

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**



**ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ВНУТРЕННИХ ВОД ИМЕНИ И. Д. ПАПАНИНА РАН**



**ТРУДЫ ИБВВ РАН**

**ВЫПУСК 81(84)**

**2018**

**ЯНВАРЬ–МАРТ**

Выходит 4 раза в год

**ГИДРОЛОГИЯ, ГИДРОХИМИЯ  
И РАСТИТЕЛЬНЫЕ ПИГМЕНТЫ  
ВОДОХРАНИЛИЩ  
ВОЛЖСКОГО КАСКАДА**

**FEDERAL AGENCY OF SCIENTIFIC ORGANIZATIONS**

**THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**



**PAPANIN INSTITUTE FOR BIOLOGY OF INLAND WATERS**

**RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**



**TRANSACTIONS OF IBIW RAS**

**ISSUE 81 (84)**

**2018**

**JANUARY-MARCH**

The Journal is published quarterly

**HYDROLOGY, HYDROCHEMISTRY  
AND VEGETATIVE PIGMENTS  
IN RESERVOIRS  
OF THE VOLGA CASCADE**

УДК 556:551.4:581.132.1(285.2)

ББК 28..082

Г46

Г46

Гидрология, гидрохимия и растительные пигменты водохранилищ Волжского каскада / [отв. ред. Ю. В. Герасимов]. – Борок : Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. Труды; вып. 81 (84). – 2018. – 115 с.

*О. Л. Цельмович, Н. Г. Отюкова, И. А. Немировская, А. Г. Боев, А. М. Титова, А. В. Храмцова, А. В. Ермаков, В. В. Законнов, А. В. Законнова, А. И. Цветков, Н. Г. Шерышева, В. И. Лазарева, И. Э. Степанова, Е. Г. Пряничникова, С. Н. Перова, П. Г. Беляева, Н. М. Минеева, Л. Е. Сигарева, Н. А. Тимофеева, О. С. Макарова*

В выпуске представлены статьи, написанные по материалам экспедиционных исследований проведенных на водоемах Волго-Камского бассейна на научном судне ИБВВ РАН в 2015–2017 гг. В работах отражены результаты исследований по разнообразным вопросам гидрологии, гидрохимии, а также содержанию и распределению растительных пигментов и влиянию абиотических факторов на состояние биологических сообществ водохранилищ Волги и Камы.

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 биологических наук **Ю. В. Герасимов**  
Ответственный секретарь **А. А. Сажнева**

**Рецензенты:**

*Ю. С. Даценко, д.г.н.  
Г. В. Шурганова, д.б.н.  
Г. М. Чуйко, д.б.н.  
А. В. Гончаров, к.б.н.*

*В. М. Хромов, д.б.н.  
В. Ф. Мухутдинов, к.б.н.  
С. Ф. Комулайнен, д.б.н.*

**Редакционная коллегия Трудов ИБВВ РАН:**

*С. А. Поддубный (гл. редактор), д.г.н., ИБВВ РАН, Борок, Россия  
А. В. Крылов (зам. гл. редактора), д.б.н., проф., ИБВВ РАН, Борок, Россия  
А. А. Бобров, к.б.н., ИБВВ РАН, Борок, Россия  
Б. К. Габриелян, д.б.н., проф., НАН РА НЦ ЗГЭ, Ереван, Армения  
В. К. Голованов, д.б.н., ИБВВ РАН, Борок, Россия  
А. Н. Дзюбан, д.б.н., ИБВВ РАН, Борок, Россия  
Хай Доан Нё, д.ф., Институт океанографии, ВАНТ, Нячанг, Вьетнам*

*В. Т. Комов, д.б.н., проф., ИБВВ РАН, Борок, Россия  
В. И. Лазарева, д.б.н., ИБВВ РАН, Борок, Россия  
Н. М. Минеева, д.б.н., ИБВВ РАН, Борок, Россия  
Лам Нгуен Нгок, д.ф., проф., Институт океанографии, ВАНТ, Нячанг, Вьетнам  
А. А. Протасов, д.б.н., проф., ИГБ НАНУ, Киев, Украина  
К. Робинсон, д.ф., EAWAG, Цюрих, Швейцария  
В. П. Семенченко, д.б.н., чл.-кор. НАНБ, НПЦ НАН по биоресурсам Минск, Беларусь*

