1: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. С. 242–247. Stepanova I.E. Sezonnaya i mezhgodovaya dinamika soderzhaniya soedineniy azota i fosfora v Rybinskom vodokhranilische // *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Rostov-na-Donu*. 2014. T. 1: Sistemnyi analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh system. P. 242–247. [Stepanova I.E. Seasonal and Annual Dynamics of the Content of Nitrogen and Phosphorus Compounds in the Rybinsk Reservoir // *Ecology. Economy. Informatics. Rostov-on-Don*. 2014. Vol. 1: System Analysis and Modeling of Economic and Ecological Systems. P. 242–247.] In Russian.
- Трифонов Н.А. О накоплении соединений азота в донных отложениях Рыбинского водохранилища // *Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах*. М.: Наука, 1967. С. 118–122. Trifonova N.A. O nakoplenii soedineniy azota v donnykh otlozheniyakh Rybinskogo vodokhranilisha // *Krugovorot veschestva i energii v vodoemakh*. M.: Nauka, 1967. P. 118–122. [Trifonova N.A. About Accumulation of Nitrogen Compounds in Bottom Sediments of the Rybinsk Reservoir // *Cycles of Matter and Energy Transfer in Lake Ecosystems*. M.: Nauka, 1967. P. 118–122.] In Russian.
- Трифонов Н.А. О накоплении соединений азота в Рыбинском водохранилище в вегетационный период // *Материалы к совещанию по прогнозированию содержания биогенных элементов и органического вещества в водохранилищах*. Рыбинск. 1969. С. 8–15. Trifonova N.A. O nakoplenii soedineniy azota v Rybinskom vodokhranilische v vegetatsionnyi period // *Materialy k soveschaniyu po prognozirovaniyu soderzhaniya biogennykh elementov i organicheskogo veschtstva v vodokhranilishakh*. Rybinsk. 1969. P. 8–15. [Trifonova N.A. About Accumulation of Nitrogen Compounds in the Rybinsk Reservoir during the Vegetation Period // *Materials of the Conference on Prediction of the Content of Biogenic Elements and Organic Matter in Reservoirs*. Rybinsk. 1969. P. 8–15.] In Russian.
- Трифонов Н.А. Распределение соединений азота в Рыбинском водохранилище в зимне-весенний период // *Абиотические факторы биологического круговорота в водоемах*. Л.: Наука, 1971. С. 101–113. Trifonova N.A. Raspreделение soedineniy azota v Rybinskom vodokhranilische v zimne-vesenniy period // *Abioticheskie factory biologicheskogo krugovorota v vodoemakh*. L.: Nauka, 1971. P. 101–113. [Trifonova N.A. Distribution of Nitrogen Compounds in the Rybinsk Reservoir during the WinterAutumn period // *Abiotic Factors of Biological Cycle in Waterbodies*. L.: Nauka, 1971. P. 101–113.] In Russian.
- Трифонов Н.А. Соединения азота в Рыбинском водохранилище. Автореф. канд. дисс. Москва. 1974. 28 с. Trifonova N.A. Soedineniya azota v Rybinskom vodokhranilische. Avtoref. kand. Diss. Moskva. 1974. 28 p. [Trifonova N.A. Nitrogen Compounds in the Rybinsk Reservoir. Extended Abstract of Cand Sci. (Biol.) Dissertation. Moscow. 1974. 28 p.] In Russian.
- Трифонов Н.А. Былинкина А.А. О влиянии донных отложений на содержание биогенных элементов в воде // *Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ*. Борок, 1977. С. 74–79.

Trifonova N.A. Bylinkina A.A. O vliyaniy donnykh otlozheniy na sodержanie biogennikh elementov v vode // *Gidrologicheskie i gidrokhimicheskie aspekty izucheniya vodokhranilisch*. Borok, 1977. P. 74–79. [Trifonova N.A., Bylinkina A.A. About the Effect of Bottom Sediments on the Content of Biogenic Elements in Water // *Hydrological and Hydrochemical Aspects of the Study of Reservoirs*. Borok, 1977. P. 74–79.] In Russian.

Щербаков А.П. Гидрохимический режим Волги, Мологи, Шексны в районе Рыбинского водохранилища (до наполнения водохранилища) // *Труды биологической станции Борок*. 1950. В. 1. С. 7–34. Scherbakov A.P. *Gidrokhimicheskiy rezhim Volgi, Molog, Sheksny v raione Rybinskogo vodokhranilischa* // *Trudy biologicheskoi stantsii Borok*. 1950. V. 1. P. 7–34. [Shcherbakov A.P. Hydrochemical Regime of the Volga, Mologa, and Sheksna Rivers in the Region of the Rybinsk Reservoir (before Filling of the Reservoir) // *Proceedings of the Borok Biological Station*. 1950. Is. 1. P. 7–34.] In Russian.

## **HISTORY OF THE STUDY OF BIOGENIC ELEMENTS IN THE RYBINSK RESERVOIR**

**I. E. Stepanova**

*I.D. Papanin Institute for biology of inland waters Russian Academy of Sciences, 152742 Russia  
e-mail: iris@ibiw.yaroslavl.ru*

History of the studies of nitrogen and phosphorus elements in the reservoir has been traced during the period from 1939–1940 (in rivers which later formed the reservoir) up to the present. Seasonal and annual dynamics, spatial distribution, the ratio of forms of biogenic elements, balance models, the relationship with hydrological conditions, the time and rate of phosphorus cycle, daily variations of concentrations of nonorganic forms of nitrogen and phosphorus and kinetic features of all stages of the nitrification processes are considered. Natural potential nitrification ability (NPNA) of water masses in the reservoir and the state of the reservoir are assessed using regeneration potential according to biogenic elements.

*Keywords:* nitrogen, phosphorus, Rybinsk Reservoir.

## СОДЕРЖАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ФОСФОРА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОБСЫХАЮЩИХ МЕЛКОВОДИЙ МАЛОЙ РЕКИ ИЛЬД – ПРИТОКА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

**Н. В. Васильева, Н. А. Афиногенова**

*Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН  
152742, пос. Борок, Ярославская обл., e-mail: vnv@ibiw.yaroslavl.ru*

Показано, что содержание различных форм фосфора в донных отложениях обсыхающих мелководий зависит от типа донных отложений, содержания органического вещества и определяется особенностями гидрологического режима станции.

*Ключевые слова:* донные отложения, формы фосфора, органическое вещество.

### ВВЕДЕНИЕ

Наряду с такими элементами, как азот и кремний, фосфор определяет трофический статус водоемов и лимитирует развитие водной растительности и гидробионтов, конечным пунктом миграции фосфора являются донные отложения. Фосфор в природных донных отложениях присутствует в различных формах: обменной, сорбированной на оксидах железа и алюминия, органической. Существовая в той или иной форме, фосфор обладает различной степенью активности или подвижности, что определяет его поведение в донных отложениях (Законов, 1982). Обменный фосфор трансформируется на границе донных отложений и толщи воды. Подвижность других форм фосфора в донных отложениях обуславливается такими параметрами, как температура, рН, Eh, процессами минерализации органического вещества с участием биоты, реакциями комплексообразования.

В результате подтопления водами водохранилищ малых рек – притоков водохранилищ в их среднем течении образовалась зона подпора с переменным уровнем воды. На берегу в зоне подпора образуются участки периодически обсыхающих мелководий – пограничная зона между водой и сушей, с особыми свойствами и структурой. Она отличается от прилегающих участков берега и речного дна по гидрохимическим, гидрологическим и биологическим показателям, в том числе по содержанию различных форм фосфора.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА.

Наши исследования проводились в устьевой области малой реки Ильд – притока Рыбинского водохранилища. До образования Рыбинского водохранилища р. Ильд была притоком р. Сутка, которая затем впадала в р. Волга. После затопления области слияния этих рек оказались в зоне подпора водохранилища. В рамках районирования устьевой области реки Ильды – малого притока Рыбинского водохранилища ранее (Болотов и др., 2012) были выделены три основные гидроэкологические зоны: Па – переходная притока с преобладанием речных вод, Пб – фронтальная, характеризующаяся значительными вертикальными градиентами с отчетливым расслоением более минерализованных речных и опресненных водохранилищных вод, и Пв – переходная приемника с преобладанием водных масс водохранилища (рис. 1).

Для сравнительного анализа грунтов обсыхающих мелководий в летний период были отобраны пробы грунта на станциях 1–10 (рис. 1). Отбор проб грунта производился штанговым трубчатым дночерпателем с глубины 30, 50 и 100 см по трансектам от уреза воды к коренному берегу. Высота керна составляла 15 см. После отбора пробы грунта высушивали до воздушно-сухого состояния. Работы с пробами по определению гранулометрического состава производились согласно “ГОСТ 12536–79. Методы определения гранулометрического состава”. Гранулометрический анализ состоял в разделении грунта на группы с близкими по величине частицами. Размер частиц определялся по диаметру и выражался в миллиметрах. Химический анализ на содержание различных форм фосфора и органического вещества в донных отложениях проводился по стандартным методикам (Аринушкина, 1970; Методы исследования, 1980).

Для определения различных форм фосфора исследовали цикл вытяжек. Для этого помещали в колбу сухую навеску в 1 грамм, добавляли 1 н NaOH и встряхивали в качалке 16 часов. Затем осадок центрифугировали и дважды промывали 0.1 н р-ром NaOH. В аликвоте полученного раствора определяем концентрацию щелочнорастворимой формы фосфора (неапатитовый фосфор). Далее оставляя после центрифугирования часть пробы опять помещаем в колбу, добавляем 0.5 н раствор соляной кислоты и встряхиваем в качалке 16 часов. Затем осадок также центрифугируется и дважды



промывается 0.1 М раствором хлорида натрия. В аликвоте полученного раствора определяли кислоторастворимую форму фосфора, которая связана с кальцием.

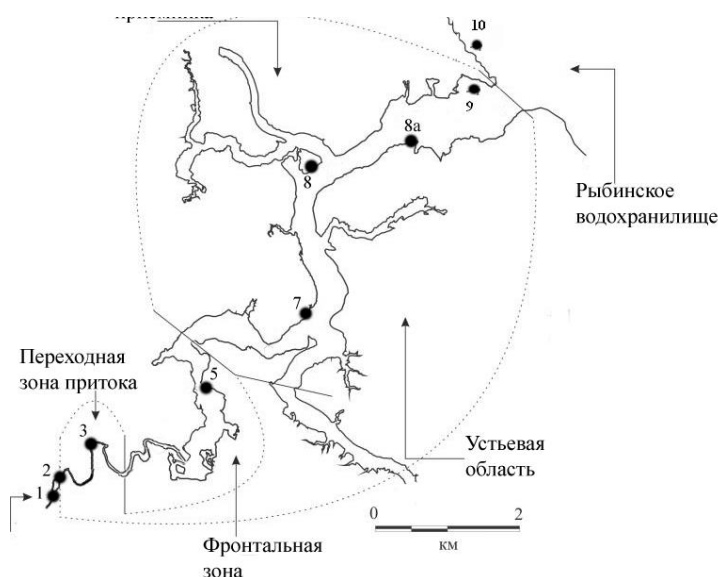


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб.

Обменную форму фосфора, представляющий собой подвижный фосфор, вымываемый из донных отложений в естественных условиях и доступный для биоты, определяли путем исследования серии водных вытяжек с использованием дистиллированной воды. Общий фосфор определялся персульфатным методом.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Грунты на станциях представляли собой в основном средние и пылеватые пески с растительным опадом, местами с включениями из осколков кирпича и мелкой гальки (табл. 1).

Таблица 1. Гранулометрический состав донных отложений р. Ильд

№ станции	Сумма фракций (процент по массе)			
	> 2 мм	1–2 мм	1–0.25 мм	< 0.25 мм
1	12.97	18.06	20.27	1.65
3	6.16	10.93	66.02	16.89
4	0.00	0.00	21.54	78.46
5	10.53	24.37	56.42	8.68
7	4.25	6.14	72.48	17.13
8a	0.31	4.99	84.17	10.52

Ранее Н.В. Лобусом с соавт. (2014) также было указано, что в донных отложениях исследованной акватории наблюдается три типа донных отложений – автохтонного, смешанного и терригенного происхождения, сменяющих друг друга по продольному профилю от зоны свободного течения реки до водохранилища. Наиболее бедными по содержанию общего, неапатитового и обменного фосфора были почвы обсыхающих мелководий зоны свободного течения (станции 1 и 2). По содержанию органического вещества наиболее бедными были пески, взятые на станциях 3 и 8, 8a. По всем показателям выделялась ст. 7: в глинистом грунте наблюдалось высокое содержание как органического вещества, так и общего, неапатитового и обменного фосфора.

Наши данные хорошо согласуются с данными других авторов. Так, Третьякова и др. (2011) показали, что содержание фосфора в ДО существенно зависит от их типа. Концентрации фосфора в иловых донных отложениях в среднем оказалась в 3 раза выше, чем содержание в отложениях с песочной фракцией. Причем, такая зависимость прослеживалась в любой период наблюдения. Это связано с тем, что иловые отложения, представленные тонкой мелкодисперсной фракцией, обладают большей сорбционной способностью по сравнению с песками. То же самое можно сказать и про глинистые донные отложения. Содержание апатитового фосфора колебалось в пределах 0.011–0.033% сухого веса на всех станциях. Таким образом, было установлено, что содержание общего, неапатитового, обменного фосфора и органического вещества зависит от типа грунта. В песчаных грунтах и галечниках преобладает апатитовый фосфор, в глинистом грунте преобладает неапатитовый фосфор. Доля доступного для биоты растворимого фосфора невелика, максимальное его количество обнаружено в

глинистом грунте ст. 7. Вышеперечисленные особенности химического состава почв ст. 7 определялись особенностями гидрологического режима этой станции: она расположена в зоне слияния двух рек, и таким образом, сюда выносятся большое количество аллохтонного материала. А поскольку эта станция находится также в переходной зоне приемника, скорость течения на ней и уровень воды зависят от гидрологических процессов, происходящих на водохранилище.

**Таблица 2.** Содержание форм фосфора и органического вещества в донных отложениях р. Ильд, % сухого веса

№ станции	Тип грунта	Общий фосфор, %	Неапатитовый фосфор, %	Апатитовый фосфор, %	Растворимый фосфор, %	Органическое вещество, %
1	Крупная галька с пылеватым песком	0.0286	0.0067	0.0183	0.0008	0.30
2	Песок с галькой и гравием	0.0261	0.0076	0.0192	0.0006	0.30
3	Пылеватый песок с растительными остатками	0.0371	0.0128	0.0161	0.0016	1.82
7	5-7 см глинистого грунта на размытой суглинистой почве	0.0752	0.0267	0.0110	0.0067	3.27
8	Средний песок с растительным опадом	0.0577	0.0095	0.0334	0.0002	0.76
8a	Пылеватый песок с растительным опадом и включениями из осколков кирпича	0.0547	0.0241	0.0129	0.0002	1.68

### ВЫВОДЫ

Таким образом, нами установлено, что в устьевой зоне малой реки – притока Рыбинского водохранилища существуют различные участки обсыхающих мелководий, отличающиеся по гидрологическому режиму и химическому составу грунтов. Наиболее бедными по химическому составу грунтов и флористическому составу являются участки обсыхающих мелководий свободного течения реки, наиболее богатыми – участки зоны приемника.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аринущкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Изд-во Московского университета, 1970. 488 с. [Arinuchkina E.V. Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv. Iz-vo Moskovskogo universiteta, 1979, 488 с.] In Russian
- Болотов С.Э., Крылов А.В., Цветков А.И., Соколова Е.А., Поддубный С.А. Водные массы и зоопланктон зоны подпора притока Рыбинского водохранилища // Поволжский экологический журнал. 2012. № 2. С. 134–141. [Bolotov S. E., Krylov A.V., Tsvetkov A.I., Sokolova E.A., Poddubnyi S.A. Vodnye massy i sooplankton zony podpora pritoka Rybinskogo vodohranilischa // Povolczskiy ekologicheskiy zurnal. 2012. № 2. S. 134–141.] In Russian
- Лобус Н.В., Присыпкин В.И., Болотов С.Э. Генезис органического вещества донных осадков // Гидроэкология устьевых областей притоков равнинного водохранилища / ред. А.В.Крылов; Ин-т биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. Ярославль, Филигрань, 2015. 466 с. [Lobus N.V., Prisyppkin V.I., Bolotov S.E. Genesis organicheskogo veshchestva donnykh jsadkov // Hydroecology of lowland water reservoir tributaries' mouth. Yaroslavl: Filigran, 2015. P. 407–416.] In Russian
- Третьякова Е.И., Ильина Е.Г., Бурлуцкая Е.В. Изучение факторов, влияющих на содержание фосфора в донных отложениях Новосибирского водохранилища // Известия Алтайского государственного университета. 2011. № 3/2. С. 168–173. [Tretyakova E.I., Ilyina E.G., Burlutskaya E.V. Izuchenie phaktorov, vliaychich na coderzhanie phosphora v donnykh otlozheniach Novosibirskogo vodochranilischa // Izvestia Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta. 2011. № 3/2. S. 168–173.] In Russian
- ГОСТ 12536-79. Методы определения гранулометрического состава [GOST12536-79 Vetody opredeleniy granulometricheskogo sostava] In Russian
- Законнов В.В. Содержание и распределение биогенных элементов в наносах верхневолжских водохранилищ // Биол. внутрен. вод. Информ. бюл. Л, 1982. № 53. С. 58–64. [Zakonnov V.V. Soderzhanie i raspredelenie biogennykh elementov v nanosah verhnivolchskikh vjdohranilisch // Biologiya vnutrennikh vod. Informatsionnyi bulleten. 1982. № 53. P. 58–64.] In Russian
- Методы исследования органического вещества в океане / под ред. Е.А Романкевича. М.: Наука, 1980. [Metody issledovaniy organicheskogo veshchestva v okeane / pod red. E.A. Romankevicha. M.: Nauka, 1980]. In Russian

## THE CONTENTS OF VARIOUS FORMS OF PHOSPHORUS IN GROUND ADJOURNMENT OF DRYING SHOALINESSES OF THE SMALL RIVER ILD – INFLOW OF THE RYBINSK WATER BASIN

**N. V. Vasileva, N. A. Afinogenova**

*I.D. Papanin Institute for biology of inland waters RAS, 152742 Borok, Russia  
e-mail: vnv@ ibiw.yaroslavl.ru*

It is shown, that the contents of various forms of phosphorus in ground adjournment of drying shoalinesses depends on type of ground adjournment, contents of organic substance and is defined by features of a hydrological mode of station.

**Keywords:** ground adjournment, forms of phosphorus, organic substance.

## ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА В РЕЧНЫХ АКВАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ (НА ПРИМЕРЕ Р. ИЛЬД БАССЕЙНА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА)

Н. Г. Отюкова

*Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН  
152742, пос. Борок, Ярославская обл., e-mail: ong@ibiw.yaroslavl.ru*

Представлены результаты изучения пространственно-временной динамики содержания железа в речных аквальных комплексах: речном участке (верхнем и среднем течении), русловых прудах, устьевой области малой реки.

*Ключевые слова:* железо общее и растворенное, речной участок, русловой пруд, устьевая область.

### ВВЕДЕНИЕ

Железо – широко распространенный элемент земной коры, лимитирующий качество речных вод. Основными источниками его поступления в русловую сеть являются процессы химического выветривания горных пород, подземный сток, сточные воды промышленности и сельского хозяйства.

Железо является одним из важнейших биогенных элементов и в речной воде находится в растворенном, взвешенном и коллоидном состояниях. Во взвешенную форму принято выделять частицы с размером более 0.45 мкм, представляющие собой железосодержащие минералы и сорбированные на взвеси соединения железа. Растворенное железо может находиться в ионной форме, в виде комплексных соединений с минеральными и органическими веществами. На формы железа и их содержание большое влияние оказывают значения pH и Eh, концентрации органических кислот, растворенного кислорода, сероводорода, диоксида углерода, а также микроорганизмы, окисляющие и восстанавливающие железо. Речными водами от 50 до 75% железа может переноситься в составе растворенного органического вещества (Глаголева, 1959). Главной миграционной формой железа в природных водах является взвешенная, в речных водах она составляет до 90% суммарного его количества (Глаголева, 1959; Соломин, 1967). Преобладает взвешенное железо над растворенным и в водах Мирового океана (Степанова, 1976).

Биогеохимический круговорот железа в поверхностных водах – широкомасштабный процесс, включающий как абиотическую, так и биотическую составляющую экосистемы. Круговорот железа в водоемах состоит в том, что их соединения поступают с водосборной площади в водоем, где они окисляются и осаждаются на дно, затем переходят в восстановленную растворимую форму и могут снова диффундировать в водную массу (Горленко и др., 1977). Миграция железа в поверхностных водах в значительной степени зависит от активности микроорганизмов. Биологическая трансформация железа осуществляется при участии групп железовосстанавливающих и окисляющих микроорганизмов, причем скорость биогенных процессов окисления железа во много раз превышает химическое окисление.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Река Ильд приток второго порядка Рыбинского водохранилища (Ярославская область, Некоузский район). Длина реки 46 км, площадь водосбора 240 км<sup>2</sup>, средний многолетний объем стока составляет 43 млн. м<sup>3</sup>. Большую часть водосборной площади составляют сельскохозяйственные угодья на месте еловых и смешанных лесов. Верховья реки сильно заболочены (Отюкова, 2009).

Ильд представляет собой сложный аквально-территориальный комплекс, состоящий из отдельных локальных экосистем, находящихся в непрерывном взаимодействии друг с другом (Поддубный, 2014). Химический анализ воды был проведен по стандартным методикам, внесенным в Государственный реестр количественного химического анализа вод.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Речной участок.* Содержание органического вещества, как и неорганических соединений, зависит от характера питания реки и природных условий на водосборе. В верхнем течении реки, где определяющую роль в формировании химического состава воды играет сильная заболоченность водосбора, концентрация органического вещества (по перманганатной окисляемости (ПО) и химическому потреблению кислорода (ХПК)) в течение всего периода наблюдений была наиболее высокой (табл. 1). Максимальные величины цветности воды указывают на гумусовую природу органического вещества, что подтверждается величиной отношения ПО/ХПК, превышающей 40%. Корреляционный анализ выявил значимые связи между цветностью воды и железом ( $r = 0.82$ ), железом и ПО ( $r = 0.46$ ),

что свидетельствует о наличии железогумусовых комплексов. Во все сезоны значения ПО, ХПК, цветности, взвешенного вещества, железа общего в верхнем течении реки выше таковых в среднем течении. При этом концентрации железа растворенного сопоставимы. Весь период наблюдений на всей акватории доминирующей формой железа была взвешенная и составляла от 51 до 90% от общего содержания железа.

Основное количество взвешенных веществ поступает в реки в результате эрозии берегов, смыва с водосборного бассейна и со сточными водами. При этом в среднем течении реки наличие комплекса бобровых плотин, резко снижающих скорость течения, и прудов, способствуют оседанию со взвесью органических веществ и железа, поступающих из верховья реки. Тесная связь железа с органическим веществом и минерализация аллохтонного вещества в реке обуславливают распад железорганических соединений. В богатой кислородом воде разрыв связей железа с органическим веществом сопровождается образованием Fe(III). Учитывая pH выпадения  $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  в диапазоне 2.5–4.5, что гораздо ниже наблюдаемого в реке, то гидраты оседают (табл. 1).

Весной питание реки осуществляется преимущественно за счет поверхностно-склоновых вод, богатых органическими веществами, содержащими значительные количества гуминовых веществ. Это обуславливает максимальные значения цветности, перманганатной окисляемости (табл. 1). В летнюю и осеннюю межень, при смене питания реки на преимущественно грунтовое, значения этих показателей снижаются. Грунтовые воды по сравнению с поверхностно-склоновыми имеют меньшее количество растворенных органических веществ. Это связано с уменьшением их количества в почвенных растворах от верхних горизонтов к нижним. Органическое вещество грунтовых вод имеет иной химический состав, обусловленный трансформацией органических соединений в процессе фильтрации воды в толще почво-грунтов.