*Печатается по решению Ученого совета ИБВВ РАН.  
Исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице ФАНО России.*

*Адрес редакции: 152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н,  
Институт биологии внутренних вод РАН  
тел./факс (48547) 2-48-09; e-mail: [trud@ibiw.yaroslavl.ru](mailto:trud@ibiw.yaroslavl.ru)*

Hydrology, Hydrochemistry and Vegetative Pigments in Reservoirs of the Volga Cascade / [Editors-in-chief Yu. V. Gerasimov] – Borok: Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences. – 2018. Issue 81(84). 115 p.

*O. L. Zel'movich, N. G. Otyukova, I. A. Nemirovskaya, A. G. Boev, A. M. Titova, A. V. Khramtsova, A. V. Ermakov, V. V. Zakonnov, A. V. Zakonnov, A. I. Tsvetkov, N. G. Sheersheva, V. I. Lazareva, I. E. Stepanova, E. G. Pryanichnikova, S. N. Perova, P. G. Belyaev, N. M. Mineev, L. E. Sigarev, N. A. Timofeev, O. S. Makarova.*

The book includes articles written based on the materials obtained in the course of field studies onboard the research vessel of the Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences (IBIW RAS) in water bodies of the Volga-Kama basin in 2015 – 2017. The articles present the results of studies on different problems of hydrology, and hydrochemistry as well as on the concentration of vegetative pigments and effect of abiotic factors on the state of biological communities in reservoirs of the Volga and Kama rivers.

The book is aimed at hydrologists, hydrochemists, hydrobiologists, ecologists and experts in the field of water resources protection and management and students of faculties of Geography, Biology, and Ecology.

#### **Editor-in-chief of the volume**

Doctor of biological sciences **Yu. V. Gerasimov**  
Coordinating Editor **A. A. Sazhneva**

#### **Reviewers:**

*Yu. S. Datsenko, Doctor of Geographical Sciences*  
*G. V. Shurganov, Doctor of Biological Sciences.*  
*G. M. Chuiko, Doctor of Biological Sciences*  
*A. V. Goncharov, Ph. D.*

*V. M. Khromov, Doctor of Biological Sciences*  
*V. F. Mukhutdinov, Ph. D.*  
*S. F. Komulainen, Doctor of Biological Sciences*

#### **Editorial board of IBIW RAS Transactions:**

*S. A. Poddubny (editor), D.r of geogr., IBIW RAS, Borok, Russia*  
*A. V. Krylov (deputy editor), Dr. of biol., prof., IBIW RAS, Borok, Russia*  
*A. A. Bobrov, PhD., IBIW RAS, Borok, Russia*  
*Hai Doan Nhu, PhD., Institute of Oceanography, VAST, Nha Trang, Vietnam*  
*A. N. Dzuban, Dr. of biol., IBIW RAS, Borok, Russia*  
*B. K. Gabrielyan, Dr. of biol., prof., SC ZHE NAS RA, Yerevan, Armenia*

*V. K. Golovanov, Dr. of biol., IBIW RAS, Borok, Russia*  
*V. T. Komov, Dr. of biol., prof., IBIW RAS, Borok, Russia*  
*V. I. Lazareva, Dr. of biol., IBIW RAS, Borok, Russia*  
*N. M. Mineeva, Dr. of biol., IBIW RAS, Borok, Russia*  
*Lam Nguyen Ngoc, PhD., prof., Institute of Oceanography, VAST, Nha Trang, Vietnam*  
*A. A. Protasov, Dr. of biol, prof., IHB NASU, Kiev, Ukraine*  
*C. Robinson, PhD., EAWAG, Zurich, Switzerland*  
*V. P. Semchenko, Dr. of biol., corr. member NASB, Minsk, Belarus*