**Таблица 1.** Среднемноголетние (2001–2008 гг.) значения гидрохимических показателей р. Ильд по сезонам (в скобках приведены min – max)

Показатель	Участок	Весна	Лето	Осень
рН, ед.	верхнее течение	7.55 (7.41–7.78)	7.53 (7.18–7.78)	7.68 (7.33–8.13)
	среднее течение	7.85 (7.50–8.29)	7.78 (7.60–8.15)	7.82 (7.50–8.15)
	верхнее течение	26.8 (17.7–44.5)	23.1 (9.5–45.2)	19.4 (8.8–53.9)
	среднее течение	22.2 (12.3–35.1)	20.4 (1.7–90)	14.8 (4–39.7)
ПО, мгО/дм <sup>3</sup>	верхнее течение	48.8 (39.1–64.3)	58.8 (23.5–157)	51.1 (24.2–115)
	среднее течение	47 (19.4–65.1)	44.6 (5–99.2)	37.8 (13–95.9)
ХПК, мгО/дм <sup>3</sup>	верхнее течение	18 (7–27)	20 (3–51)	19 (4.5–47.1)
	среднее течение	13.5 (3–26.5)	9.2 (2–26.5)	8.3 (2.4–24.5)
Взвеш. вещ., мг/дм <sup>3</sup>	верхнее течение	1.05 (0.39–2.74)	1.56 (0.5–6.44)	1.14 (0.14–2.58)
	среднее течение	0.82 (0.42–1.4)	0.67 (0.23–1.3)	0.57 (0.12–1.84)
Fe общ., мг/дм <sup>3</sup>	верхнее течение	0.36 (0.29–0.44)	0.29 (0.08–0.48)	0.11 (0–0.21)
	среднее течение	0.4 (0.13–0.68)	0.32 (0.03–0.84)	0.13 (0–0.66)
Fe раств., мг/дм <sup>3</sup>	верхнее течение	175 (100–248)	150 (75–236)	78 (46–122)
	среднее течение	147 (82–288)	139 (27–300)	64 (11–183)

*Пруды.* Русловые пруды в зависимости от расположения на реке могут быть задействованы для различных сельскохозяйственных, хозяйственно-бытовых, рыболовческих и т. п. целей. Некоузский пруд является русловым, находится в верхнем течении реки. Имеет площадь 0.0697 км<sup>2</sup>, периметр 1.483 км. Длина 420 м, ширина 150–180 м. Наибольшие глубины пруда 3.5 м и приурочены к русловой части р. Ильд, средняя глубина около 1.2 м. Выкопан в 1970-е гг. прошлого века и исполь-

зуется как пожарный водоем. Имеет сильную антропогенную и зоогенную нагрузку – на пруду живут бобры и могут поступать стоки с бывшей свинофермы.

Мельничный пруд находится в среднем течении реки. Длина пруда составляет 60–65 м, ширина – 40–50 м. В период половодья и паводков площадь пруда может достигать 2270 м<sup>2</sup>, в летне-осеннюю межень – 1450 м<sup>2</sup>. Максимальная глубина в зависимости от сезона года изменяется от 6 до 7 м, а средняя составляет 3.7 м. По функционально-генетической классификации этот пруд можно отнести к мельничным, русловым (Мишон, 2003). Малый объем пруда не оказывает существенного влияния на сток р. Ильд. Расчет относительной емкости пруда (отношение объема пруда к объему стока, %) показал, что объем задерживаемой им стока крайне мал и составляет в среднемноголетнем годовом плане 0.01% в многоводный год – 0.007% и маловодный год – 0.04% (Цветкова, Отюкова, 2009).

Исследованные пруды различаются между собой по химическим параметрам в силу своего местоположения на водосборе реки. Так, Некоузский пруд, находится в верхнем течении реки, характеризующимся заболоченной водосборной площадью, обуславливающей поступление большого количества гуминовых веществ и железоорганических комплексов. Поэтому в Некоузском пруду значения цветности, перманганатной окисляемости (ПО), железа общего в течение периода наблюдений практически всегда превышала таковые в Мельничном пруду (табл. 2).

Сезонная динамика распределения форм железа в прудах представлена преобладанием нерастворимых, коллоидных соединений железа. Это связано с переходом Fe (II) в Fe (III), а также с высоким содержанием гумусовых кислот. Максимум концентраций железа общего в прудах наблюдается зимой, когда ощущается дефицит кислорода и железогумусовые комплексы составляют значительную часть железа (Связь..., 1974). Весной снижение содержания железа общего обусловлено разбавлением талыми водами, а повышение к осени, вероятно, связано с биологическими процессами, т. к. железо входит в круговорот органического вещества.

**Таблица 2.** Средние за 2008–2009 гг. значения гидрохимических показателей воды в исследованных прудах

Показатель	Сезон	Некоузский		Мельничный	
		поверхностный слой	придонный слой	поверхностный слой	придонный слой
Цветность, град.	зима	60	91	29	27
	весна	196	196	157	161
	лето	92	89	109	127
	осень	109	112	23	25
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	зима	5.1	2.6	1.4	0.9
	весна	2.3	1.7	1.8	2.3
	лето	3.3	9.0	1.1	3.8
	осень	4.7	10.5	1.9	2.7
ПО, мгО/дм <sup>3</sup>	зима	13.3	24.8	9.7	10.9
	весна	23.4	23.4	18.2	18.3
	лето	16.0	23.2	15.2	14.9
	осень	18.1	38.1	4.1	9.8
ХПК, мгО/дм <sup>3</sup>	зима	40.7	59.5	18.3	22.2
	весна	52.8	60.5	36.8	43.3
	лето	55.7	83.0	36.1	31.7
	осень	47.4	77.1	18.0	22.2
Fe общее, мг/дм <sup>3</sup>	зима	1.34	11.26	0.93	1.19
	весна	0.28	1.24	0.77	1.32
	лето	0.87	9.43	0.66	12.7
	осень	1.63	23.61	0.87	22.96
Fe растворенное, мг/дм <sup>3</sup>	зима	0.13	0.14	0.05	0.04
	весна	0.27	0.43	0.41	0.44
	лето	0.10	0.21	0.21	1.59
	осень	0.24	0.20	0.09	0.36
Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	зима	18.0	57.0	12.5	15.8
	весна	36.0	95.0	14.0	20.0
	лето	12.0	57.0	14.0	51.0
	осень	22.0	126.0	11.0	86.0

На распределение форм железа по горизонтам влияет комплекс факторов: процентное насыщение кислородом, pH, процессы перемешивания водных масс, деятельность микроорганизмов (Алекин, 1970). Замедление скорости течения воды в пруду приводит к оседанию взвешенных веществ, а с

ними органического вещества и железа. Количество взвеси у дна может быть выше по сравнению с поверхностью в 7 раз. В прудах прослеживается отчетливая тенденция увеличения содержания железа общего ко дну. Особенно ярко это проявляется осенью, когда в придонном слое по сравнению с поверхностным разницей в содержании железа может достигать до 26 раз (табл. 2). Обусловлено это минерализацией органического вещества (ОВ), восстановлением соединений железа под действием микроорганизмов и диффузией их из донных отложений. Преобладающая форма железа в прудах – взвешенная. В поверхностном слое доля железа взвешенного от общего в летнюю, осеннюю, зимнюю межень составляет 68–95%, в половодье за счет поступления талых вод – от 4 до 47%. В придонном слое прудов круглый год доля взвешенного железа находится в пределах 65–99%.

Устьевая область реки Ильд представляет собой часть аквально-территориального комплекса со специфическим гидробиологическим и гидрохимическим режимом. Изучено сезонное распределение железа общего и растворенного по горизонтам в устьевой области малой р. Ильд бассейна Рыбинского водохранилища с 2006 по 2010 гг. По физико-химическим параметрам водных масс было произведено районирование устьевой области: I – зона свободного течения притока; II – устьевая область: Па – переходная зона притока; Пб – фронтальная зона; Пс – переходная зона приемника; III – водохранилище (Крылов и др., 2010).

Минимальному содержанию количества растворенных форм железа способствует мелководность водоема, воды которого наиболее прогреты и где уже в первой половине мая наблюдается интенсивное развитие фитопланктона. Железо утилизируется фитопланктоном и переходит во взвешенную форму.

При минерализации отмершего планктона железо выделяется в раствор в виде железоорганических соединений или, частично, в виде  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Поэтому, учитывая высокую скорость минерализации планктона в период максимального прогрева водоема, по всей исследованной акватории увеличивается содержание растворенного органического железа в среднем и придонном горизонтах весной и летом (табл. 3). Около 85% продукции фитопланктона относится к нестойкому ОВ, минерализующемуся в течение нескольких дней (Кузнецов, 1955; Скопинцев, 1947). Наиболее отчетливо вертикальная стратификация железа наблюдается в теплое время года и в штилевую погоду, когда нет вертикального перемешивания водных масс.

В придонных слоях, где, как правило, наблюдается дефицит кислорода, железо переходит в раствор, увеличивая концентрацию у дна (табл. 4). Также большие концентрации железа в придонном слое являются следствием минерализации ОВ, а малые концентрации в поверхностном слое объясняются потреблением его фитопланктоном.

В половодье в устьевую область с речным потоком поступают преимущественно поверхностно-склоновые воды. Эти воды богаты органическими веществами, содержащими значительные количества гуминовых веществ и железоорганических комплексов, что обеспечивает максимальные значения цветности, перманганатной окисляемости, железа общего и растворенного (табл. 3). Прослеживается прямая зависимость цветности воды от перманганатной окисляемости, что характерно для незагрязненных водоемов.

Одним из наиболее характерных показателей, позволяющих получить представление о формах существования железа в водоеме, является соотношение  $\text{Fe}_{\text{раств.}}/\text{Fe}_{\text{взв.}}$ . Весной, когда железогумусовые комплексы составляют значительную часть растворенного железа, в исследованных зонах устьевой области р. Ильд оно составляет 1.2–2.0. Доминируют растворенные формы железа над взвешенными.

В период перехода от половодья к межени преобладают воды почвенно-грунтового происхождения. При этом значения минерализации увеличиваются. Содержание органических веществ, железа и цветность воды снижаются.

В летнюю межень смена водного питания (сокращается доля поверхностно-склонового стока) сказывается на снижении цветности воды. Количество органического и взвешенных веществ увеличивается от зоны свободного течения к переходной зоне приемника и снижается в водохранилище. Максимальные значения легкоокисляющегося органического вещества, взвеси отмечаются во фронтальной зоне.

В зоне подпора происходит аккумуляция органических веществ, приносимых рекой. Установлено, что в водохранилище происходит снижение окисляемости, т.е. водная толща теряет часть приносимого реками органического вещества (Рыбинское..., 1972). В результате в устьевой области количество органики выше, чем в зоне свободного течения и в водохранилище.

К летней межени величина отношения  $\text{Fe}_{\text{раств.}}/\text{Fe}_{\text{взв.}}$  на изучаемой акватории снижается и составляет 0.48–0.94, что свидетельствует о преобладании взвешенной формы железа, лишь в водохранилище преобладает растворенная форма ( $\text{Fe}_{\text{раств.}}/\text{Fe}_{\text{взв.}}=1.25$ ).

**Таблица 3.** Среднегоголетние (2006–2010 гг.) значения гидрохимических показателей в устьевой области р. Ильд (поверхностный горизонт) по сезонам (в скобках приведены min – max)

Показатель	Зона	Зима	Весна	Лето	Осень
ПО, мгО/дм <sup>3</sup>	I*	6.4 (2.6–11.6)	21.2 (16.0–27.0)	11.6 (1.0–27.9)	4.9 (2.7–9.5)
	Па	10.5 (3.7–18.0)	19.3 (10.4–28.0)	13.2 (1.0–29.3)	5.1 (3.3–10.9)
	Пб	13.4 (9.1–18.2)	19.4 (10.4–28.8)	17.0 (7.6–27.1)	10.4 (4.8–17.7)
	Пс	13.1 (9.8–16.2)	15.9 (8.4–23.4)	14.8 (10.5–20.8)	10.5 (6.2–16.2)
	III	— **	9.8 (3.5–15.6)	13.1 (9.1–17.2)	13.5 (13.0–14.0)
ХПК, мгО/дм <sup>3</sup>	I	14.0 (7.8–22.3)	41.5 (30.0–64.4)	26.5 (10.0–53.0)	15.0 (7.0–24.0)
	Па	17.8 (6.0–36.1)	42.3 (22.3–67.4)	36.2 (6.0–104.0)	17.1 (8.7–35.6)
	Пб	28.4 (13.9–58.6)	41.3 (29.2–59.8)	44.1 (25.2–68.2)	25.6 (11.2–17.7)
	Пс	23.1 (15.8–31.6)	33.9 (22.9–53.8)	38.0 (18.3–68.6)	23.1 (14.8–34.5)
	III	—	24.0 (17.3–28.4)	34.0 (18.9–49.3)	27.2 (18.3–36.0)
Взвеш. вещ., мг/дм <sup>3</sup>	I	6.0 (1.0–11.0)	16.3 (9.0–20.0)	10.0 (1.5–23.0)	8.0 (4.0–17.0)
	Па	16.4 (2.0–58.5)	17.4 (8.0–29.0)	18.4 (4.0–81.0)	9.5 (5.0–21.0)
	Пб	10.5 (3.0–33.0)	14.8 (5.0–26.5)	21.0 (3.0–52.0)	13.7 (7.0–25.0)
	Пс	5.8 (2.0–17.0)	11.3 (4.0–22.0)	15.4 (2.0–39.0)	8.9 (1.0–27.0)
	III	—	12.0 (6.0–16.0)	13.6 (8.0–27.0)	5.0 (4.0–6.0)
Fe <sub>общ.</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	I	0.41 (0.11–0.94)	0.85 (1.01–0.77)	0.45 (0.16–1.03)	0.25 (0.14–0.34)
	Па	0.65 (0.27–1.49)	0.70 (0.31–0.99)	0.46 (0.12–1.08)	0.31 (0.13–0.58)
	Пб	0.54 (0.33–0.86)	0.56 (0.28–1.06)	0.44 (0.16–10.0)	0.37 (0.18–1.71)
	Пс	0.39 (0.11–0.63)	0.39 (0.2–0.6)	0.35 (0.1–0.9)	0.23 (0.1–0.39)
	III	—	0.25 (0.15–0.34)	0.18 (0.04–0.34)	0.22 (0.21–0.22)
Fe <sub>раств.</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	I	0.20 (0.02–0.71)	0.47 (0.21–0.77)	0.20 (0.02–0.62)	0.08 (0.04–0.11)
	Па	0.11 (0.04–0.31)	0.42 (0.22–0.60)	0.15 (0.02–0.64)	0.07 (0.03–0.1)
	Пб	0.13 (0.04–0.22)	0.34 (0.13–0.59)	0.2 (0.03–0.54)	0.08 (0.03–0.17)
	Пс	0.09 (0.08–0.11)	0.26 (0.06–0.47)	0.17 (0.01–0.50)	0.08 (0.03–0.21)
	III	—	0.15 (0.09–0.25)	0.10 (0.01–0.27)	0.11 (0.11–0.11)
Цветность, град.	I	40 (15 – 106)	182 (83–237)	86 (25–224)	27 (20–37)
	Па	42 (15–97)	194 (80–245)	99 (22–250)	27 (19–44)
	Пб	76 (24–136)	174 (90–230)	118 (45–232)	45 (21–70)
	Пс	63 (48–94)	118 (75–170)	91 (50–202)	48 (27–67)
	III	—	92 (73–103)	89 (59–118)	63 (59–67)

*Примечание.* \*Здесь и в табл. 4: I – зона свободного течения притока; II – устьевая область: Па – переходная зона притока; Пб – фронтальная зона; Пс – переходная зона приемника; III – водохранилище; \*\* – данные отсутствуют.

**Таблица 4.** Среднегодовые (2006–2010 гг.) значения  $Fe_{общ}$  (мг/дм<sup>3</sup>) в устьевой области р. Ильд по горизонтам

	Зона	зима	весна	лето	осень
Поверхность	I	0.41	0.85	0.45	0.25
	IIa	0.65	0.70	0.46	0.31
	IIб	0.54	0.56	0.44	0.37
	IIв	0.39	0.39	0.35	0.23
	III	—	0.25	0.18	0.22
Середина	I	—	—	—	—
	IIa	—	0.65	0.47	0.30
	IIб	0.73	0.57	0.50	0.31
	IIв	0.65	0.45	0.39	0.51
	III	—	0.19	0.27	—
Дно	I	—	—	—	—
	IIa	1.04	0.74	0.54	0.63
	IIб	0.75	0.70	0.72	0.49
	IIв	0.69	0.51	0.62	0.66
	III	—	0.19	0.78	—

К осени уменьшается количество органических веществ, железа общего и растворенного, значения цветности. Коэффициент  $Fe_{раств}/Fe_{взв.}$  на участке от зоны свободного течения реки до фронтальной зоны снижается до 0.20–0.28, органическое вещество представлено свежееобразованными соединениями, преобладает взвешенная форма железа над растворенной. На участке от переходной зоны приемника до водохранилища, напротив, значение отношения остается высоким и составляет 1.0, что указывает на равное содержание форм железа. При этом во фронтальной зоне сохраняются максимальные значения ХПК, ПО, взвеси и отличаются от таковых в зоне свободного течения в 1.7, 2.1, 1.7 раз соответственно. Далее к водохранилищу значения этих показателей снижаются.

В зимнюю межень основная масса органического вещества представлена стойким к биохимическому окислению веществом гумусовой природы, о чем свидетельствует величина отношения ПО/ХПК, превышающая 40%. На всей акватории доминирующая форма железа – взвешенная, соотношение  $Fe_{раств}/Fe_{взв.}$  составляет от 0.2 в переходной зоне притока до 0.95 в зоне свободного течения притока.

В устьевой области притока отчетливо прослеживается сезонная динамика содержания железа, зависимость его от характера питания реки. Здесь отлагается большая часть приносимых рекой наносов, задерживаются и накапливаются растворенные в воде вещества.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, пространственно-временная динамика содержания железа в речных аквальных комплексах имеет следующие тенденции. Отчетливо прослеживается сезонная динамика содержания железа, зависимость его от характера питания реки. Формы миграции железа в речных водах меняются в годовом цикле в зависимости от количества взвешенного вещества, важнейшей особенностью является доминирование взвешенных форм железа над растворенными. Соединения железа аккумулируются на дне, поглощая эвтрофирующие водоем вещества в ходе седиментации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л., 1970. 444 с. [Al'okin O. A. Osnovi gidrohimii. L., 1970. 444 p.] Al'okin O. A. Hydrochemistry bases. L., 1970. 444 p.
- Глаголева М. А. Формы миграции элементов в речных водах // К познанию диагенеза осадков. М., 1959. С. 5–28. Glagoleva M. A. Formy migracii elementov v rechnyh vodah // K poznaniu diagenеза osadkov. M., 1959. S. 5–28. [Glagoleva M. A. Forms of migration of elements in river waters // To knowledge of diagenesis of deposits. M., 1959. S. 5–28] In Russian.
- Горленко В.М., Дубинина Г.А., Кузнецов С.И. Экология водных микроорганизмов. М.: Наука, 1977. 289 с. Gorlenko V. M., Dubinina G. A., Kuznetsov S. I. Ekologiya vodnih mikroorganizmov. M.: Nauka, 1977. 289 p. [Gorlenko V. M., Dubinina G. A., Kuznetsov S. I. Ecology of water microorganisms. M.: Nauka, 1977. 289 p.] In Russian.
- Крылов А.В., Цветков А.И., Малин М.И., Романенко А.В., Поддубный С.А., Отыюкова Н.Г. Сообщества гидробионтов и физико-химические параметры устьевой области притока равнинного водохранилища // Биология внутр. вод. 2010. № 1. С. 65–75. [Krylov A. V., Tsvetkov A. I., Malin M. I., Romanenko A. V., Poddubnyy S. A., Otyukova N. G. Soobcestva gidrobiontov i fiziko-himicheskie parametri ust'evoi oblasti pritoka ravninnogo vodohranilicya // Biologiya vnutr. vod. 2010. № 1. S. 65–75. Krylov A. V., Tsvetkov A. I., Malin M. I., Romanenko A. V., Poddubnyy S. A., Otyukova N. G. Communities hydobionts and physical and chemical parametres, mouth section of inflow of a flat water basin // Biology of internal waters. 2010. № 1. P. 65–75]



- Кузнецов С.И. Роль микроорганизмов в круговороте веществ в водоемах. М., 1955, 289 с. [Kuznetsov S.I. Rol' mikroorganizmov v krugovorote vecstv v vodoemah. M., 1955, 289 s.] Kuznetsov S.I. Role of microorganisms in circulation of substances in reservoirs. M., 1955. 289 p.
- Мишон В.М. Функционально-генетическая классификация прудов Центрального Черноземья // Вестник Воронежского университета. 2003. № 2. [Mishon V.M. Funkcional'no-geneticheskaya klassifikaciya prudov Central'nogo Chernozemya // Vestnik Voronezhskogo universiteta. 2003. № 2.] Mishon V.M. Functional-genetic classification of ponds of the Central Chernozem region // The bulletin of the Voronezh university. 2003. № 2.
- Поддубный С.А. Малая река как сложный аквально-территориальный комплекс // Вода: химия и экология. 2014. № 2. С. 41–46. Poddubniy S.A. Malaya reka kak slozhnyy akval'no-territorial'nyy kompleks // Voda: himiya i ekologiya. 2014. № 2. S. 41–46. [Poddubniy S.A. The small river as difficult aqua-territorial complex // Water: chemistry and ecology. 2014. № 2. P. 41–46.] In Russian.
- Рыбинское водохранилище и его жизнь. Л.: Наука, 1972. 364 с. [Ribinskoe vodохраниlice i ego zizn'. L. Nauka, 1972. 364 s.] Rybinsk water basin and his life. L.: Nauka, 1972. 364 p.
- Связь химического стока рек с заболоченностью водосборов // Литология и полезные ископаемые. 1974. № 4. С. 3–9. [Sv'az' himicheskogo stoka rek s zabolochennost'yu vodosborov // Litologia i poleznye iskopaemye. 1974. № 4. S. 3–9.] Communication of a chemical drain of the rivers with marshiness of reservoirs // Litologi and minerals. 1974. № 4. P. 3–9.
- Скопинцев Б.А. О скорости разложения органического вещества отмершего планктона // ДАН СССР. 1947. Т. 58, № 8. С. 1797–1800. [Skopintsev B.A. O skorosti razlozenia organicheskogo vecstva otmershego planktona // DAN SSSR. 1947. T. 58, № 8. S. 1797–800.] Skopintsev B.A. About speed of decomposition of organic substance of the died off plankton // DAN SSSR. 1947. V. 58, № 8. P. 1797–1800.
- Соломин Г.А. Ионные равновесия железа в природных водах // Гидрохим. матер. 1967. Т. 43. С. 88–93. Solomin G.A. Ionnie ravnovesia geleza v prirodnykh vodah // Gidrohim. mater. 1967. T. 43. S. 88–93. [Solomin G.A. Ionic balance of iron in natural waters // Hydrochemical materials. 1967. T. 43. P. 88–93] In Russian.
- Степанова И.К. Определение валового железа в природных водах // Информ. бюл. Биол. внутр. Вод. 1976. № 31, С. 69–71. Stepanova I.K. Opredelenie valovogo geleza v prirodnykh vodah // Inform. bul. Biol. vnutr. vod. 1976. № 31. S. 69–71. [Stepanova I.K. Definition of total iron in natural waters // Newsletter Inland Water Biology. 1976. № 31. P. 69–71] In Russian.
- Цветкова М.В., Отыукова Н.Г. Гидролого-гидрохимическая характеристика руслового пруда на малой реке (р. Ильд, бассейн Рыбинского водохранилища, Ярослав. обл.) // Материалы научно-практической конференции (с международным участием) «Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России», г. Азов, 8–10 июня 2009 г. Ч. 1. С. 236–239. Tsvetkova M.V., Otyukova N.G. [Gidrologo-gidrohimitskaya harakteristika ruslovogo pruda na maloy reke (r. Il'd, basseyn Ribinskogo vodохраниlicya, Yarosl. obl.) // Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii (s megdunarodnim uchastiem) «Sovremennye fundamental'nie problemi gidrohimii i monitoringa kachestva poverhnostnykh vod Rossii, g. Azov, 8–10 iunia 2009 g. Ch. 1. S. 236–239.] Tsvetkova M.V., Otyukova N.G. The gidrologo-hydrochemical characteristic a pond on the small river (the river of Ild, pool of the Rybinsk water basin, Jarosl. Region) // Materials of scientifically-practical conference (with the international participation) «Modern fundamental problems of hydrochemistry and monitoring of quality of a surface water of Russia». g. Azov, 8–10 iunia 2009 g. Ch. 1. S. 236–239.
- Otyukova N.G. Some Aspects of the Hydrochemical Regime of a Small River under the Conditions of Zoogenic Disturbance // Water Resources. 2009. Vol. 36, № 5. P. 604–609.