*Published by the decision of IBIW RAS Academic council.*

*The research was carried out with the financial support of the state in the person of FAO Russia.*

*Editorial address: 152742. Borok, Yaroslavl region, Nekouz district,  
Institute of Biology of Inland Waters, RAS  
tel./fax (48547) 2-48-09; e-mail: trud@ibiw.yaroslavl.ru*



## СОДЕРЖАНИЕ

*О. Л. Цельмович, Н. Г. Отюкова*

СОДЕРЖАНИЕ ЖЕЛЕЗА И ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТОВ СОЛЕВОГО СОСТАВА В ВОДЕ ВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ В ПЕРИОД ОТКРЫТОЙ ВОДЫ 2015 ГОДА ..... 5

*И.А. Немировская, А.Г. Боев, А.М. Титова, А.В. Храмцова*

ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СЕДИМЕНТАЦИИ ВОДОСБОРА ВОЛГИ ВО ВРЕМЯ ПОЗДНЕГО ПАВОДКА ..... 14

*А. В. Ермаков, В. В. Законнов*

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ДОННЫХ ОСАДКОВ ВЕРХНЕВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГРУНТОВОЙ СЪЕМКИ 2016 г ..... 25

*В.В. Законнов, А.В.Законнова, А.И. Цветков, Н.Г. Шерышева*

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ДОННЫХ ОСАДКОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО КАСКАДА ..... 33

*В. И. Лазарева, И. Э. Степанова, А. И. Цветков, Е. Г. Пряничникова, С. Н. Перова*

КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛГИ И КАМЫ В ПЕРИОД ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА: ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ЗООПЛАНКТОНА И ЗООБЕНТОСА ..... 46

*N. M. Mineeva*

COMPOSITION AND CONTENT OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS IN PLANKTON OF THE VOLGA RIVER RESERVOIRS (2015–2016) ..... 84

*П. Г. Беляева, Н. М. Минеева, Л. Е. Сигарева, Н. А. Тимофеева, О. С. Макарова*

СОДЕРЖАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ В ВОДЕ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОХРАНИЛИЩ Р. КАМЫ ..... 96

*Л. Е. Сигарева, Н. А. Тимофеева*

СОДЕРЖАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛГИ ..... 104

## CONTENTS

*O. L. Tselmovich, N. G. Otyukova*

CONCENTRATION OF IRON AND MAIN COMPONENTS OF SALT COMPOSITION IN WATER OF VOLGA WATER RESERVOIRS IN THE PERIOD CLEAR WATER 2015 ..... 5

*I. A. Nemirovskaya, A. G. Boev, A. M. Titova, A. M. Khramtsova*

ORGANIC COMPOUNDS IN THE PROCESS OF THE SEDIMENTATION OF THE VOLGA WATER DURING LATE FLOOD ..... 14

*A. V. Ermakov, V. V. Zakonnov*

THERMAL CONDUCTIVITY OF BOTTOM SEDIMENTS OF THREE UPPER VOLGA RESERVOIRS BY 2016 YEAR GROUND SURVEY ..... 25

*V.V. Zakonnov, A.V. Zakonnov, A.I. Tsvetkov, N.G. Sherysheva*

HYDRODYNAMIC PROCESSES AND THEIR ROLE IN FORMATION OF BOTTOM SEDIMENTS IN RESERVOIRS OF THE VOLGA-KAMA CASCADE ..... 33

*V. I. Lazareva, I. E. Stepanova, A. I. Tsvetkov, E. G. Pryanichnikova, S. N. Perova*

THE OXYGEN REGIME IN THE VOLGA AND KAMA RESERVOIRS DURING THE PERIOD OF CLIMATE WARMING: IMPACT ON ZOOPLANKTON AND ZOOBENTHOS ..... 46

*N. M. Mineeva*

COMPOSITION AND CONTENT OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS IN PLANKTON OF THE VOLGA RIVER RESERVOIRS (2015–2016) ..... 84