## **DYNAMICS OF THE MAINTENANCE OF IRON IN THE RIVER COMPLEXES (ON THE EXAMPLE OF RIVER ILD OF POOL OF THE RYBINSK WATER BASIN)**

**N. G. Otyukova**

*I.D. Papanin Institute for biology of inland waters RAS, 152742 Borok, Russia  
e-mail: ong@ibiw.yaroslavl.ru*

Results of studying spatially – time dynamics of the maintenance of iron in river aqua complexes are presented: a river site (the top and average current), ponds, mouth section of the small river.

**Keywords:** Iron the general and dissolved, a river site, pond, mouth section.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ ИЛЬД, РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И ОЗ. НЕРО)

Л. А. Кучай, Н. Г. Отюкова, Е. Н. Соколова

Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН

152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: lak@ibiw.yaroslavl.ru

По данным наблюдения гидрохимических характеристик устьевой области р. Ильд, впадающей в Рыбинское водохранилище, и ст. Коприно Волжского плеса водохранилища сформированы таблицы нормированных значений компонентов с использованием функции желательности Харрингтона. Получены интервалы значений компонентов (нормы) для лингвистических оценок шкалы Харрингтона (от “очень хорошо” до “очень плохо”), которые могут служить экспертной оценкой реального состояния экосистемы.

*Ключевые слова:* экосистема, оценка состояния, функция желательности, нормирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценки состояния природных экосистем, которая сформировалась к началу 1970-х гг. XX века, связана с необходимостью иметь количественные оценки нагрузки на экосистему, превышение которых ведет к ее разрушению. С решением этой проблемы связана проблема *экологического нормирования*, основным содержанием которой является *поиск нормы состояния экосистемы по нормам ее компонентов* (Адлер, 1987).

Технология контроля природной среды складывается из экологического мониторинга и анализа полученных данных, на основе которого принимаются решения о перспективах практического использования экосистем. Анализ состоит из нескольких этапов, включающих, в частности, индикацию по биотическим показателям и экологическое нормирование с целью оценки состояния экосистемы (Левич и др., 2004).

Анализ и оценка состояния сложных систем, каковой, несомненно, является экосистема, приводит к многокритериальным задачам, при решении которых используются *методы нечеткой логики, а именно функции желательности*. В качестве одной из таких функций часто применяется *функция желательности Харрингтона* (Harrington, 1965), которая в *задачах оценки состояния экосистем конкретным значениям экологического параметра ставит в соответствие условные баллы экологического состояния системы (от “очень хорошо” до “очень плохо”)*.

Для нормирования компонентов экосистемы эта функция была опробована при анализе данных наблюдения Рыбинского водохранилища (Бикбулатов и др., 2010).

Указанная функция используется при решении широчайшего круга задач в самых различных областях знания – от частных практических приложений до общих классификационных проблем целых наук – географии, экономики, экологии и др.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ

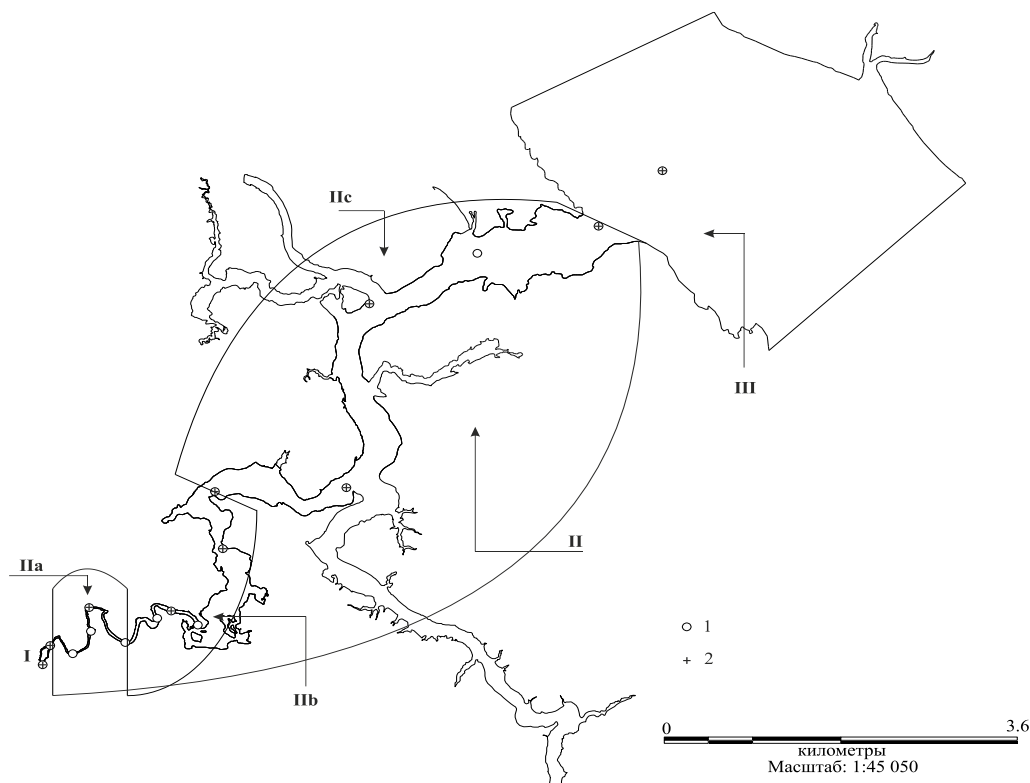
В настоящей работе функция желательности использована для нормирования макрокомпонентов солевого состава устья р. Ильд (4-х зон, рис. 1), одного из притоков Рыбинского водохранилища, и ближайшей к месту впадения реки ст. Коприно Волжского плеса по данным наблюдения за период 2006–2010 гг. (февраль – ноябрь).

Река Ильд протекает по территории Некоузского р-на Ярославской обл. Длина реки 46 км, площадь водосбора 240 км<sup>2</sup>. Большую часть водосборной площади составляют сельскохозяйственные угодья на месте еловых и смешанных лесов. Исток реки находится в заболоченном лесу, к юго-востоку от д. Федосово. Водосбор вытянут с юго-запада на северо-восток. В нижнем течении р. Ильд, у д. Горки находится зона подпора водохранилища, в 11 км от места впадения р. Сутки в водохранилище. Ильд впадает в р. Сутка, образуящую обширную устьевую зону (Рохмистров, 2004).

По водному режиму р. Ильд, как и другие реки Ярославской области, относится к восточно-европейскому типу, который характеризуется ярко выраженным весенним половодьем, летней и осенней низкой меженью, прерываемой иногда паводками, и зимней меженью (Отюкова, 2009). Река Ильд, как большинство рек лесной зоны Европейской части России, можно отнести к гидрокарбонатному классу кальциево-магниевого группы рек со средней минерализацией. При изменении минерализации воды как в течение года, так и по длине реки сохраняются следующие соотношения между основными ионами:  $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ . То есть, нормальное функционирование экосистемы ре-

ки (впрочем, как и любой другой) во многом определяется свойствами карбонатно-кальциевой системы. От состояния равновесия между ее элементами зависят такие важные процессы как фотосинтез, растворение и выпадение солей. Устойчивость устьевой воды к внешним воздействиям также является функцией элементов этой системы. Поэтому оценка состояния экосистемы, определяемая с помощью всевозможных индексов, учитывающая равновесие элементов солевого состава, может быть весьма полезной. Отметим, что в весьма основательно разработанном государственном стандарте Германии классификация качества вод произведена по трем комплексам показателей, одним из которых является солевой состав вод (TGL 22764/01, 1973).

В результате комплексных гидрологических, гидробиологических и гидрохимических исследований было проведено районирование устьевой зоны реки (Крылов и др., 2010).



**Рис. 1.** Схема исследованной акватории и районирование устьевой области. I – зона свободного течения притока; II – устьевая область: IIa – переходная зона притока; IIб – фронтальная зона; IIв – переходная зона приемника; III – водохранилище.

В последние годы для оценок качества воды по гидрофизическим, гидрохимическим и гидробиологическим показателям в употребление вошли различные виды функции желательности (Левич и др., 2004; Гелашвили и др., 2002; Дмитриев, Фрумин, 2004). В настоящей работе используется функция и шкала Харрингтона (табл. 1), в которой границами классов служат точки перегиба функции желательности Харрингтона, имеющие ординаты 0,8; 0,63; 0,37; 0,2. К ним необходимо добавить еще две характерные точки – точки минимума и максимума функции. Последняя из них является естественной точкой перегиба при ординате 1,0. Все вместе они задают стандартные отметки на шкале желательности: “очень хорошо” (1,00–0,80), “хорошо” (0,80–0,63), “удовлетворительно” (0,63–0,37), “плохо” (0,37–0,20), “очень плохо” (0,20–0,00). Таким образом, точки перегиба функции можно принять за границы классов и тем самым устранить произвол при установлении количества классов при различных способах классификации.

Функция желательности Харрингтона имеет вид:

$$G(x)=\exp(-Z^2(x)), \text{ где } Z(x)=(2x-a-b)/(b-a) \quad (1)$$

Здесь **a** – левая, **b** – правая границы диапазона желательности, выбираемые различным образом.

Для конкретного водоема произвол в выборе двусторонних границ его компонентов может быть устранен, если принять за наиболее предпочтительные величины этих компонентов среднеарифметические значения рядов *многолетних* наблюдений, и установить границы благополучия с помощью среднеквадратического отклонения (Бикбулатов и др., 2010).

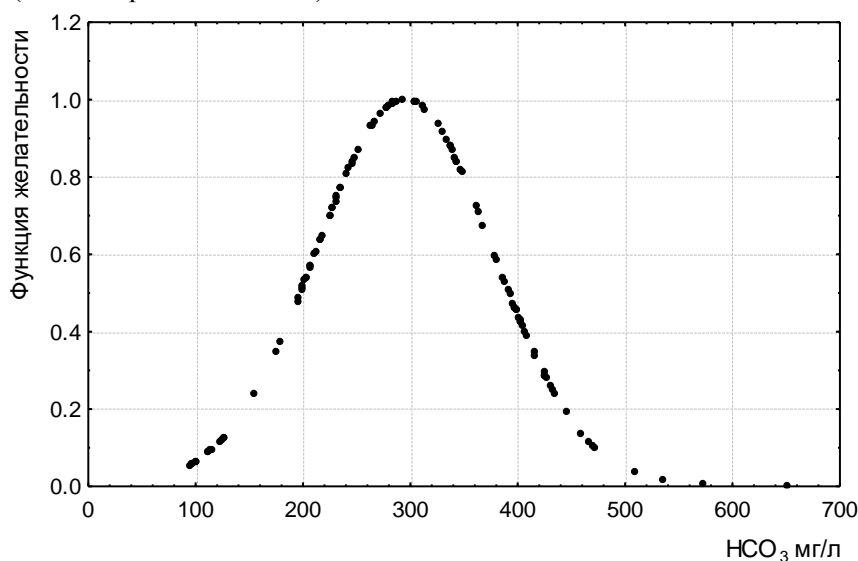
**Таблица 1.** Шкала Харрингтона (третий столбец – дополнение Бикбулатова с соавт. (2010))

Лингвистическая оценка интервалов	Интервалы значений функции желательности	Оценка качества воды
Очень хорошо	1.00–0.80	Хорошее
Хорошо	0.80–0.63	
Удовлетворительно	0.63–0.37	Среднее
Плохо	0.37–0.20	Плохое
Очень плохо	0.2–0.00	

Алгоритм нормирования компонента экосистемы, представленного рядом наблюдений  $X=\{X_i\}$ , ( $i=1,2,3,\dots,n$ ) представляет собой следующую последовательность действий:

- вычисление  $X_{\text{средн.}} = \sum X_i/n$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma = (\sum (X_i - X_{\text{ср}})^2)/n$ ;
- определение величин левой и правой границ функции Харрингтона  $a = X_{\text{ср}} - \sigma$ ,  $b = X_{\text{ср}} + \sigma$ ;
- расчет значений функции Харрингтона по формуле (1); для примера на рис. 2 приведена функция желательности Харрингтона для компонента  $\text{HCO}_3^-$  зоны свободного течения устья р. Ильд;
- согласно шкале Харрингтона для данного участка устья реки получаем (снимаем с графика), что при значении функции желательности в интервалах  
 $1-0.8$  (хорошее качество вод) значение  $\text{HCO}_3^-$  составляет 260–365 мг/л;  
 $0.8-0.63$  (хорошее качество вод) величина  $\text{HCO}_3^-$  составляет 232–259 и 365–390 мг/л;  
 $0.63-0.37$  (среднее качество вод) значение  $\text{HCO}_3^-$  составляет 194–232 или 390–426 мг/л;  
 $0.37-0.2$  (плохое качество вод) значение  $\text{HCO}_3^-$  составляет 154–194 или 426–458 мг/л;  
 $0.2-0$  (плохое качество вод) значение  $\text{HCO}_3^-$  есть величина  $<154$  или  $>458$  мг/л.

Полученные данные представлены в таблице 2. Подобным образом сформированы таблицы нормированных значений всех компонентов солевого состава для зон устья р. Ильд и ст. Коприно Волжского плеса (для поверхностных вод).



**Рис. 2.** Функция желательности щелочности воды ( $\text{HCO}_3^-$ , мг/дм<sup>3</sup>).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе функции желательности построены для следующих компонентов рассматриваемой экосистемы: магния (Mg, мг/л), кальция (Ca, мг/л), сульфатов ( $\text{SO}_4$ , мг/л), калия (K, мг/л), хлора (Cl, мг/л), натрия (Na, мг/л), щелочности ( $\text{HCO}_3^-$ , мг/л).

Для них сформированы таблицы нормированных значений (табл. 2–5).

Для выбранных компонентов солевого состава вод можно сравнить состояние разных участков устья р. Ильд и водохранилища. Общая тенденция для всех абсолютных значений солевого состава и минерализации – снижение от участка свободного течения к водохранилищу, что нельзя сказать о величинах относительных. Главными ионами, определяющими состав и минерализацию воды р. Ильд являются гидрокарбонат-ионы, ионы кальция и магния. От участка свободного течения до водохранилища в устьевой области наблюдается перераспределение долей главных ионов: незначительное

уменьшение доли гидрокарбонатов ( $\text{HCO}_3^-$ ), магния ( $\text{Mg}^{2+}$ ), суммы ионов натрия ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) и калия за счет увеличения доли сульфатов ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), хлоридов ( $\text{Cl}^-$ ) и кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ).

**Таблица 2.** Нормированные значения компонентов солевого состава воды устья р. Ильд (зона свободного течения)

Оценка	Интервал значений Ф.Ж.	$\text{HCO}_3$ мг/л	$\text{SO}_4$ мг/л	$\text{CL}$ мг/л	$\text{Ca}$ мг/л	$\text{Mg}$ мг/л	$\text{Na}$ мг/л	$\text{K}$ мг/л	$\Sigma$ ионов мг/л
Очень хорошо	1–0.8	260–365	5.1–8.9	5.7–8.4	51.0–73.3	18.1–25.8	7.9–11.6	2.0–3.0	345–492
Хор.	0.8–0.63	232–260 365–390	4.4–5.1 8.9–9.4	5.1–5.7 8.4–9.0	47.3–51.0 73.3–77.8	16.6–18.1 25.8–27.6	7.3–7.9 11.6–12.5	1.8–2.0 3.0–3.3	313–345 492–527
Удовл.	0.63–0.37	194–232 390–426	3.4–4.4 9.4–10.6	4.2–5.1 9.0–9.7	39.0–47.3 77.8–85.2	14.1–16.6 27.6–30.4	5.9–7.3 12.5–13.7	1.5–1.8 3.3–3.5	266–313 527–575
Плохо	0.37–0.2	154–194 426–458	2.8–3.4 10.6–12.2	3.4–4.2 9.7–10.9	31.9–39.09 85.3–91.6	11.5–14.1 30.6–32.5	4.9–5.9 13.7–14.8	1.2–1.5 3.5–3.8	227–266 575–616
Очень плохо	0.2–0	< 154 > 458	< 2.8 > 12.2	< 3.4 > 10.9	< 31.9 > 91.6	< 11.5 > 32.5	< 4.9 > 14.8	< 1.2 > 3.8	< 227 > 616

**Таблица 3.** Нормированные значения компонентов солевого состава воды р. Ильд (фронтальная зона)

Оценка	Интервал значений Ф.Ж.	$\text{HCO}_3$ мг/л	$\text{SO}_4$ мг/л	$\text{CL}$ мг/л	$\text{Ca}$ мг/л	$\text{Mg}$ мг/л	$\text{Na}$ мг/л	$\text{K}$ мг/л	$\Sigma$ ионов мг/л
Очень хорошо	1–0.8	179–252	5.1–8.3	4.1–6.8	37.8–52.0	12.3–17.5	5.0–7.8	1.9–2.7	246–347
Хорошо	0.8–0.6	164–179 252–267	4.4–5.1 8.3–9.0	3.7–4.2 6.87–7.5	35.1–37.8 52.0–55.0	11.2–12.3 17.5–18.6	4.6–5.0 7.8–8.4	1.8–1.9 2.7–2.9	225–246 347–367
Удовлетв.	0.6–0.4	140–164 267–290	3.2–4.2 9.0–10.0	2.7–3.6 7.5–8.4	30.1–35.1 55.0–59.9	9.5–11.2 18.6–20.4	3.7–4.6 8.4–9.3	1.5–1.8 2.9–3.2	194–225 367–400
Плохо	0.4–0.2	120–140 290–312	2.2–3.2 10.0–10.9	1.9–2.7 8.4–9.1	26.0–30.1 59.9–63.9	7.9–9.5 20.4–21.9	3.0–3.7 9.3–10.1	1.3–1.5 3.2–3.4	168–194 400–427
Очень плохо	0.2–0	< 120 > 312	< 2.2 > 10.9	< 1.9 > 9.1	< 6.0 > 63.9	< 7.9 > 21.9	< 3.0 > 10.1	< 1.3 > 3.4	< 168 > 427

**Таблица 4.** Нормированные значения компонентов солевого состава воды Рыбинского в-ща (ст. Коприно)

Оценка	Интервал значений Ф.Ж.	$\text{HCO}_3$ мг/л	$\text{SO}_4$ мг/л	$\text{CL}$ мг/л	$\text{Ca}$ мг/л	$\text{Mg}$ мг/л	$\text{Na}$ мг/л	$\text{K}$ мг/л	$\Sigma$ ионов мг/л
Очень хорошо	1–0.8	117–146	6.9–10.1	3.8–5.0	29.1–34.8	6.9–8.7	3.3–4.4	1.5–1.9	171–09
Хорошо	0.8–0.6	112–117 146–152	6.2–6.9 10.1–10.7	3.5–3.8 5.0–5.3	27.8–29.1 34.8–35.9	6.5–6.9 8.7–9.1	3.0–3.3 4.4–4.6	1.4–1.5 1.9–2.0	162–171 209–217
Удовлетв.	0.6–0.4	101–112 152–160	5.2–6.2 10.7–11.7	3.0–3.5 5.3–5.8	25.6–27.8 35.9–38.4	6.0–6.5 9.1–9.7	2.6–3.0 4.6–5.1	1.3–1.4 2.0–2.1	105–162 217–229
Плохо	0.4–0.2	95–101 160–171	4.3–5.2 11.7–12.6	2.6–3.0 5.8–6.2	23.3–25.6 38.4–40.0	5.5–6.0 9.7–10.2	2.3–2.6 5.1–5.6	1.2–1.3 2.1–2.2	140–151 229–240
Очень плохо	0.2–0	< 95 > 171	< 4.3 > 12.6	< 2.63 > 6.21	< 23.3 > 40.0	< 5.5 > 10.2	< 2.3 > 5.6	< 1.2 > 2.2	< 140 > 240

В таблице 5 представлены нормированные значения компонентов солевого состава вод оценки “очень хорошо” для 4-х зон устья и ст. Коприно Рыбинского водохранилища. Очевидна тенденция сокращения концентраций от зоны свободного течения к водохранилищу. Чрезвычайно важно изменение значений компонентов от зоны свободного течения к фронтальной зоне, формирование которой отражает взаимодействие речной и водных масс водохранилища со свойственными им значениями гидрофизических и гидрохимических показателей.

Заметим, что, сопоставляя вновь полученные данные наблюдений компонентов устья притока год от года, можно утверждать, в каком направлении изменяется экосистема. Кроме того, для оценки экологической ситуации водоема можно рассчитать *обобщенную желательность* (Левич, 2004):

$D = (d_1 * d_2 * \dots * d_n)^{1/m}$ , где  $d_i$  – желательность  $i$ -того компонента, а  $m$  – число компонентов, использованных для расчета (обозначение  $D$  взято по первой букве английского desirable – желательность).

**Таблица 5.** Нормированные значения компонентов солевого состава вод оценки “очень хорошо” для 4-х зон устья и ст. Коприно Рыбинского водохранилища

Оценка	Зона	HCO <sub>3</sub> мг/л	SO <sub>4</sub> мг/л	CL мг/л	Ca мг/л	Mg мг/л	Na мг/л	K мг/л	Σ ионов мг/л
Очень хорошо	I	260–365	5–8.9	5.7–8.4	51–73	18–26	7.9–11.6	2.0–3.0	345–492
–	II а	240–351	4.7–7.9	4.6–7.4	47–70	16.4–24.4	6.8–10.8	2.0–3.0	321–469
–	II б	179–252	5–8.3	4.0–6.8	38–52	12.3–17.5	5.0–7.8	1.9–2.7	246–347
–	II в	145–194	7–11	4.0–6.0	3–42	9.9–13.4	4.5–6.7	1.7–2.2	206–274
–	ст.Коприно	117–146	6.8–10	3.8–5.0	29–35	6.9–8.7	3.3–4.4	1.5–1.9	171–209

Очевидно, что эта величина входит в интервал (0–1) шкалы Харрингтона. Располагая на этой шкале рассчитанные значения D различных водных экосистем, можно сравнивать их состояния.

Однако, такое сравнение возможно провести и для одной и той же экосистемы, которая была исследована в разные периоды времени. Именно таким образом эта оценка была использована при анализе состояния оз. Неро, самого большого озера в пределах Ярославского Поволжья, нашедшее отражение в одном из памятников литературы как Ростовское озеро.

Первые самостоятельные труды, посвященные гидрологическим и гидробиологическим исследованиям, зафиксированы в 1895–1915 гг. (Бикбулатов, 2003). С целью устранения существующих пробелов в исследовании экосистемы озера научными сотрудниками ИБВВ РАН в период с 1987 по 1991 гг., а затем с 2000 по 2005 гг. было проведено обследование озера, охватывавшее всю его акваторию и притоки. Сравнение характеристик разных трофических уровней экосистемы показало, что за прошедшие 10 лет состояние озера не сильно изменилось, в частности, не произошло заметного изменения химического облика вод озера (Бикбулатов и др., 2008). Заметим, что этот вывод можно охарактеризовать *количественно* с помощью обобщенной функции желательности (D).

Для этого по данным наблюдений в течение вегетационных периодов 1987–1991 гг. содержания биогенных элементов (азота и фосфора), органического вещества, БПК и ХПК по всей акватории оз. Неро (16 станций) построены функции желательности. На их основе составлена таблица нормированных значений перечисленных компонентов (табл. 6). Затем была сформирована таблица осредненных по пространству и времени значения тех же гидрохимических компонентов за отдельные годы периода 2002–2004 гг. (табл. 7) и их желательность ( $d_i$ ) (вторая строка), которая рассчитывается следующим образом (для примера выбран компонент Нобщ):

- для компонента Нобщ осредненное значение за 2002–2004 гг. равно 1.81 мг/л (первая строка табл. 7);
- находим в табл. 6 (столбец нормированных значений Нобщ.) интервал функции желательности, в который попадает осредненная величина 1.81 мг/л; это – интервал (1–0.8);
- находим значение 1.81 на графике функции желательности Нобщ, ему соответствует желательность, равная 0.85.

Так формируется вторая строка табл. 7. По данным  $d_i$  гидрохимических компонентов рассчитывается обобщенная функция D.

Очевидно, что значения D относятся к области “очень хорошо” (2002, 2004 и 2002–2004 гг.) и “хорошо” (2003г.), *количественно* подтверждая, таким образом, вывод о том, что состояние экосистемы озера не претерпело значительных изменений.

**Таблица 6.** Нормированные значения гидрохимических компонентов оз Неро (1987–1991 гг.)

	Нобщ мг/л	Робщ мг/л	NH <sub>4</sub> мг/л	PO <sub>4</sub> мг/л	БПК мг/л	ХПК мг/л	Собщ мг/л
Очень хорошо	1.3–1.8	0.08–0.14	0.024–0.057	0.012–0.042	3.8–6.2	31.1–43.2	12.4–16.5
Хорошо	1.2–1.3	0.07–0.08	0.016–0.024	0.006–0.012	3.3–3.8	29.0–31.1	11.6–12.4
	1.8–2	0.14–0.16	0.057–0.065	0.042–0.051	6.2–6.8	43.2–45.6	16.5–17.5
Удовл.	1–1.2	0.05–0.07	0.01–0.016	0.001–0.006	2.5–3.3	24.5–29	10.0–11.6
	2–2.2	0.16–0.18	0.065–0.078	0.051–0.06	6.8–7.7	45.6–49.2	17.5–18.5
Плохо	0.8–1	0.03–0.05	0.078–0.087	0.06–0.068	1.8–2.5	21.5–24.5	9.1–10.0
	2.2–2.3	0.18–0.2			7.7–8.4	49.2–52.8	18.9–20.0
Очень плохо	<0.8	<0.03	<0.01	<0.001	<1.8	<21.5	<9.1
	>2.3	>0.2	>0.087	>0.068	>8.4	>52.8	>20.0

**Таблица 7.** Осредненные за вегетационный период значения гидрохимических компонентов

	Нобщ	NH4	Робщ	PO4	Собщ	БПК	ХПК	D
2002	1.8	0.05	0.098	0.017	13.9	5.5	41.4	
d <sub>i</sub>	0.85	0.93	0.984	0.91	1.0	0.98	0.89	0.93
2003	1.78	0.07	0.102	0.016	17.5	7.5	48.1	
d <sub>i</sub>	0.88	0.51	0.98	0.89	0.63	0.43	0.45	0.65
2004	1.38	0.04	0.12	0.0098	14.9	6.3	43.3	
d <sub>i</sub>	0.92	1.0	1.0	0.75	1.0	0.8	0.78	0.89
2002–2004	1.66	0.053	0.11	0.014	15.9	6.4	44.3	
d <sub>i</sub>	0,70	0.88	1.0	0.85	0.93	0.77	0.70	0.83

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что, сопоставляя вновь полученные данные наблюдений компонентов устья притока в последующие годы, можно утверждать, в каком направлении изменяется экосистема.

Составленные таблицы дают возможность по результатам последующих измерений произвести оценку состояния экосистемы р. Ильд, притока Рыбинского водохранилища, и самого водохранилища. Кроме того, используя обобщенную функцию желательности:  $D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n)^{1/n}$ , где  $d_i$  – желательность  $i$ -того компонента, возможно проследить динамику состояния системы в целом, а также отдельных ее звеньев. Положение же обобщенной функции на шкале (0–1) наряду с такими же функциями других водных экосистем позволит провести сравнительную оценку состояний экосистем.

Резюмируя изложенное, заметим, что нормированные значения гидробиологических и гидрохимических компонентов экосистемы являются реальными экспертными оценками качества воды водоема.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05-00346.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с. Adler YU.P., Markova E.V., Granovskiy YU.V. // Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy. M.: Nauka, 1976. 280 s. [Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. // Experiment planning in search for optimal conditions. M.: Nauka, 1976. 280 p.] In Russian
- Бикбулатов Э.С., Степанова И.Э., Бикбулатова Е.М. Дифференциальные экологические нормы для биогенных элементов и органического вещества Рыбинского водохранилища // Современные проблемы гидрохимии и формирования качества вод. Ростов-на-Дону: Вираз, 2010. С. 191–194. Bikbulatov E.S., Stepanova I.E., Bikbulatova E.M. Differensialnye ekologicheskie normy dlya biogenykh elementov i organicheskogo veshchestva Rybinskogo vodokhranilisha // Sovremennye problemy gidrokhimii i formirovaniya kachestva vod. Rostov-na-Donu.: Virazh, 2010. S. 191–194. [Bikbulatov E.S., Stepanova I.E., Bikbulatova E.M. Differential ecological norms for biogenic elements and organic matter in the Rybinsk Reservoir // Modern problems of hydrochemistry and water quality formation. Rostov-on-Don: Publishing House: Virazh, 2010. P. 191–194.] In Russian
- Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Литвинов А.С., Поддубный С.А. Гидрология и гидрохимия озера Неро // Рыбинск: ОАО “Дом печати”, 2003. 190 с. Bikbulatov E.S., Bikbulatova E.M., Litvinov A.S., Poddubnyy S.A. Gidrologiya i gidrokhimiya ozera Nero. Rybinsk: ОАО “Dom pechati”, 2003. 190 s. [Bikbulatov E.S., Bikbulatova E.M., Litvinov A.S., Poddubnyy S.A. The hydrology and hydrochemistry of Lake Nero. Rybinsk: ОАО “Publishing house”, 2003. 190 p.] In Russian
- Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Степанова И.Э. Химический состав вод // Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века. М.: Наука, 2008. С. 35–52. Bikbulatov E.S., Bikbulatova E.M., Stepanova I.E. Khimicheskiy sostav vod // Sostoynie ecosistemi ozera Nero v nashale XXI veka. M.: Nauka, 2008, S. 35–52. [Bikbulatov E.S., Bikbulatova E.M., Stepanova I.E. Chemical composition of waters // The status of Lake Nero ecosystem at the beginning of the XXI century. M.: Nauka, 2008, P. 35–52.] In Russian
- Гелашивили Д.Б., Карандашова А.А. Принципы экологического нормирования антропогенной нагрузки на лотические экосистемы по показателям макрозообентоса // Известия Самар. Науч. Центра РАН. 2002. Т. 2. № 4. С. 252–254. Gelashvili D.B., Karandashova A.A. Printhyipy ekologicheskogo normirovaniya antropogennoy nagruzki na loticheskie ecosistemy po pokazatelyam makrozoobentosa // Izvestiya Samar. Nauchn. Tcentra RAN. 2002. T. 2. № 4. S. 252–254. [Gelashvili D.B., Karandashova A.A. Principles of ecological normalization of anthropogenic load on lotic ecosystems based on macrozoobenthos characteristics // Proceedings of Samara Research Center RAS. 2002. V. 2, No. 4. P. 252–254.] In Russian
- Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: Наука, 2004. 295 с. Dmitriev V.V., Frumin G.T. Ekologicheskoe normirovanie i ustoychivost prirodnkh system. SPb.: Nauka, 2004. 295 s. [Dmitriev V.V. Frumin G.T. Ecological normalization and stability of natural systems, St.-Petersburg: Nauka, 2004. 295 p.] In Russian

- Крылов А.В., Цветков А.И., Малин. М.И., Романенко А.В., Поддубный С.А., Отыукова Н.Г. Сообщества гидробионтов и физико-химические параметры устьевой области притока равнинного водохранилища // Биология внутр. вод. 2010. № 1. С.65–75. Krylov A.V., Tsvetkov A.I., Malin M.I., Romanenko A.V., Poddubnyy S.A., Otyukova. N.G. Soobschestva gidrobiontov i fiziko-khimicheskie parametry ustevoy oblasti pritoka ravninnogo vodokhranilischa // Biologiya vnutr. vod. 2010. № 1. S. 65–75. [Krylov A.V., Tsvetkov A.I., Malin M.I., Romanenko A.V., Poddubnyy S.A., Otyukova N.G. Communities of hydrobionts and physicochemical parameters of the mouth area of a plain reservoir tributary // Biology of inland waters. 2010. No. 1. P. 65–75.] In Russian
- Левич А.П., Булгаков Н.Г., Максимов В.Н. Теоретические и методологические технологии регионального контроля природной среды по данным экологического мониторинга. М.: НИИ-Природа, 2004. 273 с. Levich A.P., Bulgakov N.G., Maksimov V.N. Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy tekhnologii regionalnogo kontrolya prirodnoy sredy po dannym ekologicheskogo monitoring. M.: NIA-Priroda, 2004. 273 s. [Levich A.P., Bulgakov N.G., Maksimov V.N. Theoretical and methodological technologies of regional environmental control based on ecological monitoring data. M.: NIA-Priroda, 2004. 273 p.] In Russian
- Отюкова Н.Г. Некоторые аспекты гидрохимического режима малой реки в условиях зоогенного нарушения // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 5. С. 633–638. Otyukova N.G. Nekotorye aspekty gidrokhimicheskogo rezhima maloy reki v usloviyakh zoogennoy narusheniya // Vodnie resursy. 2009. T. 36. № 5. S. 633–638. [Otyukova N.G. Some aspects of the hydrochemical regime of a small river under conditions of zoogenous disturbances // Water resources. 2009. Vol. 36, No. 5. P. 633–638.] In Russian
- Рохмистров В.Л. Малые реки Ярославского Поволжья. Ярославль: ВВО РЭА, 2004. 54 с. Rokhmistrov V.L. Malye reki Yaroslavskogo Povolzhya. Yaroslavl: VVO REA, 2004. 54 s. [Rokhmistrov V.L. Small rivers of Yaroslavl Volga region: Yaroslavl: Publishing house VVO REA, 2004. 54 p.] In Russian
- Harrington E.C. The Desirability Function // Industrial Quality Control. 1965. V. 21. № 10. С. 494–498.
- TGL 22764/01 gr. 188000 Gewässerschutz. Klassifizierung der Wasserbeschaffenheit von fließgewässern Gewässerbelastung, 1973.

## THE USE OF ECOLOGICAL NORMALIZATION METHOD FOR THE ASSESSMENT OF THE STATUS OF AQUATIC ECOSYSTEMS ( BY THE EXAMPLE OF THE MOUTH REACH OF THE ILD RIVER AND THE RYBINSK RESERVOIR)

**L. A. Kuchai, N. G. Otukova, E. N. Sokolova**

*I.D. Papanin Institute for biology of inland waters RAS, 152742 Borok, Russia*

*e-mail: Lak@ibiw.yaroslavl.ru*

Based on observations of the hydrochemical characteristics of the mouth area of the Ild River, flowing into the Rybinsk Reservoir, and Koprino station in the Volga reach of the reservoir, a table of normalized values of the components is compiled using Harrington's desirability function. Intervals of the component values (norm) are determined for linguistic evaluations of the Harrington scale (from “very good” to “very bad”).

*Keywords:* ecosystem, assessment, desirability function, normalization.



## ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И МАКРОЗООБЕНТОС УЗЛОВ СЛИЯНИЯ РАВНИННЫХ РЕК

А. А. Прокин<sup>1,2</sup>, А. И. Цветков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН

1525742, п. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: yarrivers@gmail.com

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет 394006, г. Воронеж, Университетская пл. 1

Приведены основные гидрофизические характеристики и показатели макрозообентоса устьевых областей малых и средних притоков рек Дон и Хопер на территории Воронежской области. Описаны три зоны слияния притоков и рек-приемников. В зоне слияния вода отличается от вод притока и приемника по значениям электропроводности. Протяженность зоны слияния зависит от соотношения скоростей течения контактирующих водотоков. Относительно проточных участков притока и приемника в зоне смешения вод формируются специфические сообщества макрозообентоса, характеристики которых определяются в первую очередь стабильностью гидрологического режима и особенностями донных грунтов. Формирование фауны сообществ зон смешения может идти преимущественно за счет населения приемника; на верхней границе в основном видами, характерными для притока, а на нижней – приемника; либо отличаться от прочих за счет минимальной для данного узла слияния рек фаунистической уникальностью сообществ. Наибольшей амплитудой межгодовых изменений видового богатства характеризуются сообщества, испытывающие значительные изменения гидрологических параметров. Как правило, максимальной амплитудой многолетних изменений общей численности макрозообентоса отличаются наиболее многочисленные сообщества рипали и нижней границы зоны смешения вод. Наибольшими биомассами характеризуются сообщества нижней границы зоны смешения вод, основу которых, как правило, составляют крупные двусторчатые моллюски-фильтраторы сем. Unionidae. Таким образом, сообщества нижней границы зон смешения рек могут играть важную роль в процессах самоочищения воды.

*Ключевые слова:* приток, устьевая зона, смешение водных масс, водоток-приемник, гидрологические процессы, макрозообентос.

### ВВЕДЕНИЕ

Реки – основные транспортные системы терригенного вещества, их экосистемы уникально организованы, смена популяций в реофильных сообществах вниз по течению равносильна сукцессии с обильным поступлением вещества с периферии (Маргалев, 1992). На отдельных участках водотоков процессы транспорта веществ, поступающих с водосбора, уступают место процессам седиментации. К таким участкам в первую очередь относятся устьевые области (Church, 2002). Важное значение для функционирования биоценозов устьевых областей и зон нижнего течения рек имеет поемность. Периодическое половодье обеспечивает на данных участках омоложение сообществ контурных биотопов, так как значительно изменяет их границы и перераспределяет отложения в пределах поймы, что приводит к реверсионной смене сукцессионной стадии, ведущей к установлению состояния рецидивного субклимакса, а иногда и к вторичным восстановительным сукцессиям (Разумовский, 1981; Крылов и др., 2015). В межень депо биогенов активно расходуется на создание первичной продукции, в первую очередь – макрофитов, а также по детритным сетям поступает в контурные сообщества беспозвоночных (Крылов и др., 2015).

Благодаря особенностям физико-химических характеристик (минерализация и температура воды, определяющие ее плотность, а также изменения гидродинамических условий), зоны смешения разнотипных водных масс представляют собой мощные гидрогеохимические барьеры, способствующие аккумуляции взвешенных и растворенных веществ (Dyer, 1986). Будучи эффективным природным фильтром, зона смешения обеспечивает аккумуляцию до 90% наносов, ассимиляцию биогенных элементов, эффективную физико-химическую и биологическую деактивацию токсических веществ (Lisitzin, 1999). Следовательно, участки слияния разнотипных водных объектов можно охарактеризовать как ключевые биотопы, определяющие физико-химический режим и структурно-функциональную организацию сообществ гидробионтов водоемов-реципиентов, которые могут быть охарактеризованы как гидрологические лотические автогенные экотоны (Прокин и др., 2012) по ряду признаков – увеличению видового богатства, численности и биомассы гидробионтов (Ермохин, 2007).

Любая речная система объединяет сеть притоков разного порядка, в зонах слияния которых происходит смешение водных масс (Маорс, 1995; Никитина, Чалов, 1998; Виноградова, Хмелева, 2007). Устьевые области малых рек-притоков средних и крупных водотоков также характеризуются пространственной неоднородностью среды, физико-химические характеристики водного тела (преимущественно минерализация и плотность) с градиентами скоростей течения формируют горизонтальные и вертикальные гидрологические и гидрохимические барьеры. Они влияют на структурную и функцио-

нальную организацию сообществ гидробионтов (Муравейский, 1960; Крылов, 2005; Болотов и др., 2012; Крылов и др., 2010; Прокин, Цветков, 2013). Биота рек, участвуя в трансформации  $C_{\text{но}}$  и  $C_{\text{орг}}$ , регулирует процессы его обмена с атмосферой и донными осадками (Романкевич, Ветров, 2013).

Цель работы – изучение состава и количественных характеристик макрозообентоса в зонах слияния малых и средних водотоков с реками Дон и Хопер, их сравнительный анализ с показателями в граничащих системах.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в 2010–2012, 2014 гг. в трех узлах слияния малых и средних притоков рек Дон и Хопер, соответствующих описанным ранее вариантам (Крылов и др., 2010; Прокин, Цветков, 2013): Игорец ( $N50^{\circ}58'41.46''$ ,  $E39^{\circ}47'16.40''$ ), Потудань ( $N51^{\circ}01'15.20''$ ,  $E39^{\circ}08'59.15''$ ) и Савала ( $N51^{\circ}02'46.75''$ ,  $E41^{\circ}40'41.53''$ ) (рис. 1). Для выделения разнотипных участков портативным зондом «YSI–85» измеряли электропроводность ( $EC$ , мкСм/см) (все значения приведены к  $25^{\circ}C$ ), содержание растворенного кислорода ( $O_2$ , мг/л) и температуру воды ( $T$ ,  $^{\circ}C$ ). В узле слияния р. Хопер – р. Савала помимо этого измерения проводили кондуктометром «Марк 603». Заглубление антенны было 10 см, интервал записи 10 с. Запись данных проводилась с помощью специально разработанной программы непосредственно в компьютер с географической привязкой.

Скорость течения ( $v$ , м/с) точечным способом измеряли с помощью микрокомпьютерного скоростемера-расходомера МКРС. В узле слияния Савала – Хопер по различным горизонтам скорости течений измеряли плавающими поплавками, оснащенными погруженным парусом и gps-трекером. Профиль дна, скорости, направления течений и расходы измеряли с помощью доплеровского профилографа Sontek MiniADP, с рабочим диапазоном 0.1–6 м и частотой 3 кГц. Размер ячеек составлял 20 см.

Для анализа расположения водных масс и построения схем зон смешения речных вод использовали спутниковые снимки Landsat, DigitalGlobe, GeoEye, Antrix предоставленные сервисами USGS Earth Explorer, Google, Yandex, Bing, ESRI.

Количественные пробы макрозообентоса отобраны ковшевым дночерпателем Петерсена с площадью захвата  $0,025 \text{ м}^2$  (25–29.08.2009, 25–27.06.2010 гг.) и коробчатым дночерпателем ДАК–100 (27–29.09.2011, 15–17.07.2012, 08.07.2014 гг.), по два подъема на 1 пробу. Пробы взяты на следующих станциях (рис. 1): в реке, выше впадения притока (1), в узле слияния: по створу (2) правобережная рипаль (б) – медиаль (а) – левобережная рипаль (в) и в зоне смешения вод (3) – верхняя граница зоны (определяемая по 90% обеспеченности водами притока (по электропроводности)) (а) и ее нижняя граница (около 100 м ниже по течению от устья притока, определяемая как 90% обеспеченность водами приемника (по электропроводности)) (б). В р. Игорец, где асимметрия склонов не выражена, а ширина реки не более 3 м, при вдольбереговом типе зарастания, отбиралась лишь 1 проба в середине реки – условно «медиаль», так как различий в биотопическом расчленении по створу реки не было отмечено. Всего было собрано и обработано 64 пробы.

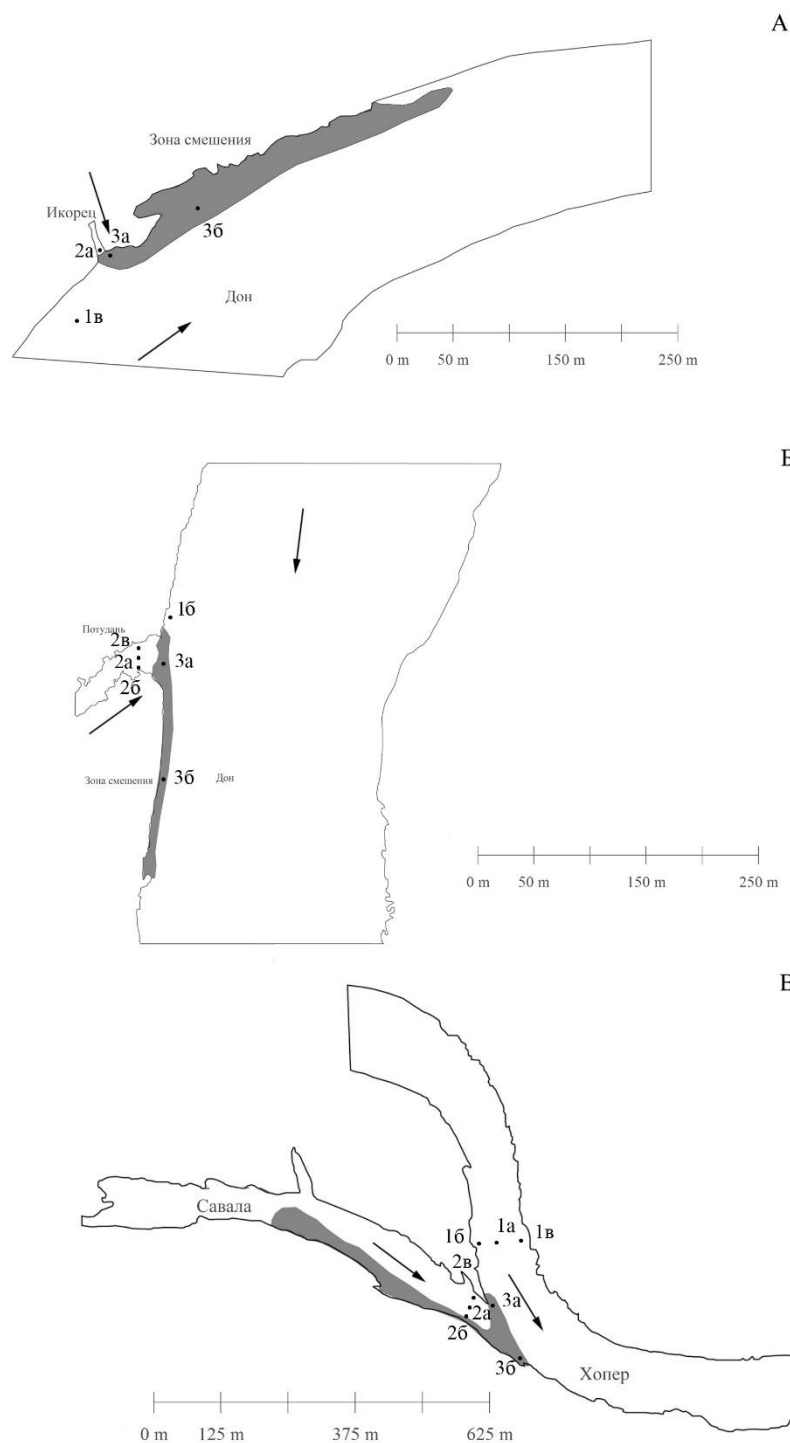
Для идентификации донных беспозвоночных использовали определители (Чекановская, 1962; Лукин, 1976; Глухова, 1979; Определитель пресноводных ..., 1994, 1995, 1997, 1999, 2001, 2004; Скворцов, 2010; Olivier, Roussel, 1983; Nasemann, Neubert, 1999; Saether et al., 2000; Timm, 2009).

На основании обобщенных многолетних данных по фаунистическому составу макрозообентоса (табл. 1) для каждого из них были выделены виды «уникальные для сообщества», к которым отнесены таковые, не встреченные в период исследований в других сообществах, а также «уникальные для узла», встречавшиеся лишь в одном из рассматриваемых узлов слияния рек. Сумма этих групп видов характеризовала фаунистическую уникальность донного населения в пределах отдельных изученных станций узлов слияния.

Для построения дендрограмм сходства видового состава использован метод одиночного присоединения на основе расчета коэффициента фаунистического сходства Брея-Кертиса в программе PAST 3.01. Расчеты проведены на основании обобщенных данных 2010–2012 гг., когда пробы отбирались на всех рассматриваемых узлах слияния рек по единой схеме.

При изучении структуры макрозообентоса анализировали общее число видов ( $n$ ), численность ( $N$ , экз./ $\text{м}^2$ ), биомассу ( $B$ , г/ $\text{м}^2$ ), биомассу фильтраторов ( $B_{\text{ф}}$ , г/ $\text{м}^2$ ). В сравнительном аспекте рассмотрено среднее за период 2010–2012 гг. видовое богатство, общая численность и биомасса сообществ.

Биомасса фильтраторов складывалась из биомассы облигатных фильтраторов (Porifera, Bryozoa, Bivalvia (за исключением Euglesidae), Simuliidae, ручейники семейств Brachycentridae, Hydropsychidae) и  $\frac{1}{2}$  биомассы факультативных фильтраторов (Euglesidae, переднежаберные Gastropoda, *Chelicorophius curvispinus* (Sars, 1895), виды рода *Chironomus*; *Glyptotendipes barbipes* (Staeger, 1839)) (Монаков, 1999).



**Рис. 1.** Схема узлов слияния рек Игорец – Дон (А), Потудань – Дон (Б), Савала – Хопер (В): 1 – водоток-приемник выше слияния с притоком, 2 – приток, 3 – зона смешения вод; а – медиаль, б – правобережная рипаль, в – левобережная рипаль.

При статистическом анализе данных проверку нормальности проводили по критерию Колмогорова–Смирнова, используя программу Excel (модуль AtteStat 12.5). Среднюю величину, ее ошибку и проверку достоверности различий (по критерию Стьюдента и F-критерию Фишера ( $p < 0.05$ )) проводили с использованием программ STATISTICA 6.0 и Excel (модуль AtteStat 12.5).

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Всего за период исследований в составе макрозообентоса изученных узлов слияния рек зарегистрировано 147 видов беспозвоночных из не менее чем 109 родов (табл. 1), относящихся к 5 типам, 8 классам, 20 отрядам, 48 семействам. Максимально разнообразным в видовом отношении оказался тип Arthropoda (97 видов, 66% фауны), в первую очередь за счет насекомых (92 вида), из которых наиболее разнообразны Diptera (62 вида, в том числе 53 – Chironomidae). Вид хирономид *Kiefferulus ten-dipediformis* (Goetghebuer, 1921), обнаруженный в зоне смешения вод рр. Икорец и Дон в 2014 г., ранее не был указан для Воронежской области и Среднерусской лесостепи в целом.

**Таблица 1.** Таксономический состав макрозообентоса исследованных узлов слияния рек

Таксоны	Савала–Хопер								Икорец–Дон				Потудань–Дон					
	1а	1б	1в	2в	2а	2б	3а	3б	1в	2а	3а	3б	1б	2в	2а	2б	3а	3б
<b>Porifera</b>																		
<i>Spongilla lacustris</i> L., 1759	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Bryozoa</b>																		
<i>Cristatella mucedo</i> (Cuvier, 1798)	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>Plumatella repens</i> (L., 1758)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+
<b>Oligochaeta</b>																		
<i>Nais bretscheri</i> Michaelsen, 1899	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Stylaria lacustris</i> (L., 1767)	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Ophidonais serpentina</i> (Müller, 1773)	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Tubifex newaensis</i> (Michaelsen, 1902)	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+
<i>Tubifex tubifex</i> (Müller, 1773)	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-
<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> Claparede, 1862	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-
<i>Limnodrilus</i> spp. (juv.)	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-
<i>Psammoryctides barbatus</i> (Grube, 1861)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-
<i>Potamothenix</i> sp.	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Eiseniella tatraedra</i> (Savigny, 1826)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Lumbricidae sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-
<b>Hirudinida</b>																		
<i>Piscicola fasciata</i> Kollar, 1842	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Erpobdella octoculata</i> (L., 1758)	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	-
<i>Helobdella stagnalis</i> (L., 1758)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+	-
<i>Placobdella costata</i> (Fr. Müller, 1846)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Glossiphonia complanata</i> (L., 1758)	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>Hemiclepsis marginata</i> (Müller, 1774)	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-
<b>Bivalvia</b>																		
<i>Pisidium amnicum</i> (Müller, 1774)	-	+	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-
<i>Pisidium inflatum</i> (Muehlfeld in Porro, 1838)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-
<i>Pisidium</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Rivicoliana</i> spp.	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-
<i>Amesoda scaldiana</i> (Normand, 1844)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
<i>Amesoda solida</i> (Normand, 1844)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Euglesidae sp.	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Dreissena polymorpha</i> (Pallas, 1771)	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Dreissena bugensis</i> (Andrusov, 1897)	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Anodontha cygnea</i> (L., 1758)	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Anodontha stagnalis</i> (Gmelin, 1791)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
<i>Anodontha</i> sp. (juv.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Pseudanodonta complanata</i> (Rossmassler, 1835)	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Pseudanadonta</i> sp. (juv.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
<i>Crassiana crassa</i> (Philipsson, 1788)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Unio rostratus</i> Lamarck, 1799	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-
<i>Unio protractus</i> Lindholm, 1932	-	-	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>Tumidiana tumida</i> (Philipsson, 1788)	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+	-
<i>Tumidiana muelleri</i> (Rossmassler, 1836)	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Gastropoda</b>																		
<i>Theodoxus fluviatilis</i> (L., 1758)	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+
<i>Theodoxus sarmaticus</i> (Lindholm, 1901)	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	+
<i>Lytoglyphus naticoides</i> Pfeiffer, 1828	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Viviparus viviparus</i> (L., 1758)	-	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+

Таксоны	Савала–Хопер								Икорец–Дон				Потудань–Дон					
	1а	1б	1в	2в	2а	2б	3а	3б	1в	2а	3а	3б	1б	2в	2а	2б	3а	3б
<i>Cinclinna ambigua</i> (Westerlund, 1873)	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Cinclinna depressa</i> (C. Pfeiffer, 1828)	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Cinclinna klinensis</i> (Milachewitch, 1881)	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Borythenia naticina</i> (Menke, 1845)	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Bythinia tentaculata</i> (L., 1758)	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-
<i>Codiella leachi</i> (Sheppard, 1823)	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Lymnaea ovata</i> (Draparnaud, 1805)	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Crustacea</b>																		
<i>Asellus aquaticus</i> (L., 1758)	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Chelicorophium curvispinum</i> (Sars, 1895)	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+
<i>Gammarus lacustris</i> Sars, 1863	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Pontogammarus crassus</i> (Sars, 1894)	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-	+	+	+
<i>Dikerogammarus villosus</i> (Sowinsky, 1894)	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+
<b>INSECTA</b>																		
<b>Odonata</b>																		
<i>Stylurus flavipes</i> (Charpentier, 1825)	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Gomphus vulgatissimus</i> (L., 1758)	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-
<i>Orthetrum albistylum</i> (Selys, 1848)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Epitheca bimaculata</i> Charpentier, 1825	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
<i>Libellula quadrimaculata</i> L., 1758	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
<i>Platycnemis pennipes</i> (Pallas, 1771)	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
<i>Coenagrion</i> sp.	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Erythromma najas</i> (Hansemann, 1823)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Enallagma cyathigerum</i> Charpentier, 1840	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ephemeroptera</b>																		
<i>Ephemera vulgata</i> L., 1858	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-
<i>Ephoron virgo</i> (Olivier, 1791)	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-
<i>Heptagenia flava</i> Rostok, 1878	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>Caenis horaria</i> (L., 1758)	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Cloeon</i> gr. <i>Dipterum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
<b>Heteroptera</b>																		
<i>Ilyocoris cimicoides</i> (L., 1758)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-
<b>Trichoptera</b>																		
<i>Ecnomus tenellus</i> (Rambur, 1842)	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-
<i>Lype</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>Hydropsyche contubernalis</i> MacLachlan, 1865	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Hydropsyche pellucidula</i> (Curtis, 1834)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Molanna angustata</i> Curtis, 1834	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Ceraclea excisa</i> (Morton, 1904)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Ceraclea</i> sp. (pupa)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>Brachycentrus subnubilus</i> Curtis, 1834	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-
<b>Lepidoptera</b>																		
<i>Paraponyx startiotata</i> (L., 1758)	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Megaloptera</b>																		
<i>Sialis sordida</i> Klingstedt, 1932	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
<b>Coleoptera</b>																		
<i>Haliphus</i> spp. (larvae)	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
<i>Platambus maculatus</i> (L., 1758)	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Laccophilus</i> sp. (larva)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
<b>Diptera</b>																		
<b>Chironomidae</b>																		
<i>Clinotanypus nervosus</i> (Meigen, 1818)	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Clinotanypus pinguis</i> Loew, 1861	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Ablabesmyia monilis</i> (L., 1758)	+	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Procladius ferrugineus</i> Kieffer, 1918	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-
<i>Procladius choreus</i> Meigen, 1804	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	-
<i>Procladius</i> sp.	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Conchapelopia melanops</i> (Meigen, 1818)	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Zavrelinmyia</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>Eukiefferiella</i> gr. <i>Gracei</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-

Таксоны	Савала–Хопер								Икорец–Дон				Потудань–Дон					
	1а	1б	1в	2в	2а	2б	3а	3б	1в	2а	3а	3б	1б	2в	2а	2б	3а	3б
<i>Eukiefferiella</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Psectrocladius obvius</i> (Walker, 1856)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Psectrocladius</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Cricotopus</i> spp.	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Orthocladus</i> spp.	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Paracricotopus</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>Rheotanytarsus</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
<i>Cladotanytarsus</i> gr. <i>Mancus</i>	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+
<i>Tanytarsus verrali</i> Goetghebuer, 1928	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Tanytarsus medius</i> Reiss et Fittkau, 1971	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-
<i>Tanytarsus pseudolestaei</i> Shilova, 1976	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Tanytarsus</i> gr. <i>Mendax</i>	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Paratanytarsus austriacus</i> (Kieffer, 1924)	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-
<i>Paratanytarsus confusus</i> Palmen, 1960	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Paratanytarsus</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Chernovskiiia</i> ra (Ulomsky, 1941)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
<i>Robackia demereji</i> (Kruseman, 1933)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Cryptochironomus</i> gr. <i>Defectus</i>	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
<i>Endochironomus tendens</i> (F., 1775)	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Tribelos donatoris</i> (Shilova, 1974)	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Synendotendipes impar</i> (Walker, 1856)	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Glyptotendipes barbipes</i> (Staeger, 1839)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-
<i>Glyptotendipes glaucus</i> (Meigen, 1818)	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-
<i>Glyptotendipes cauliginellus</i> (Kieffer, 1913)	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-
<i>Polypedilum scalaenum</i> (Schränk, 1803)	-	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+
<i>Polypedilum</i> gr. <i>Nubeculosum</i>	-	+	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-
<i>Polypedilum</i> gr. <i>Convictum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Polypedilum</i> sp.	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Microtendipes</i> gr. <i>Pedellus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-
<i>Paratendipes</i> gr. <i>Albimanus</i>	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-
<i>Parachironomus</i> группы <i>frequens</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Microchironomus tener</i> (Kieffer, 1918)	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Dicrotendipes nervosus</i> (Staeger, 1839)	+	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Lipiniella moderata</i> Kalugina, 1970	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Lipiniella</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Cryptotendipes</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
<i>Stictochironomus</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Kiefferulus tendipediformis</i> (Goetghebuer, 1921)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Einfeldia</i> spp.	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Chironomus melanotus</i> Keyl, 1961	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+
<i>Chironomus pseudothummi</i> Strenzke, 1959	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
<i>Chironomus cingulatus</i> Meigen, 1830	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Chironomus obtusidens</i> Goetghebuer, 1921	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Chironomus</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
<b>Прочие Nematocera</b>																		
<i>Palpomyia lineata</i> (Meigen, 1804)	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Mallochohelea setigera</i> (Loew, 1864)	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>Probezzia seminigra</i> (Panzer, 1798)	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
<i>Sphaeromyia</i> sp.	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Simuliidae sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Anopheles</i> aff. <i>maculipennis</i> Meigen, 1818	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
<i>Chaoborus flavicans</i> (Meigen, 1818)	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Monophilus griseus</i> (Meigen, 1804)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<b>Brachycera</b>																		
Muscidae sp. (pupa)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>ВСЕГО ВИДОВ:</b>	<b>7</b>	<b>39</b>	<b>13</b>	<b>23</b>	<b>13</b>	<b>22</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>23</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>35</b>	<b>21</b>	<b>29</b>	<b>17</b>	<b>21</b>	<b>29</b>	<b>20</b>

За весь период исследований наибольшее число видов (83) отмечено для узла слияния рек Савала-Хопер, несколько меньше – Подудань – Дон (81), минимальное число – Икорец – Дон (61). Если рассматривать отдельные станции, то максимальным видовым богатством (39 видов) характеризуется

макрозообентос правобережной рипали р. Хопер перед впадением Савалы (ст. 1б); также весьма богаты в видовом отношении (35 видов) донные зооценозы нижней границы зоны смешения вод рр. Икорец и Дон (ст. 3б). Среди обследованных станций зоны контакта рр. Потудань и Дон наибольшим видовым богатством отличается левобережная рипаль р. Потудань (ст. 2в) и верхняя граница зоны смешения вод притока и приемника (ст. 3а), где зарегистрировано по 29 видов макро-беспозвоночных.

**Узел слияния рек Савала и Хопер.** Река Савала – правый и самый крупный приток р. Хопер, впадающий в 315 км от ее устья (Дмитриева, 2008). Дно песчаное, в устьевой части с примесью гравия, ширина русла  $\leq 60$  м, глубина  $\leq 5$  м; температура воды  $25.9^{\circ}\text{C}$ , электропроводность  $1270 \text{ мкСм/см}$ , скорость течения  $0.02 \text{ м/с}$ , основной тип зарастания макрофитами – вдольбереговой с проективной площадью зарастания  $\leq 20\%$ , в устьевой части доходящей до  $80\%$ .

Река Хопер выше впадения р. Савала характеризуется песчаным дном, ширина русла  $\leq 80$  м, глубина  $\leq 1.5$  м, температура воды  $21.1^{\circ}\text{C}$ , электропроводность  $810 \text{ мкСм/см}$ , скорость течения  $0.3 \text{ м/с}$ , тип зарастания макрофитами – вдольбереговой с очень малой проективной площадью покрытия.

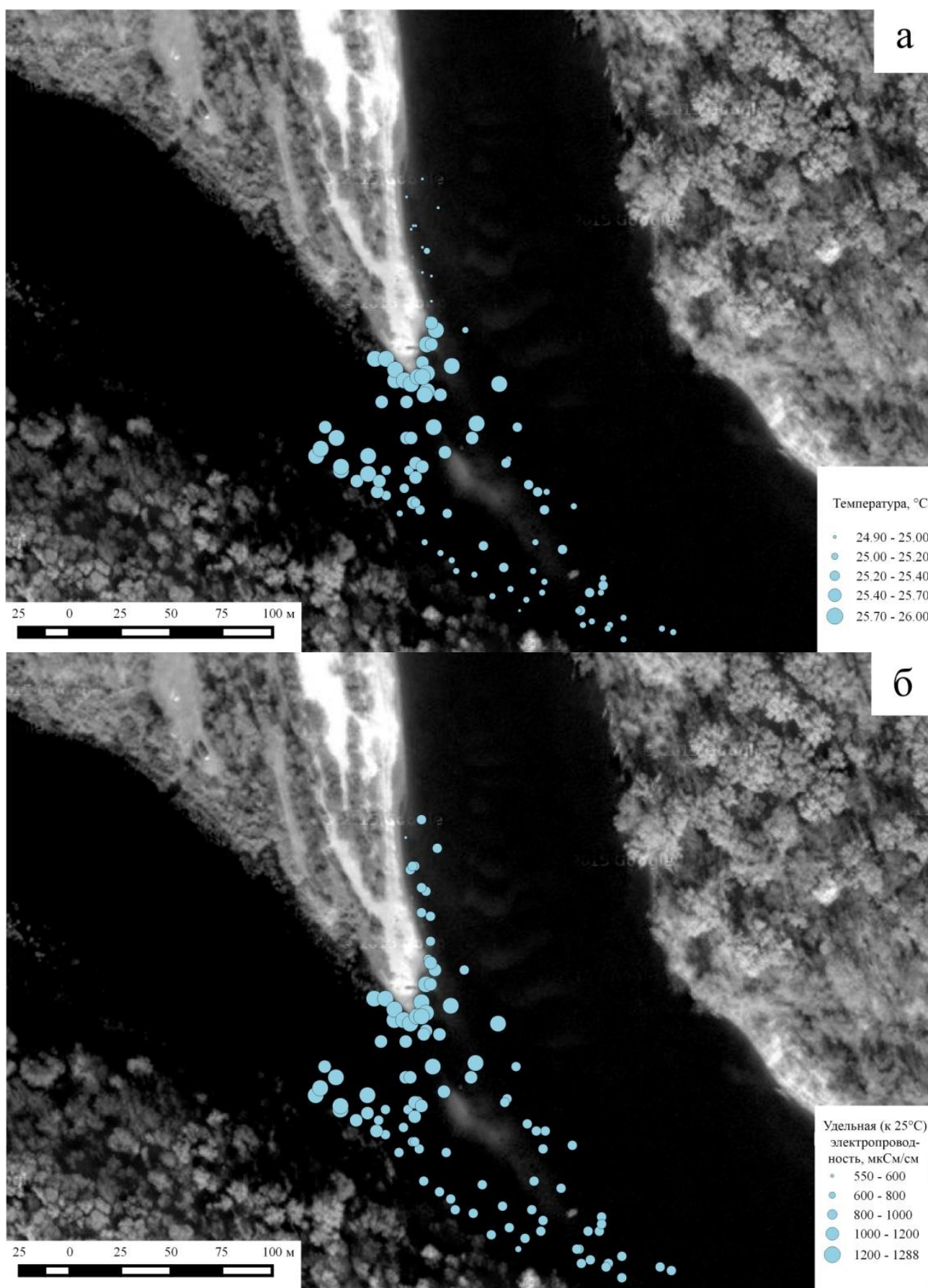
Савала берет свое начало с Окско-Донской равнины, а Хопер с Приволжской возвышенности. В месте слияния с правого берега они вплотную подходят к Калачской возвышенности, где в геологическом плане преобладают верхнемеловые и палеогеновые породы (мел, мергель, глины, пески, песчаники). Благодаря этому, в узле слияния во время половодий и паводков не происходит сильного затопления и залития поймы. Малые скорости течения и большие глубины притока способствуют проникновению вод р. Хопер в р. Савала. При этом зона смешения вод тяготеет к правому берегу притока и обнаруживалась узкой полосой шириной  $1.5\text{--}2.0$  м (рис. 1В). В центре зоны смешения преобладали циклонические течения. Чем ближе к левому берегу, тем меньше был вклад смешанных вод рек Савала и Хопер и большее влияние оказывали воды Савалы. Уже на середине русла (при глубинах  $> 1$  м), обнаруживались воды притока с электропроводностью максимально приближенной к водам Савалы ( $1224\text{--}1248 \text{ мкСм/см}$ ) (рис. 2а, 2б). Зона смешения вод этих двух рек была протяженностью  $\sim 350$  м. В непосредственном контакте вод галоклин вод достигал  $100 \text{ мкСм/см}$  –  $880$  на поверхности и  $980 \text{ мкСм/см}$  у дна (на глубине  $4.5$  м).

В 2014 г. на слияния была проведена съемка при помощи доплеровского профилографа Sontek MiniADP (рис. 3). В р. Хопер выше слияния рек максимальные скорости течения приурочены к левому берегу, где расположено основное русло. Здесь потоки воды могут достигать  $0.61 \text{ м/с}$  со средними показателями по интегральным характеристикам  $0.4 \text{ м/с}$ . Над русловыми грядами скорости течения также, как и в основном русле, высоки (до  $0.43 \text{ м/с}$ ). Ниже по течению (18:36) обнаруживаем два русловых потока глубиной около  $4$  м, с максимумом течения над русловой грядой. Выработка такого профиля связана с действием как основной реки, так и притока. На следующем галсе видны узкое не глубокое русло и обширная мелкая песчаная коса. В первые годы исследований (2010 г.) она была не так сильно выражена – значительно меньше и проход над ней был глубже. На космических снимках за разные года хорошо видно ее развитие (рис. 4).

В самой Савале, в узле слияния и выше его, происходит выполаживание песчаных склонов русла реки в результате действия денудационного выноса аллювия и коренных пород в Хопер. Сама же река выше влияния вод Хопра представляет собой корытообразное русло с резким свалом у глинистых берегов.

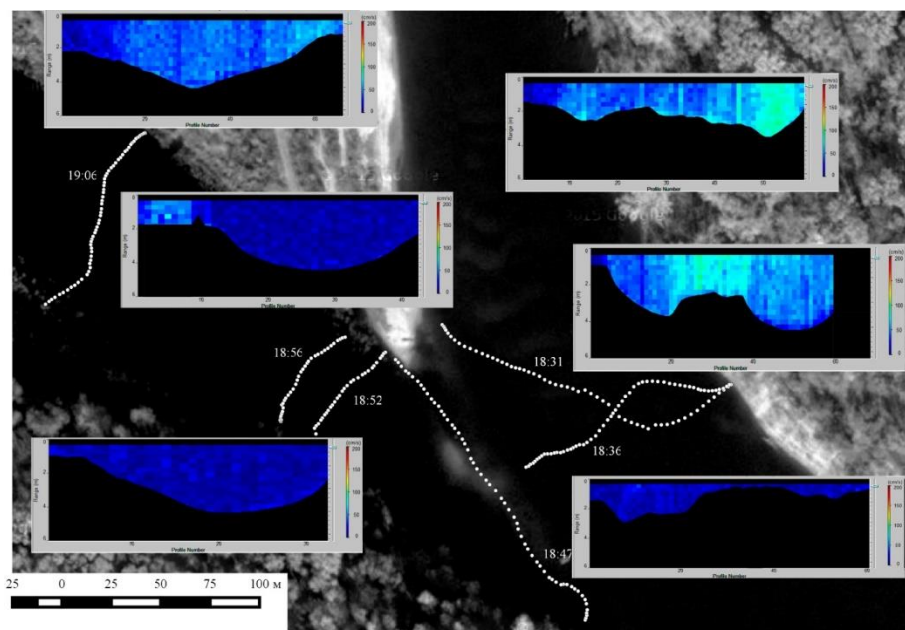
Отмечен низкий уровень сходства макрозообентоса исследованных участков (рис. 5), при минимальном сходстве левобережной рипали р. Хопер (ст. 1в) с прочими. Эта станция находится в зоне максимальных скоростей течения и постоянных обвалов коренного берега. Относительно самостоятельный кластер формируют фаунистические комплексы зоны смешения вод (станции 2б, 3а, 3б) и правобережной рипали р. Хопер, которые характеризуются замедленным течением и илисто-песчаными грунтами. В дальнейшем к этой группе примыкают зооценозы, формирующиеся в условиях более выраженного течения и преобладания песчаных грунтов – левобережной рипали р. Савала (ст. 2в), медиали рр. Хопер и Савала (станции 1а, 2а).

Наиболее уникальны в фаунистическом отношении ( $46.1\%$  видов) сообщества рипали р. Хопер (станции 1б, 1в), наименее – медиали р. Савала (ст. 2а) и нижней границы смешения вод (ст. 3б). В медиальных сообществах (станции 1а, 2а) отсутствуют виды, уникальные для данного узла слияния (рис. 6), так что их своеобразие поддерживается лишь видами, характерными именно для этих сообществ.

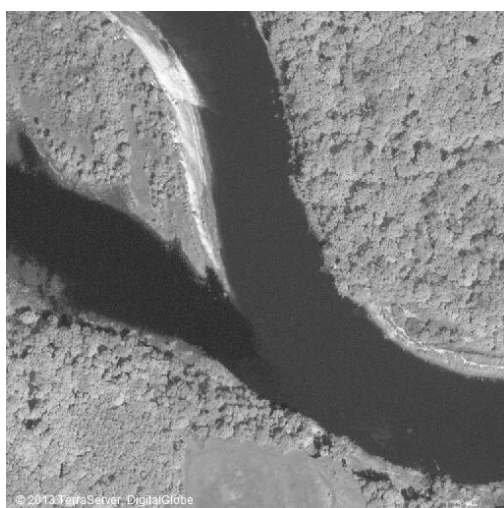


**Рис. 2.** Узел слияния Савала – Хопер. Съемка кондуктометром Марк 603. а – температура, б – удельная электропроводность.

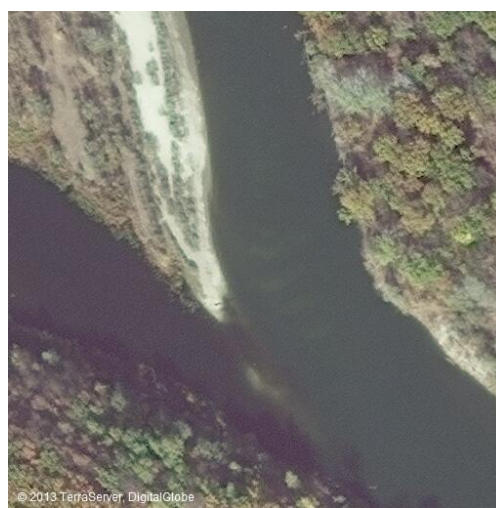




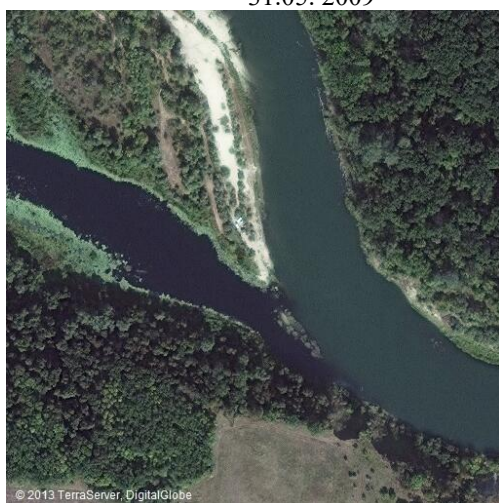
**Рис. 3.** Съемка узла слияния Савала – Хопер доплеровским профилографом. Направления съемок: 18:31 с правого на левый берег, 18:36 с левого на правый, 18:47 с правого на левый, 18:52 с правого на левый, 18:56 с правого на левый, 19:06 с правого на левый.



31.05. 2009

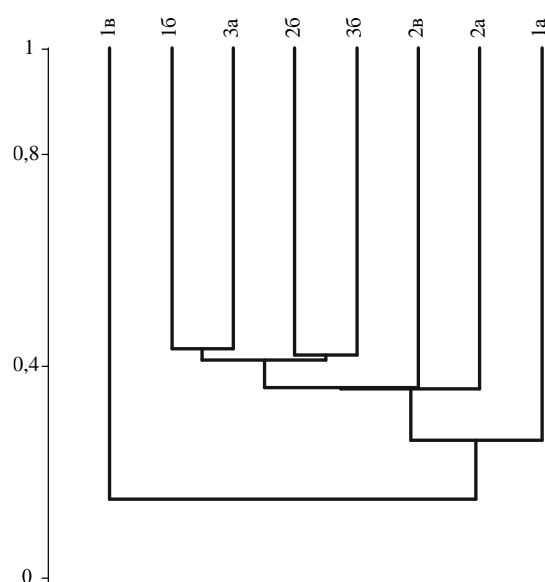


09.10. 2014

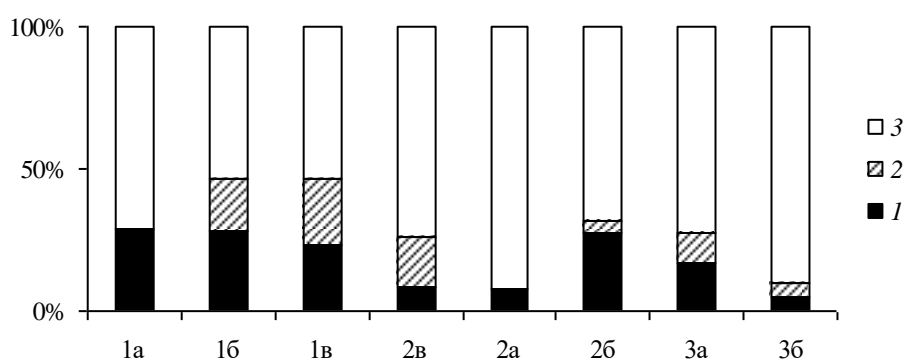


04.09. 2015

**Рис. 4.** Развитие песчаной косы в узле слияния Савала – Хопер.



**Рис. 5.** Фаунистическое сходство макрозообентоса узла Савала – Хопер.



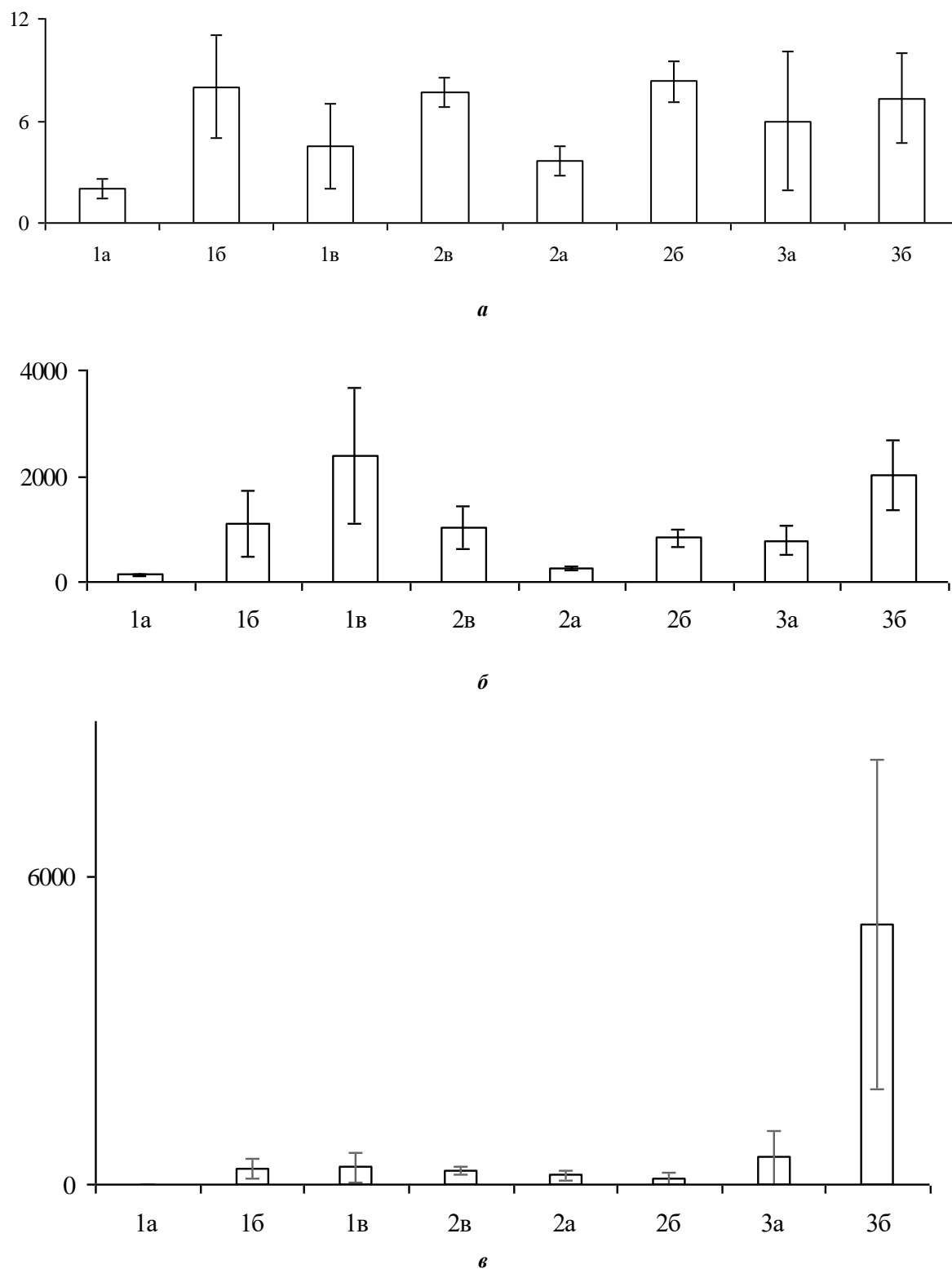
**Рис. 6.** Фаунистическая уникальность донного населения в пределах узла Савала – Хопер. Обозначения: 1 – уникальные для сообщества, 2 – уникальные для узла, 3 – прочие виды.

Достоверных различий в видовом богатстве макрозообентоса отдельных биотопов не выявлено (рис. 7а). Максимальный разброс этого показателя (табл. 2) наблюдается в наиболее динамичных условиях – рипали р. Хопер (станции 1б, 1в) и зоне смешения вод (станции 3а, 3б), которые были подвержены ежегодным изменениям уровня режима р. Хопер.

**Таблица 2.** Видовое богатство, численность и биомасса макрозообентоса узла Савала – Хопер

Показатель	Год	Станции							
		1а	1б	1в	2в	2а	2б	3а	3б
<i>n</i>	2009	-	-	-	17	6	9	4	-
	2010	3	10	-	6	4	10	14	12
	2011	2	12	7	8	5	6	3	7
	2012	1	2	2	9	2	9	1	3
	2014	-	-	-	-	4	-	8	-
<i>N</i>	2009	-	-	-	800	260	420	160	-
	2010	140	360	-	120	140	520	880	2280
	2011	150	2850	4600	850	350	700	1400	3500
	2012	100	50	150	2100	300	1300	50	250
	2014	-	-	-	-	200	-	600	-
<i>B</i>	2009	-	-	-	153.4	4.3	586.5	56.3	-
	2010	5.5	217.7	-	351.0	343.5	2.2	9.4	11482.3
	2011	0.9	672.6	923.1	352.3	12.9	333.9	1570.1	1631.0
	2012	0.3	0.1	0.5	91.5	203.1	8.7	0.1	2094.9
	2014	-	-	-	-	254.9	-	20.05	-

Минимальными значениями среднегогодовой общей численности макрозообентоса достоверно отличаются сообщества медиали притока и приемника (станции 1а, 2а), развивающиеся в условиях максимальных скоростей течения. На остальных участках численность донных макробеспозвоночных достоверно не различалась (рис. 7б). Необходимо отметить, что наибольшим межгодовым разбросом значений общей численности (табл. 2, рис. 7б) характеризуются сообщества рипали р. Хопер (станции 1б, 1в) и нижней границы зоны смешения вод (ст. 3б), где макрозообентос достоверно многочисленнее, чем на верхней границе зоны (ст. 3а), характеризующейся менее стабильными гидрологическими условиями.



**Рис. 7.** Среднегогодовые показатели макрозообентоса узла Савала – Хопер: а – видовое богатство; б – общая численность, экз./м²; в – общая биомасса, г/м².

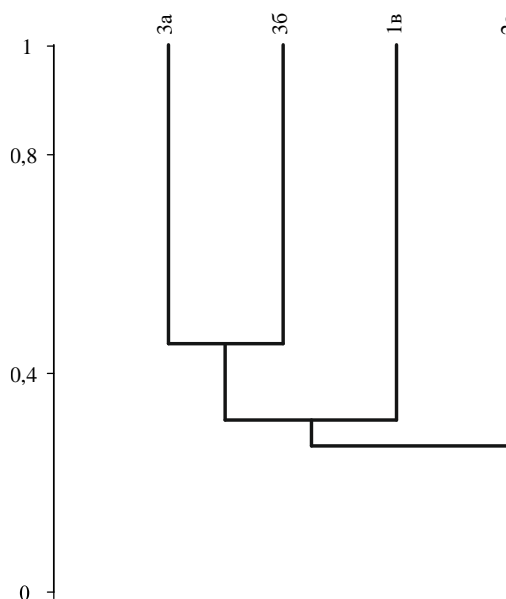
Максимальные среднесуточные значения общей биомассы макрозообентоса (рис. 7в) отмечены на нижней границе зоны смешения вод (ст. 3б), где в благоприятных стабильных условиях развиваются комплексы крупных фильтраторов – Unionidae.

**Узел слияния рек Потудань и Дон.** Река Потудань – правый приток р. Дон, впадающий в него в 1316 км от устья (Дмитриева, 2008). Дно песчано-гравийное (песчаный мел), ширина русла  $\leq 10$  м, глубины  $\leq 1.5$  м; температура воды до впадения в Дон  $19.8^{\circ}\text{C}$ , электропроводность 743 мкСм/см, скорость течения 0.3–1.0 м/с, основной тип зарастания макрофитами – вдольбереговой с проективной площадью зарастания до 10%. На перекатах зарастание сплошное по всему стрежню течения.

Река Дон выше впадения р. Потудань характеризуется песчаным дном, ширина русла  $\leq 150$  м, глубина  $\leq 1.2$  м, температура воды  $24.4^{\circ}\text{C}$ , электропроводность 436 мкСм/см, скорость течения 0.38 м/с, тип зарастания макрофитами – вдольбереговой с малой проективной площадью покрытия.

Зона смешения вод этих двух рек представляла собой длинный узкий язык длиной  $\sim 130$ –140 м, тянувшийся вдоль правого берега р. Дон (рис. 1б), фактически сплошь заросший рдестом. Температура воды в зоне смешения постепенно увеличивалась вниз по течению приемника с  $22.9$  до  $23.4^{\circ}\text{C}$ . Скорость течения непосредственно в контактной зоне 0.16 м/с. Наиболее резкие перепады электропроводности (от 683 до 600 мкСм/см) наблюдались на протяжении первых 10 м зоны смешения. Через 90 м, вследствие разбавления менее минерализованными водами р. Дон, электропроводность воды снижалась до 566 мкСм/см.

Максимальным сходством (рис. 8) отличались фаунистические комплексы левобережной рипали р. Потудань (ст. 2в) и верхней границы зоны смешения вод (ст. 3а), где течение замедлено и отлагаются илистые грунты. Относительно высокое сходство отмечено между зооценозами рипали р. Дон перед впадением Потудани и на нижней границе зоны смешения с ее водами (станции 1б, 3б), формирующиеся на глинистых грунтах крутого берега р. Дон в условиях сильного течения.



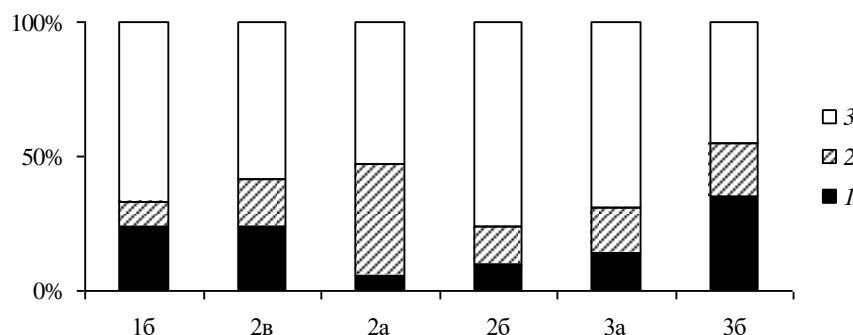
**Рис. 8.** Фаунистическое сходство макрозообентоса узла Потудань – Дон.

Наибольшим фаунистическим своеобразием (55% видов) характеризуется макрозообентос нижней границы смешения вод (ст. 3б), минимальным – правобережной рипали р. Потудань (ст. 2б), где доля уникальных видов составляет 23.8% (рис. 9). Высокая доля уникальных видов ( $>40\%$ ) в составе макрозообентоса левобережной рипали р. Потудань (ст. 2в) определяется в первую очередь видами уникальными для этого сообщества, а в медиали притока (ст. 2а) – уникальными для данного узла слияния (рис. 9).

Отдельный кластер образуют правобережная рипаль и медиаль р. Потудань (станции 2а, 2б), где сообщества донных животных формируются под стрессирующим воздействием сильного течения, приводящего к эрозии коренного берега и переотложению грунтов в медиали. Таким образом, наиболее сходными по видовому составу макрозообентоса оказываются участки сходные по скорости течения и типу грунта.

Минимальным видовым богатством достоверно отличается макрозообентос медиали притока (ст. 2а), который развивается в условиях максимальных скоростей течения на бедных органикой промытых грунтах. Значения видового богатства макрозообентоса прочих станций варьируют в сходных

пределах (табл. 3, рис. 10а), с наибольшей амплитудой межгодовых изменений в левобережной рипали притока (ст. 2в) и зоне смешения вод (станции 3а, 3б), испытывающих значительные межгодовые изменения гидрологических параметров.



**Рис. 9.** Фаунистическая уникальность донного населения в пределах узла Потудань – Дон. Обозначения: 1 – уникальные для сообщества, 2 – уникальные для узла, 3 – прочие виды.

**Таблица 3.** Видовое богатство, численность и биомасса макрозообентоса узла Потудань – Дон

Показатель	Год	Станции					
		16	2в	2а	2б	3а	3б
<i>n</i>	2009	-	-	5	10	36	-
	2010	4	19	3	10	15	18
	2011	8	4	2	4	5	4
	2012	5	6	1	11	1	3
<i>N</i>	2009	-	-	160	740	3580	-
	2010	180	1520	60	600	980	1180
	2011	950	300	150	300	400	450
	2012	1050	1050	50	1750	50	350
<i>B</i>	2009	-	-	150.7	34.7	1727.9	-
	2010	0.2	34.3	2.9	4.8	278.2	649.9
	2011	4497.1	770.8	1357.9	233.0	4.0	475.1
	2012	1358.9	1338.7	0.2	775.1	0.2	0.6

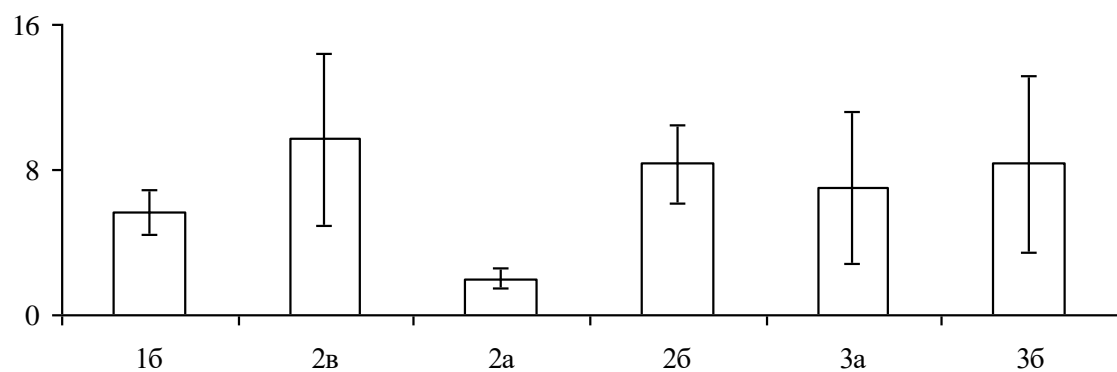
Минимальной общей численностью достоверно отличается (табл. 3, рис. 10б) макрозообентос медиали притока (ст. 2а), который характеризуется также и минимальным видовым богатством (рис. 10а). В остальных биотопах общая численность макрозообентоса имеет близкие значения, отличаясь наибольшими межгодовыми колебаниями в рипали притока (станции 2б, 2в).

По значениям среднеегодовой общей биомассы макрозообентоса не выявлено сообществ, достоверно выделяющихся из ряда обследованных в пределах данного узла (рис. 10в). Однако можно отметить, что биомасса макрозообентоса верхней границы зоны смешения вод (ст. 3а) достоверно ниже (табл. 3, рис. 10в), чем в рипали р. Дон выше впадения притока (ст. 1б) и левобережной рипали р. Потудань (ст. 2в).

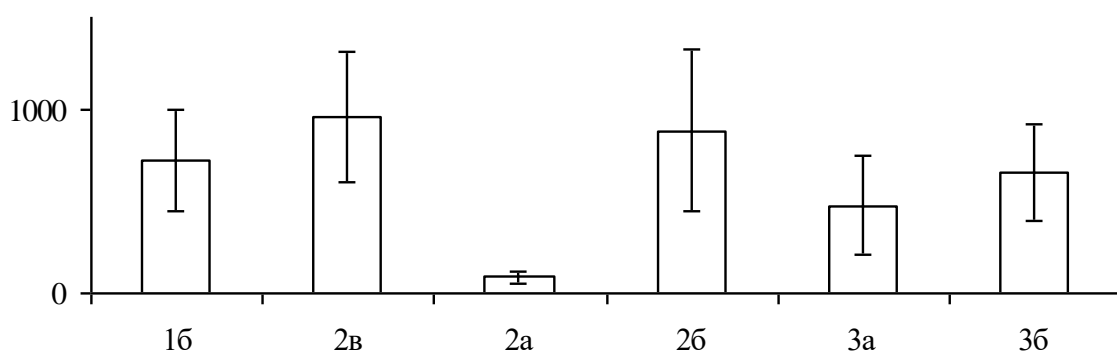
**Узел слияния рек Игорец и Дон.** Река Игорец – левый приток р. Дон, впадающий в него в 1267 км от устья (Дмитриева, 2008). Дно песчаное, ширина русла  $\leq 5$  м, глубины  $\leq 1.5$  м, температура воды до впадения в Дон  $25.3^{\circ}\text{C}$ , электропроводность 910 мкСм/см, скорость течения 0.52 м/с, тип зарастания макрофитами – вдольбереговой с проективной площадью зарастания  $\leq 10\%$ .

Река Дон выше впадения р. Игорец характеризуется песчаным дном, ширина русла  $\leq 135$  м, глубина  $\leq 1.2$  м, температура воды  $25.8^{\circ}\text{C}$ , электропроводность 467 мкСм/см, скорость течения 0.44 м/с, тип зарастания макрофитами – вдольбереговой с малой проективной площадью покрытия.

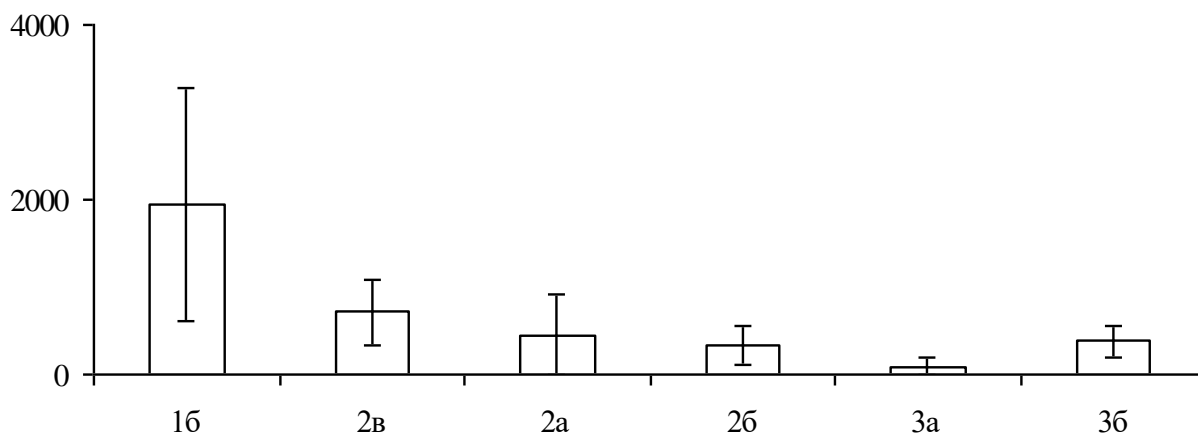
Протяженность зоны смешения рек Дон и Игорец  $\sim 210$  м (рис. 1А), скорость течения 0.15 м/с, электропроводность 874 мкСм/см на поверхности и 806 мкСм/см у дна. На верхней границе зоны смешения ( $\text{ЕС} = 724\text{--}756$  мкСм/см) четко выделялся участок активной седиментации протяженностью  $\sim 45$  м, на котором происходило массовое развитие высших водных растений. К нижней границе электропроводность воды уменьшалась до 603 мкСм/см на всех горизонтах. Наибольшие изменения электропроводности (от 724 до 870 мкСм/см) наблюдались на протяжении первых 10 м зоны слияния. В самом начале зоны смешения разница между поверхностью и дном доходила до 70 мкСм/см, но ниже по течению (к началу зоны седиментации) воды постепенно перемешивались.



*a*



*б*



*в*

**Рис. 10.** Среднемноголетние показатели макрозообентоса узла Потудань – Дон: *a* – видовое богатство; *б* – общая численность, экз./м<sup>2</sup>; *в* – общая биомасса, г/м<sup>2</sup>.

По сходству фауны (рис. 11), выделяется зона смешения вод (станции 3а, 36), где вследствие столкновения струй воды рр. Икорец и Дон течение замедлено и отлагаются мелкие песчано-илистые грунты. К этому кластеру примыкает зооценоз р. Дон выше впадения притока (ст. 1в), что свидетельствует о преимущественном формировании фаунистических комплексов зоны смешения вод за счет таковых приемника. По фаунистическому составу макрозообентос медиали р. Икорец (ст. 2а), где на

сильном течении отлагаются промытые крупно-песчаные грунты со значительной примесью ракуши, наименее сходен с прочими изученными сообществами.

В пределах данного узла слияния рек макрозообентос характеризуется высоким уровнем фаунистической уникальности (рис. 12), который превышает 43% в рипали р. Дон (ст. 1в) в первую очередь за счет видов, уникальных именно для этого сообщества, а на нижней границе зоны смешения вод (ст. 3б) – за счет видов, уникальных для этого узла; достигает максимума (56.2%) в «медиали» р. Икорец (ст. 2а). Минимальной фаунистической уникальностью (22.2%) характеризуется макрозообентос верхней границы зоны смешения вод (ст. 3а).

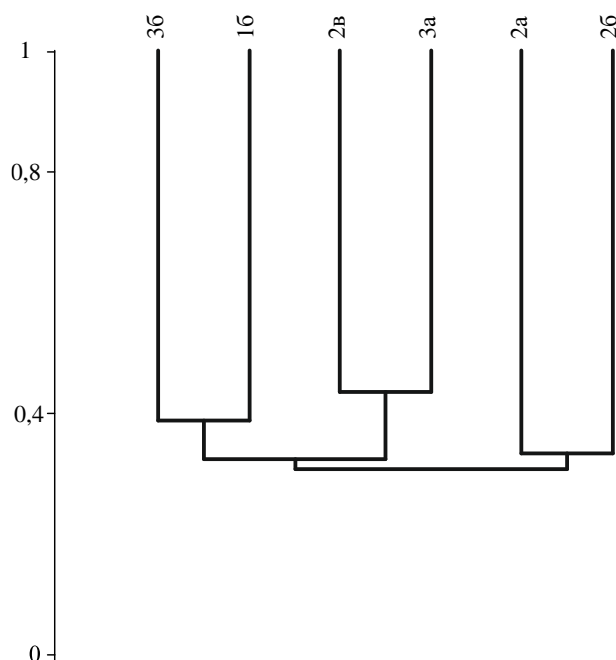


Рис. 11. Фаунистическое сходство макрозообентоса узла Икорец – Дон.

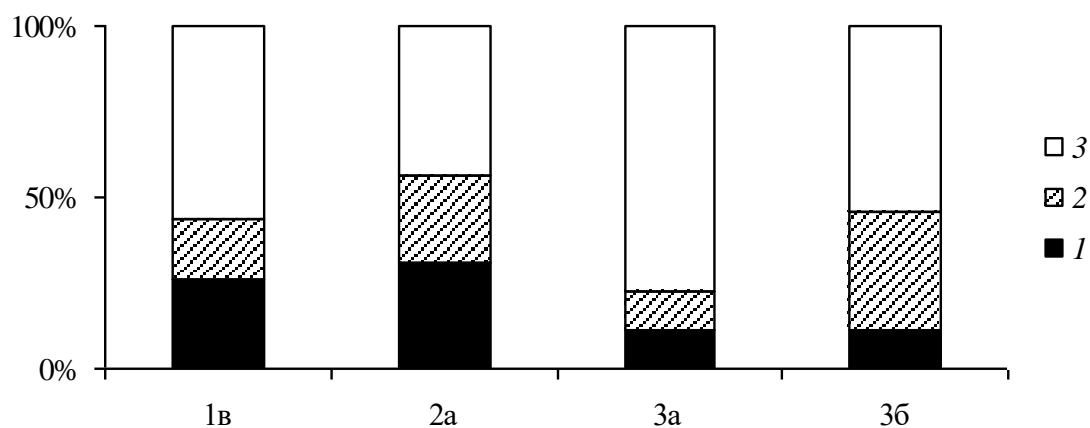
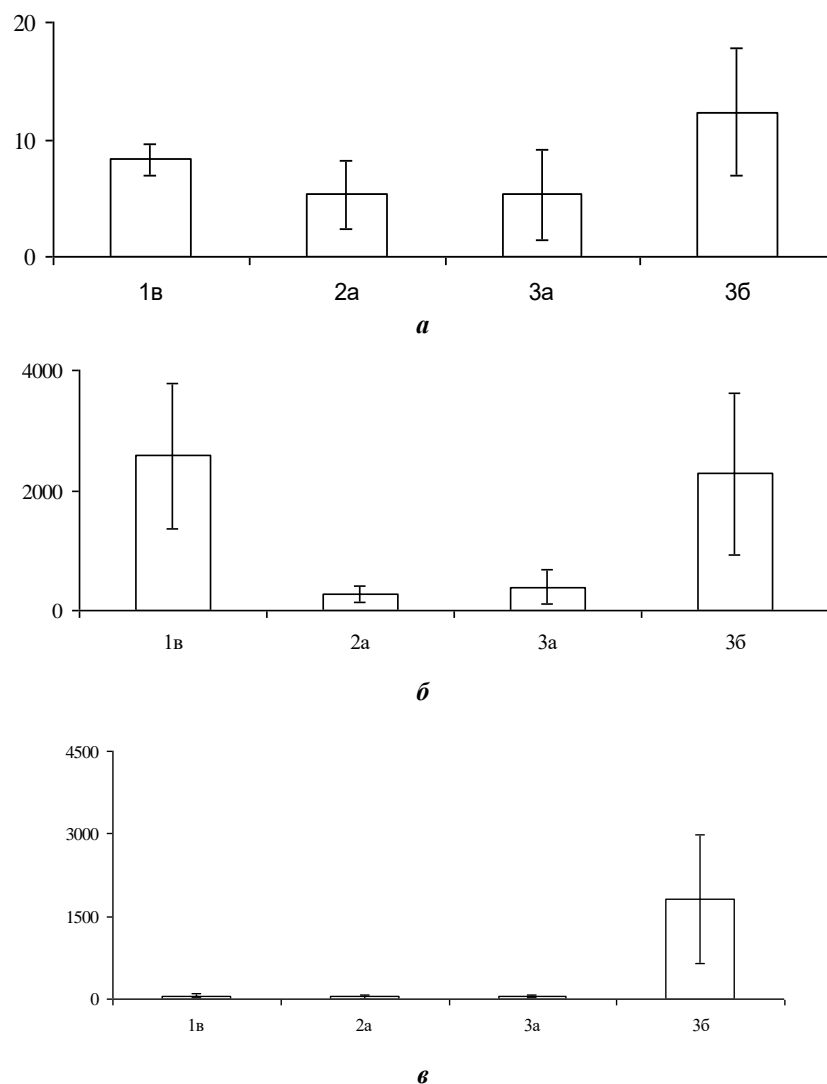


Рис. 12. Фаунистическая уникальность донного населения в пределах узла Икорец – Дон. Обозначения: 1 – уникальные для сообщества, 2 – уникальные для узла, 3 – прочие виды.

Достоверных различий видового богатства макрозообентоса отдельных биотопов данного узла слияния не выявлено (рис. 13а). По значениям общей численности макрозообентоса достоверно отличаются друг от друга две пары биотопов (рис. 13б). В первую входят многочисленные рипаль р. Дон выше впадения притока (ст. 1в) и нижняя граница зоны смешения вод (ст. 3б) (табл. 4), которые формируются на основе донской фауны, где значительную роль играют ракообразные *Chelicorophium curvispinum*. Вторую группу образуют малочисленные сообщества «медиали» р. Икорец (ст. 2а) и верхней границы смешения вод (ст. 3а), формирующиеся в нестабильных гидрологических условиях.



**Рис. 13.** Среднегодовые показатели макрозообентоса узла Икорец – Дон: *а* – видовое богатство; *б* – общая численность, экз./м²; *в* – общая биомасса, г/м².

**Таблица 4.** Видовое богатство, численность и биомасса макрозообентоса узла Икорец – Дон

Показатель	Год	Станции			
		1в	2а	3а	3б
<i>N</i>	2009	-	5	9	-
	2010	11	10	13	23
	2011	7	6	1	5
	2012	7	0	2	9
<i>N</i>	2009	-	220	800	-
	2010	4920	380	980	4940
	2011	900	450	50	600
	2012	1900	0	150	1300
<i>B</i>	2009	-	6.5	569.6	-
	2010	37.0	106.8	16.5	630.4
	2011	131.7	16.0	112.0	4153.1
	2012	2.7	0	41.6	644.7

Наиболее обильно по общей биомассе макрозообентоса сообщество нижней границы зоны смешения вод (ст. 3б) (табл. 4), где в различные годы основной вклад вносили моллюски – *Bivalvia*, либо *Gastropoda*. Остальные сообщества в этот период достоверно уступают ему по значениям биомассы (рис. 13в).



## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Большинство исследований гидрофизических и биологических показателей устьевых областей рек и участков смешения разнотипных водных масс проведено на примере областей слияния континентальных и морских вод (Михайлов, 1997, 1998). Известные классификации узлов слияния рек (Никитина, Чалов, 1988; Маорс, 1995) не применимы к малым и средним рекам, расходы которых зачастую  $< 100 \text{ м}^3/\text{с}$ , а также к равнинным рекам с относительно мягкими подстилающими породами.

Полученные ранее данные (Крылов и др., 2010; Болотов и др., 2012; Прокин, Цветков, 2013) указывают на то, что при классификации узлов слияния рек необходимо учитывать ряд показателей: скорость течения в приемнике и притоке, расположение зоны смешения – в главной реке или в притоке, явление переуглубления при образовании дельты выполнения. Эти факторы, на наш взгляд, влияют на самый показательный и интересный участок узла слияния рек – зону смешения притока и приемника.

Известно, что при столкновении двух потоков с различными скоростями течения и плотностями воды увеличивается турбулентность, в результате чего происходит уменьшение скорости течения и осаждение неорганических и органических взвесей (Алексеевский, 1998). В начале этого совместного потока на верхней границе зоны смешения осаждаются более крупные неорганические частицы, в конце на нижней границе зоны – самые мелкие неорганические и органические (Лидер, 1986), к усвоению которых наиболее приспособлены фильтраторы.

Благодаря развитию фильтраторов, среди которых наибольшую долю составляют двустворчатые моллюски сем. Unionidae, предпочитающие частицы размером до 300 мкм (Монаков, 1998), на нижних границах зон смешения вод притоков и приемников часто формируются сообщества отличающиеся максимальной биомассой (Прокин, Цветков, 2013).

Максимальная биомасса макрозообентоса, формировавшаяся за счет моллюсков на нижней границе зоны смешения вод (ст. 36) наблюдалась в 2010–2011 гг. для узла Савала – Хопер, в 2010 г. для узла Потудань – Дон, во все годы исследований для узла Икорец – Дон (табл. 2–4).

Рассмотрение участия фильтраторов в формировании биомассы всех обследованных сообществ в 2010–2012 гг. показало, что они часто составляют более 50% данного показателя (рис. 14). Высокая доля фильтраторов в целом не типична для медиальных сообществ, хотя может наблюдаться в случае замедленного течения и высокой степени зарастания макрофитами (р. Савала во все годы исследований), или в аномально жаркие годы (р. Потудань, 2010–2011 гг.) (рис. 14).

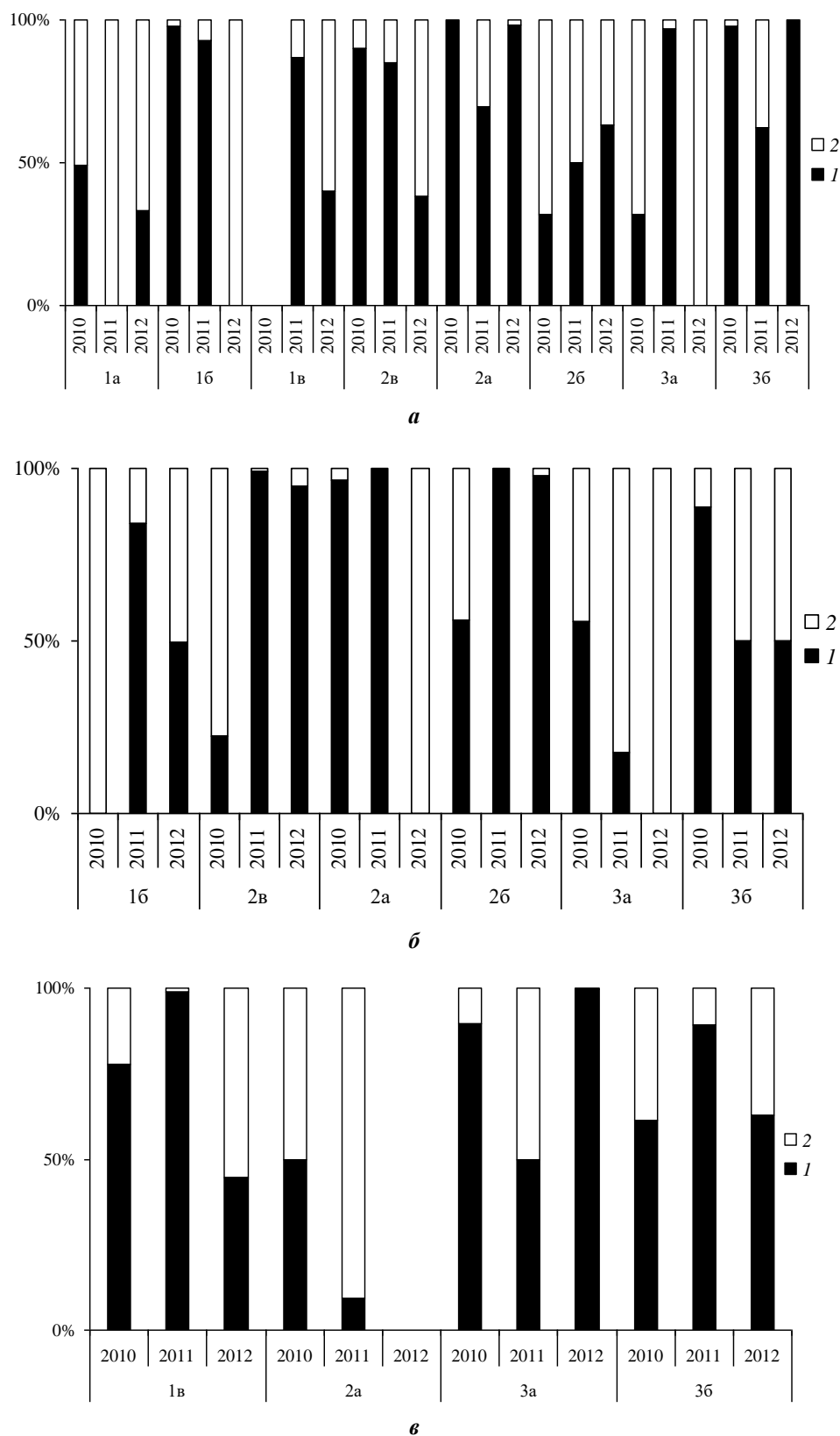
На основании полученных данных для узла Савала – Хопер можно констатировать, что в зонах наиболее высокой турбулентности (верхняя граница зоны смешения вод), при максимальных скоростях течения (медиаль р. Хопер) и при периодических нарушениях (например, высокое половодье в р. Хопер в 2012 г., разрушившее донные зооценозы приемника и зоны контакта вод), Bivalvia не достигают высоких показателей обилия, уступая место по биомассе Gastropoda, а по численности, кроме того, Oligochaeta, Chironomidae и прочим Arthropoda.

Максимальные показатели обилия бентоса на нижней границе зоны смешения вод рек Савала и Хопер (ст. 36) в 2010–2012 г. определяются, вероятно, оптимальным гранулометрическим составом седиментов в условиях умеренной скорости течения.

Кроме того, важную роль может играть весеннее половодье, когда устьевая область Савалы и, в том числе, верхняя граница зоны смешения, оказывается в условиях усиливающейся турбулентности потоков притока и приемника, что неблагоприятно для устойчивого развития сообществ Unionidae (Прокин, Цветков, 2013). В годы максимального половодья (2012 г.) оно может негативно сказываться и на всех донных зооценозах приемника, в то время как в рипали притока сохраняются относительно богатые в видовом отношении и многочисленные сообщества. Однако, эти сообщества всегда уступают по биомассе сообществам приемника и зоны смешения вод, из-за отсутствия Unionidae в условиях низких скоростей течения, мягких грунтов и высокой степени зарастания макрофитами. Таким образом, здесь проявляется двустороннее взаимодействие притока и приемника в половодье, когда не только приток воздействует на приемник, но и наоборот, водоток-приемник оказывает влияние на формирование сообществ притока, что ранее было показано на примере донных сообществ р. Рейн и его притоков (Beckmann et al., 2005).

Донные зооценозы узла Потудань – Дон характеризовались значительной межгодовой динамикой. Резкое падение видового богатства и общей численности произошло в 2011 г. практически на всех станциях, кроме левобережной рипали р. Дон выше впадения притока. Увеличение биомассы макрозообентоса в обедненных сообществах в этот период практически всегда связано с появлением крупных Unionidae. Это позволяет предполагать отрицательное влияние на макробеспозвоночных катастрофического паводка в притоке весной 2011 г., и его участие в перераспределении Unionidae в

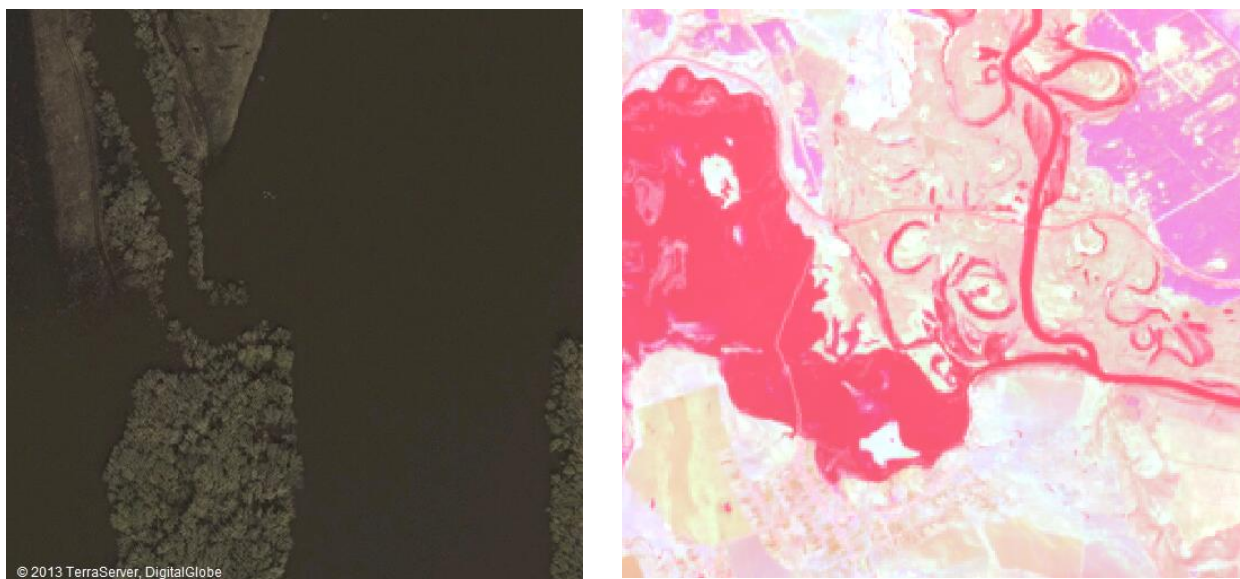
несвойственные им ранее биотопы. В то же время, нельзя исключать миграций Unionidae в более благоприятные биотопы (например, ст. 2а) в период аномальной летней жары 2010–2011 гг. В 2012 г. в сообществах зоны смешения (станции 3а, 3б) продолжились негативные тенденции уменьшения видового богатства и количественных характеристик (табл. 4), тогда как в рипали притока сообщества начали восстанавливаться.



**Рис. 14.** Доля биомассы трофических групп беспозвоночных макрозообентоса узлов Савала – Хопер (а), Потудань-Дон (б), Икорец – Дон (в). Обозначения: 1 – фильтраторы, 2 – прочие трофические группы.

В течение всего периода исследований узла Икорец – Дон, включая период падения показателей в 2011–2012 гг., макрозообентос нижней границы зоны контакта (ст. 3б) характеризовался более высоким видовым богатством и количественными характеристиками, чем таковой верхней границы и медиали притока (станции 2а, 3а). Сообщества нижней границы зоны смешения вод (ст. 3б) всегда превосходили по биомассе и иногда (2010 г.) по численности рипаль приемника выше впадения притока (ст. 1в). Вероятно, на быстром течении и при высокой мутности в стрессе устьевой части реки крупные фильтраторы-униониды чувствуют себя угнетенно, тогда как в образующейся зоне контакта, наоборот, получают преимущества в фильтрации, замедляющейся при впадении в Дон воды р. Икорец. В некоторых случаях (в 2010 и 2012 г.) на нижней границе зоны смешения основу макрозообентоса составляют *Gastropoda*, что может быть обусловлено спецификой донных грунтов – выносимой из Икорца крупной ракуши, успешно заселяемой брюхоногими. Здесь также успешно развиваются *Scorphiidae*, типичные для рипали р. Дон, что определяет существование максимально разнообразных и обильных сообществ на нижней границе зоны смешения вод, даже в неблагоприятный для макрозообентоса период 2011–2012 гг.

Как указывалось выше, влияние стояния высоких вод по-разному сказывается на узел слияния и конкретно на донные сообщества. Так, если в обильное половодье узлы слияния рек с низкой поймой представляют собой единое целое (Икорец – Дон, Потудань – Дон), то узлы с высокой поймой или при близости коренного, плохо размываемого берега, разделены (рис. 15). В них лишь может увеличиваться скорость течения как в основной реке, так и в притоке. При этом время половодья в притоке наступает как правило раньше и для Савалы оно более растянуто.



**Рис. 15.** Узел слияния Потудань-Дон и Савала – Хопер во время половодья.

Ранее (Крылов и др., 2010), когда зона смешения вод рассматривалась лишь в пределах участка ее верхней границы, мы предполагали, что все они представляют собой совершенно разные варианты контактных зон, так как условия седиментации в них разные. В результате данного исследования установлено, что, несмотря на индивидуальные черты в организации отдельных узлов слияния, в ходе ослабления турбулентности смешивающихся потоков максимальное проявление “эффекта опушки” для донных биоценозов регистрируется именно на нижней границе зоны смешения вод.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В узлах слияния рек образуется зона смешения, вода которой отличается от вод притока и приемника по значениям электропроводности, температуры, режиму течений. Протяженность зоны слияния зависит от соотношения скоростей течения контактирующих водотоков. Относительно проточных участков притока и приемника в зоне смешения вод формируются специфичные по количественным характеристикам сообщества макрозообентоса, которые определяются в первую очередь стабильностью гидрологического режима и особенностями донных грунтов.

Формирование фауны сообществ зон смешения может идти: преимущественно за счет населения приемника (Икорец – Дон); на верхней границе за счет видов, характерных для притока, а на нижней – приемника (Потудань – Дон). В случае узла Савала – Хопер макрозообентос зоны смеше-

ния вод образует отдельный кластер за счет минимальной для данного узла фаунистической уникальности сообществ.

Вообще, в качественном отношении данные сообщества нельзя охарактеризовать как выделяющиеся по уникальности фаунистического состава – они слагаются преимущественно широко распространенными в регионе и в пределах узла слияния видами, доля уникальных видов здесь ниже (Савала – Хопер), на уровне (Икорец – Дон) или незначительно выше (Потудань – Дон), чем в прочих сообществах.

Минимальное видовое богатство и общая численность характерны для медиальных сообществ, развивающихся в условиях максимальных скоростей течения на бедных органикой промывных, постоянно переоткладывающихся грунтах. Наибольшей амплитудой межгодовых изменений видового богатства характеризуются сообщества, испытывающие значительные межгодовые изменения гидрологических параметров – рипаль притоков и верхние границы зон смешения вод.

Как правило, максимальной амплитудой изменения общей численности макрозообентоса отличаются наиболее многочисленные рипальные сообщества и сообщества нижней границы зоны смешения вод.

Наибольшими биомассами характеризуются сообщества донных беспозвоночных нижней границы зоны смешения вод, основу которых, как правило, составляют крупные двустворчатые моллюски сем. Unionidae. Сообщества нижней границы зон смешения рек могут играть важную роль в процессах самоочищения воды.

Необходимо дальнейшее и более подробное изучение формирования грунтовых наносов в узлах слияния рек, как на уровне их гранулометрического состава, так и на уровне сезонной динамики седиментации, в зависимости от паводкового режима и хронологии самой зоны смешения.

Авторы благодарны А.В. Крылову за обсуждение статьи, А.С. Мараеву за помощь в проведении полевых работ. Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Динамика генофондов», подпрограмма «Биологическое разнообразие».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: МГУ, 1998. 202 с. [Alekseevskiy N.I. Formirovanie i dvizhenie rechnykh nanosov. Moscow: Moscow State University, 1998. 202 pp.] In Russian
- Болотов С.Э., Цветков А.И., Крылов А.В. Зоопланктон зон слияния незарегулированных рек // Биология внутренних вод. 2012. № 2. С. 29–36. [Bolotov S.E., Tsvetkov A.I., Krylov A.V. Zooplakton of the Zones of Confluence of Unregulated Rivers // Inland Water Biology. 2012. Vol. 5, No 2. P. 184–191.]
- Виноградова О.В., Хмелева Н.В. Русловые процессы и формирование аллювиальных россыпей золота. М.: МГУ, 2009. 171 с. [Vinogradova O.V., Khmeleva N.V. Ruslovye protsessy i formirovanie allyuvial nykh rossypey zolota. Moscow: Moscow State University, 2009. 171 pp.] In Russian
- Глухова В.М. Личинки мокрецов подсемейств Palpomyinae и Ceratopogoninae фауны СССР (Diptera, Ceratopogonidae = Heleidae). Л.: Наука, 1979. 231 с. [Glukhova V.M. Lichinki mokretsov podsemeystv Palpomyinae i Seratopogoninae fauny SSSR (Diptera, Ceratopogonidae – Heleidae). Leningrad: Nauka, 1979. 231 pp.] In Russian
- Дмитриева В.А. Гидрологическая изученность Воронежской области. Каталог водотоков. Воронеж: изд.-во Воронеж. гос. ун-та, 2008. 225 с. [Dmitrieva V.A. Gidrologicheskaya izuchennost Voronezhskoy oblasti. Katalog vodotokov Voronezh: Voronezh State University, 2008. 225 pp.] In Russian
- Ермохин М.В. Проблемы и перспективы исследования краевых структур биоценозов рек и водоемов речных долин // Актуальные вопросы изучения микро-, мейозообентоса и фауны зарослей пресноводных водоемов. Н.Новгород: Вектор ТиС, 2007. С. 101–129. [Ermokhin M.V. Problemy i perspektivy issledovaniya kraevykh struktur biotsenozov rek i vodoemov rechnykh dolin // Aktualnye voprosy izucheniya mikro meyozoobentosa i fauny zarosley presnovodnykh vodoemov. N. Novgorod: Vektor–Tis, 2007. P. 101–129.] In Russian
- Крылов А.В. Зоопланктон равнинных малых рек. М.: Наука, 2005. 263 с. [Krylov A.V. Zooplankton ravninnykh malykh rek. Moscow: Nauka, 2005. 263 pp.] In Russian
- Крылов А.В., Прокин А.А., Хлызова Н.Ю., Болотов С.Э., Петрухин Ю.К. Зарастание, зоопланктон и макрозообентос низовьев притоков Дона и Хопра и зон смешения их вод на территории Воронежской области // Экология и морфология водных беспозвоночных. Махачкала: Наука ДНЦ, 2010. С. 203–244. [Krylov A.V., Prokin A.A., Khlyzova N.Yu., Bolotov S.E., Petrukhin Yu.K. Overgrowing, Zooplankton and macrozoobenthos of downstreams of tributaries of the rivers Don and Hoper, and zones mixing of their waters (Voronezh Region) // Ekologiya i morfologiya vodnykh bespozvonochnykh. Makhachkala: Nauka DNTS, 2010. P. 203–244.] In Russian
- Крылов А.В., Прокин А.А., Болотов С.Э. Особенности условий развития гидробионтов в устьевых областях притоков равнинных водохранилищ // Гидроэкология устьевых областей притоков равнинного водохранилища. Ярославль: Филигрань, 2015. С. 407–416. [Krylov A.V., Prokin A.A., Bolotov S.E. Osobennosti usloviy razvitiya gidro biontov v ustevykh oblastiakh pritokov ravninnykh vodokhranilishch // Hydroecology of lowland water reservoir tributaries' mouth. Yaroslavl: Filigran, 2015. P. 407–416.] In Russian

- Лидер М.Р. Седиментология. Процессы и продукты. М.: Мир, 1986. 439 с. [Leeder M.R. Sedimentology: Process and product. London: Allen & Unwin, 1982. 344 pp.]
- Лукин Е.И. Пиявки пресных и солоноватых водоемов. Фауна СССР. Пиявки. Т. 1. Л.: Наука, 1976. 484 с. [Lukin E.I. Piyavki presnykh i solonovatykh vodoemov. Fauna SSSR. Piyavki T. 1. Leningrad: Nauka, 1976. 484 pp.] In Russian
- Маорс Л.В. Классификация россыпей узлов слияния водотоков низких, средних и средневысоких порядков // Геоморфология. 1995. № 1. С. 61–68. [Maors L.V. Klassifikatsiya rossypey uzlov sliyaniya vodotokov nizkikh, srednikh i srednevysokikh poriyadkov // Geomorfologiya. 1995. No 1. P. 61–68] In Russian
- Маргалеф Р. Облик биосферы. М.: Мир, 1992. 214 с. [Margalef R. Our biosphere. Oldendorf–Luhe: Publ. Ecol. Ins., 1997. 176 pp.]
- Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 176 с. [Mikhaylov V.N. Hidrologicheskie protsessy v ustyakh rek. Moscow: GEOS, 1997. 176 pp.] In Russian
- Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М.: МГУ, 1998. 176 с. [Mikhaylov V.N. Hidrologiya ustev rek. Moscow: Moscow State University, 1998. 176 pp.] In Russian
- Монаков А.В. Питание пресноводных беспозвоночных М.: ИПЭЭ РАН, 1998. 320 с. [Monakov A.V. Feeding of Freshwater Invertebrates. Ghent: Kenobi Productions, 2003. 373 pp.]
- Муравейский С.Д. Животный планктон реки Керженца // Реки и озера. М.: Гос. изд-во географ. лит-ры, 1960. С. 308–326. [Muraveyskiy S.D. Zhivotnyy plankton reki Kerzhentsa // Reki i ozero. Moscow: Gos. izd-vo geograf literatury, 1960. P. 308–326.] In Russian
- Никитина Н.А., Чалов Р.С. Узлы слияния рек и их морфологические типы // Геоморфология. 1988. № 4. С. 64–70. [Nikitina N.A., Chalov R.S. Uzly sliyaniya rek i ikh morfologicheskie tipy // Geomorfologiya. 1988. No 4. P. 64–70.] In Russian
- Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 1. Низшие беспозвоночные: Губки, Книдарии, Турбеллярии, Коловратки, Гастротрихи, Нематоды, Волосатики, Олигохеты, Пиявки, Мшанки, Тихоходки. СПб., 1994. 396 с. [Key to Freshwater Invertebrates of Russia and adjacent lands. Vol. 1. St. Petersburg, 1994. 396 pp.] In Russian
- Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 2. Ракообразные: Листонogie, Ветвистоусые, Веслоногие, Остракоды, Кумовые, Мизиды, Изоподы, Декаподы, Амфиоподы. СПб., 1995. 628 с. [Key to Freshwater Invertebrates of Russia and adjacent lands. Vol. 2. St. Petersburg, 1995 628 pp.] In Russian
- Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 3. Паукообразные и низшие насекомые: Акариды, Орибатидаы, Галакариды, Гидрахниды, Пауки, Ногохвостки, Поденки, Веснянки, Стрекозы, Клouпы. СПб., 1997. 448 с. [Key to Freshwater Invertebrates of Russia and adjacent lands. Vol. 3. St.-Petersburg, 1997. 448 pp.] In Russian
- Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 4. Высшие насекомые: Двукрылые насекомые (Комары, Мухи). СПб., 1999. 1000 с. [Key to Freshwater Invertebrates of Russia and adjacent lands. Vol. 4. St. Petersburg, 1999. 1000 pp.] In Russian
- Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 5. Высшие насекомые: Ручейники, Бабочки, Жуки, Большекрылые, Сетчатокрылые. СПб., 2001. 836 с. [Key to Freshwater Invertebrates of Russia and adjacent lands. Vol. 5. St. Petersburg, 2001. 836 pp.] In Russian
- Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 6. Моллюски, Полихеты, Немертины. СПб., 2004. 528 с. [Key to Freshwater Invertebrates of Russia and adjacent lands. Vol. 6. St. Petersburg, 2004. 528 pp.] In Russian
- Прокин А.А., Цветков А.И. Макрозообентос узлов слияния рек // Поволжский экологический журнал. 2013. № 2. С. 200–217. [Prokin A.A., Tsvetkov A.I. Macrozoobenthos of the confluence areas of rivers // Povolzhskiy Journal of Ecology. 2013. No 2. P. 200–217.] In Russian
- Прокин А.А., Крылов А.В., Жгарева Н.Н., Цветков А.И., Дубов П.Г. Водные макробеспозвоночные и зоопланктон в составе авто- и аллогенных экотонov континентальных водоемов: вопросы типизации // Проблемы изучения краевых структур биоценозов: матер. III Междунар. науч. конф. Саратов: изд-во Саратов. ун-та, 2012. С. 98–104. [Prokin A.A., Krylov A.V., Zhgareva N.N., Tsvetkov A.I., Dubov P.G. Vodnye makrobespozvonochnye i zooplankton v sostave avto- i allogennykh ekotonov kontinentalnykh vodoemov: voprosy tipizatsii // Problemy izucheniya kraevykh struktur biotsenozov: mater. III Mezhdunar. nauch. konf. Saratov: Saratov State University, 2012. P. 98–104.] In Russian
- Романкевич Е.А., Ветров А.А. Массы углерода в гидросфере Земли // Геохимия. 2013. № 6. С. 483–509. [Romankevich E.A., Vetrov A.A. Masses of carbon in the Earth's hydrosphere // Geochemistry International. 2013. Vol. 53, Issue 6. P. 431–455.] In Russian
- Скворцов В.Э. Стрекозы Восточной Европы и Кавказа: атлас-определитель. М.: Т-во науч. изданий КМК, 2010. 623 с. [Skvortsov V.E. The dragonflies of Eastern Europe and Caucasus: An Illustrated guide. Moscow: KMK Scientific Press, 2010. 623 pp.] In Russian
- Чекановская О.В. Водные малощетинковые черви фауны СССР. М.–Л.: Наука, 1962. 411 с. [Chekanovskaya O.V. Vodnye maloshchetinkovye chervi fauny SSSR. Moscow-Leningrad: Nauka, 1962. 411 pp.] In Russian
- Beckmann M.C., Schöll F., Matthaei Ch.D. Effects of increased flow in the main stream of River Rhine on the invertebrate communities of its tributaries // Freshwater Biology. 2005. Vol. 50. P. 10–26.

- Church M. Geomorphic thresholds in riverine landscapes // *Freshwater Biology*. 2002. Vol. 47. P. 541–557.
- Dyer K.R. Coastal and estuarine sediment dynamics. New-York: A Wiley-Interscience Publ., 1986. 324 p.
- Lisitzin A.P. The continental-ocean boundary as a marginal filter in the World Ocean // *Biogeochemical cycling and sediment ecology*. Dordrecht: Kluwer, 1999. P. 69–105.
- Nasemann H., Neubert E. Süßwasserfauna von Mitteleuropa. Bd. 6. Annelida. 2. Clitellata: Branchiobdellida, Acanthobdellaea, Hirudinea. Heidelberg-Berlin: Spectrum Akademischer Verlag GmbH., 1999. 178 pp.
- Olivier D.R., Roussel M.E. The genera of larval midges of Canada. *The Insects and Arachnids of Canada*. Part 11. 1983. 263 pp.
- Saether O.A., Ashe P., Murray D. Family Chironomidae // *Contributions to a Manual of Palaearctic Diptera* (with special reference to fleas of economic importance). Budapest: Science Herlag, 2000. P. 113–334.
- Timm T. A guide to the freshwater Oligochaeta and Polychaeta of Northern and Central Europe // *Lauterbornia*. 2009. Vol. 66. P. 1–235.

## HYDROLOGICAL REGIME AND MACROZOOBENTHOS OF THE LOWLAND RIVERS CONFLUENCE AREAS

A. A. Prokin<sup>1,2</sup>, A. I. Tsvetkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Biology of Inland Waters RAS, 152742, Borok, Yaroslavl region, Russia, e-mail: yarrivers@gmail.com*

<sup>2</sup>*Voronezh State University, 394006, Voronezh, Universitetskaya pl., 1, Russia, e-mail: prokina@mail.ru*

The main hydrological characteristics, and structural characteristics of the macrozoobenthos in mouth areas both of small and medium in size tributaries of the Don and Khoper Rivers on the territory of the Voronezh Oblast' are discussed. Three variants of tributaries and recipients contact zones, where a mixture of their water mass take place are described. Water in the confluence area differs in the value of electrical conductivity from water flow and a receiver. The length of the confluence zone is dependent on the ratio of flow velocities in contact watercourses. Regarding flowing tributary areas and the receiver, in the confluence zone are formed macrozoobenthos community with specific quantitative characteristics, determined primarily by the stability of the hydrological regime and the characteristics of sediments. Fauna of mixing water zones may forming predominantly by the population of the receiver; at the upper limit predominantly by species typical for the tributary, and on the lower limit - a receiver (main river); or different from others due to the minimum of unique species. The highest amplitude of inter-annual changes in species richness is common for communities suffering the effect of significant inter-annual variations in hydrological parameters. As a rule, the maximum long-term amplitude of the total number macroinvertebrates changes is common for the most numerous shore communities and communities of lower limit of the mixing waters zone. The greatest biomass of benthic invertebrates characteristic for the lower limit of the mixing waters zone, which are provided, as a rule, by Unionidae, filter feeders. Thus, communities of lower limits of mixing zones of rivers can play an important role in the processes of self-purification of water.

**Keywords:** tributary, river mouth area, watercourse-recipient, mixing waters zone, hydrologic processes, macrozoobenthos.



## К ШЕСТИДЕСЯТИЛЕТИЮ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

### ЛЮДМИЛЫ ГРИГОРЬЕВНЫ БУТОРИНОЙ



Людмила Григорьевна Буторина родилась в 1933 г. в г. Гомеле Белорусской ССР в семье военнослужащих. В 1950 г. она поступила в Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова и закончила его с отличием в 1955 г. по специальности “зоология беспозвоночных”. Ее однокурсники отзывались о ней как о самой веселой, заводной и доброжелательной девушке. В том же году Людмила Григорьевна начала работать старшим лаборантом на Научно-исследовательской биологической станции “Борок” им. Н.А. Морозова.

К тому времени назрела необходимость комплексного исследования больших рукотворных водохранилищ, поскольку гидробиологические оценки, получаемые при изучении природных водоемов, не отвечали на вопросы, возникающие при использовании обширных искусственных водохранилищ. Биологическая станция, расположенная близ Рыбинского водохранилища, в 1956 г. была реорганизована в Институт биологии водохранилищ АН СССР. После реорганизации Людмила Григорьевна стала работать в Лаборатории зоопланктона и зообентоса под руководством Филарета Дмитриевича Мордухай-Болтовского. Будучи лаборантом, Людмила Григорьевна занималась сбором и обработкой гидробиологических материалов, проводила экспериментальные исследования ракообразных, постоянно участвовала в многочисленных рейсах по Рыбинскому водохранилищу и по образованным к тому времени Горьковскому и Куйбышевскому, а также по всей р. Волге. Впоследствии она продолжила свою деятельность в Институте биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН.

В 1962 г. Л.Г. Буторину утвердили в должности младшего научного сотрудника, в 1976 г. – старшего научного сотрудника. В 1979 г. Президиум Академии наук СССР присвоил Л.Г. Буториной звание Старшего научного сотрудника по специальности “Зоология”. С 1992 г. она ведущий научный сотрудник, с 2000 г. – главный научный сотрудник института.

В 1972 г. Людмила Григорьевна защитила кандидатскую диссертацию на тему “Биология *Polyphemus pediculus* (L, 1761), Cladocera”, в 1990 г. состоялась защита ее докторской диссертации на тему “Экологические аспекты поведения водных беспозвоночных на примере *Polyphemus pediculus* (L.), Cladocera”.

Она автор более 120 научных работ объемом более 80 п.л., имеет медаль ВДНХ за создание планктобатометра, диплом Международного общества сравнительной психологии за лучшее исследование социального поведения водных беспозвоночных. Ее работы неоднократно признавались лучшими на конкурсах статей в Институте биологии внутренних вод РАН. Людмила Григорьевна участвовала в многочисленных международных, всесоюзных и всероссийских симпозиумах и конференциях. В 1988 г. ею представлен доклад на 24 международном конгрессе психологов в Австралии, получивший высокую оценку специалистов, в 1990 г. она выступила с докладом на 5 международном совещании общества сравнительной психологии на Барбадосе, где получила премию. Она – соавтор монографии “Lakes Handbook”, вышедшей в 2000 г. в издательстве Blackwell Science Osney, Oxford, England.

Людмила Григорьевна признана в нашей стране и за рубежом как ведущий специалист по группе Onychopoda, а также в области исследования поведения водных беспозвоночных. Она постоянно консультирует приезжающих в институт специалистов и коллег по вопросам экологии и зоологии, рецензирует научные работы, в том числе и диссертационные. Благодаря ее стараниям и упорству, в пос. Борок открыта музыкальная школа.

Научные интересы Л.Г. Буториной – эволюция и постэмбриональное развитие Onychopoda, таксономия рода *Polyphemus*, структура и популяционная организация планктонных ракообразных, принципы их создания и механизмы регуляции, особенности жизненных циклов и цикличности Branchiopoda. Эти задачи Л.Г. Буторина решает на примере всестороннего исследования модельного вида пресноводных мелководий *Polyphemus pediculus*.

В круг исследований Л.Г. Буториной входит изучение биологии, взаимосвязи и взаимообусловленности морфологии, физиологии, этологии и экологии ракообразных; выявление природы и закономерностей проявления суточных, сезонных и многолетних ритмов развития, размножения и поведения; детальное исследование пищевой, репродуктивной, миграционной, комфортной, оборонительной и социальной активностей; определение продолжительности и оптимальных условий жизни популяции в активный период и в период покоя; выявление экологических и этологических адаптаций вида.

Людмилой Григорьевной установлена эволюционная древность Onychopoda (Cladocera), выявлена сложность популяционной структуры рода *Polyphemus* и наличие у него ряда экологических и географических изолят. Она выявила существование в популяции примитивного универсального коммуникационного кода: его состав, сезонные и возрастные изменения, степень воздействия на различных членов локальной популяции. Прделанные работы позволили Л.Г. Буториной установить характер внутривидовых взаимодействий особей, принципы иерархической организации локальных популяций *Polyphemus*, их разделение на постоянные открытые стаи и периодическое образование в них временных пищевых и репродуктивных скоплений.

Людмила Григорьевна доказала, что локальные популяции низших ракообразных представляют собой целостные и взаимосвязанные организации с синхронными циклическими изменениями конфигурации, численности, демографического состава и доминирующих форм поведения. Ею выдвинута концепция о решающей роли уровня развития социального поведения в принципах организации локальных популяций водных беспозвоночных.

Исследование периода покоя популяции *P. pediculus* позволило Л.Г. Буториной выявить три последовательных фазы его протекания, обязательные и факультативные, определить диапазон неблагоприятных условий, которые популяция способна перенести, сигнальные факторы начала развития покоящихся яиц и условия выхода рачков. Ею установлено наличие врожденных суточной, сезонной и многолетней ритмик развития яиц, фенотипических различий скорости и темпа выхода молоди, которые обеспечивают сезонную и межсезонную гетерохронию появления рачков, разнообразие генетического фонда вида и его сохранность.

Людмила Григорьевна установила, что численность, половой состав и ритм развития *P. pediculus* в большей степени зависят от длины светового дня, чем от температуры среды. Рачок имеет длинный тип развития, как и многие насекомые и позвоночные животные северного происхождения. На основании морфометрических исследований 9 линейных и 12 меристических признаков у особей *P. pediculus* разного возраста и пола, находящихся в одной локальной популяции на протяжении вегетационного сезона, она выявила, что фенотип вида отличается необычайной пластичностью.



Вариационный и однофакторный дисперсионный анализы 17 тыс. данных показали достаточно высокую степень индивидуальной изменчивости особей и позволили сделать вывод о наличии у *P. pediculus* генетического полиморфизма. Средний уровень изменчивости особей и популяций *P. pediculus* выше, чем у других Onychopoda.

Л.Г. Буториной установлено, что локальные популяции представляют собой совокупность ряда генетически различающихся микропопуляций, особи которых – прямые потомки различных генераций популяции. Ею создано новое представление о цикличности Branchiopoda, как о генетически закрепленном явлении, указывающем на эколого-географическое происхождение видов. Она доказала, что продолжительность жизненного цикла популяций определяется не только условиями обитания, но и длительностью производства субитанных смешанных пометов и покоящихся яиц, степенью гетерохронии выхода молоди.

Всестороннее исследование модельного вида мелководий позволило Л.Г. Буториной разработать тесты, критерии и принципы организации биомониторинга пресноводных экосистем по одному модельному виду.

Людмила Григорьевна – специалист отточенного профессионализма, широчайшей эрудиции, исследователь высшей квалификации в области систематики, морфологии, экологии, биологии и этологии водных беспозвоночных.

Она продолжает активно работать. Недавно у нее вышла публикация в журнале “Geochronometra” о биотопической изменчивости *P. pediculus* в локальной популяции оз. Мичиган. Статья, как всегда, отличается четкой постановкой вопросов, глубоким смыслом, доказательной точной статистической обработкой и интереснейшими выводами.

Прекрасно, что в нашем институте работают такие специалисты высочайшего мирового уровня, как Людмила Григорьевна Буторина. Мы всегда можем обратиться к ней за квалифицированной консультацией. Пожелаем Людмиле Григорьевне плодотворной работы, новых блестящих открытий и крепкого здоровья!

*Сотрудники лаборатории экологии водных беспозвоночных ИБВВ РАН*

## К ШЕСТИДЕСЯТИЛЕТИЮ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИННЫ ЛОГИНОВНЫ ПЫРИНОЙ



Инна Логиновна Пырина – доктор биологических наук, лауреат премии им. И.Д. Папанина, принадлежит к плеяде ученых, которые создавали славу Институту биологии внутренних вод РАН. Трудовая 60-летняя биография И.Л. Пыриной началась в ботаническом отделении биологической станции “Борок”, куда она была принята в 1955 г. после окончания кафедры физиологии растений биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. В послужном списке Инны Логиновны все научные должности – от младшего научного сотрудника до главного научного сотрудника. В 1978 г. ей присвоено звание старшего научного сотрудника, в 1974 г. она награждена Почетной грамотой Президиума АН СССР, в 1981 г. – знаком Ветеран труда.

В научной биографии Инны Логиновны особое место занимают выдающиеся ученые: альголог-физиолог растений К.А. Гусева, крупнейший гидробиолог современности Г.Г. Винберг, известные всему миру альгологи-экологи из Великобритании Д. Ланд и Д. Таллинг. Инна Логиновна стояла у истоков изучения первичной продукции фитопланктона и факторов ее определяющих. Научные интересы И.Л. Пыриной (“солнце, жизнь и хлорофилл”) сформировались под влиянием трудов К.А. Тимирязева. Ее работы по растительным пигментам пресноводного фитопланктона относятся к числу первых в отечественной гидробиологии. В те годы еще было неясно, что даст спектрофотометрическое определение хлорофилла в водоеме и нужно ли этим заниматься. Однако вскоре исследованиями хлорофилла была охвачена вся планета, включая континентальные водоемы и воды Мирового океана. В настоящее время актуальность использования хлорофилла в изучении закономерностей новообразования органического вещества при фотосинтезе возрастает в связи с глобальным потеплением климата.

Исследования И.Л. Пыриной проведены на водохранилищах Волги, Енисее, озерах Северо-Запада России и Большеземельской тундры. Огромный полевой материал лег в основу диссертационных работ. В 1966 г. Инна Логиновна успешно защитила кандидатскую диссертацию, посвященную первичной продукции волжских водохранилищ в связи с освещенностью, хлорофиллом и биомассой

фитопланктона, а в 1995 г. – докторскую диссертацию на тему “Свет как фактор продуктивности фитопланктона во внутренних водоемах”. Научные идеи, подходы и примененные ею методы исследования продолжают развиваться в работах учеников и последователей. Изучение динамики растительных пигментов распространено на донные отложения водохранилищ. Многолетние данные по хлорофиллу в воде успешно используются для математического моделирования первичной продукции фитопланктона, а также для оценки и прогноза экологического состояния водохранилищ.

Работы И.Л. Пыриной посвящены исследованиям фотосинтеза пресноводного фитопланктона. Уникальными являются данные по подводной облученности, полученные в условиях эксперимента в водоеме. Значительный интерес представляют результаты изучения связи показателей продуктивности фитопланктона с абиотическими факторами, включая температуру, солнечную радиацию и солнечную активность. В итоге многолетних наблюдений выявлена цикличность продукционного процесса, близкая к 11-летним циклам солнечной активности. Какие тайны кроются в механизмах этих связей? Ответ на этот вопрос получают будущие поколения исследователей.

Инна Логиновна – широко образованный человек, специалист в области водной экологии, автор более ста печатных работ, которые широко известны научной общественности в нашей стране и за ее пределами. До сих пор Инна Логиновна активно работает, обобщая данные многолетних наблюдений за пространственно-временной динамикой пигментов фитопланктона в Рыбинском водохранилище в связи с абиотическими факторами.

Коллектив лаборатории альгологии, отечественные и зарубежные коллеги – альгологи сердечно поздравляют Инну Логиновну со славной уникальной датой в трудовой биографии, желают крепкого здоровья и творческих успехов на благо гидробиологической науки и процветания Института биологии внутренних вод РАН.

*Сотрудники лаборатории альгологии ИБВВ РАН*

*Н. А. Афиногенов, Н. В. Васильева, М. В. Гапеева, В. В. Законнов, А. В. Законнова,  
Л. А. Кучай, А. С. Литвинов, Н. Г. Отюкова, С. А. Поддубный, А. А. Прокин,  
Е. Н. Соколова, И. Э. Степанова, А. И. Цветков*

# **ГИДРОЛОГО- ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОЕМОВ БАССЕЙНА ВОЛГИ**

Подписано в печать 17.11.2016 г. Формат 60х90 1/8.  
Усл. печ. л. 14,5. Заказ № 16260. Тираж 150 экз.

Отпечатано в типографии ООО "Филигрань"  
150049, г. Ярославль, ул. Свободы, 91.  
[pechataet@bk.ru](mailto:pechataet@bk.ru)