*P. G. Belyaeva, N. M. Mineeva, L.E. Sigareva, N. A. Timofeeva, O. S. Makarova*

MORPHOLOGICAL GROUPING OF ROACH FINGERLINGS *RUTILUS RUTILUS* (L.) (CYPRINIDAE, CYPRINIFORMES) IN THE EXPERIMENTAL POND ..... 96

*L. E. Sigareva, N.A. Timofeeva*

CONTENT OF PLANT PIGMENTS IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE VOLGA RIVER RESERVOIRS ..... 104

## СОДЕРЖАНИЕ ЖЕЛЕЗА И ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТОВ СОЛЕВОГО СОСТАВА В ВОДЕ ВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ В ПЕРИОД ОТКРЫТОЙ ВОДЫ 2015 ГОДА

О. Л. Цельмович, Н. Г. Отюкова

*Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академия наук  
152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: [otselm@ibiw.yaroslavl.ru](mailto:otselm@ibiw.yaroslavl.ru)*

В августе–сентябре 2015 г. изучены солевой состав и содержание железа общего, растворенного, взвешенного в воде водохранилищ Волжского каскада (от Ивановского до Саратовского). Отмечена тенденция к снижению концентрации всех форм железа по мере продвижения водных масс вниз по каскаду. Показано, что преобладающей формой железа в воде является взвешенная. Изменения солевого состава и содержания железа в воде водохранилищ обусловлены природными условиями на водосборе, зарегулированностью водного стока, генетическими характеристиками водных масс.

*Ключевые слова:* Волжские водохранилища, гидрохимический режим, железо, солевой состав.

DOI 10.24411/0320-3557-2018-1-0001

### ВВЕДЕНИЕ

Железо является одним из приоритетных показателей качества воды водохранилищ Волги и входит в состав лимитирующих ингредиентов на Средней Волге. По данным 2000 г. [Bolgov at al., 2008] воды большинства водохранилищ Волги были отнесены к «умеренно загрязненным». При этом отмечено снижение Индекса Загрязненности Воды (ИЗВ) по сравнению со средне-многолетними значениями, что свидетельствует о благоприятной тенденции в изменении загрязненности волжских водохранилищ. Соотношение среднегодовых значений железа с величиной ПДК по данным 2000 г. лежит в пределах от 0.0 (Куйбышевское водохранилище, г. Зеленодольск) до 4.2 (Чебоксарское водохранилище, г. Нижний Новгород). Вклад железа в ИЗВ по данным наблюдений за состоянием Волжских водохранилищ в 2000 г. составляет от 8.4 % (Угличское водохранилище, с. Мышкино) до 34.1% (Чебоксарское водохранилище, г. Нижний Новгород). Регрессионные зависимости среднегодового содержания железа от водности года в разных водохранилищах показали как прямую (Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское, Волгоград-

ское), так и обратную связь (Угличское), из чего следует, что водность не является главным фактором формирования качества воды [Bolgov at al., 2008]. При этом исследования подтвердили наличие зависимости количества органического вещества (ОВ) от объема поверхностного стока [Буторин и др., 1988 (Butorin at al., 1988)].

Солевой состав воды служит достаточно информативной характеристикой среды обитания гидробионтов и позволяет проследить сезонную и пространственную динамику водных масс. Формирование основной части водного стока Волги в зоне избыточного увлажнения, а также питание Верхневолжских водохранилищ преимущественно поверхностным стоком, более 50% которого составляют воды весеннего половодья, обуславливают относительно низкую минерализацию воды (гидрокарбонатно-кальциевого типа) волжских водохранилищ. Поскольку сток р. Волги полностью зарегулирован, проточность водоемов в значительной мере определяет гидрохимический режим и сезонную динамику главных ионов волжских водохранилищ.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Бассейны водохранилищ Волги располагаются в различных природных условиях, различаясь по физико-географическим особенностям водосбора, речная сеть в них развита неравномерно. Речной сток обеспечивает основную часть водного баланса водохранилищ и поступление в них химических веществ. Также важную роль в питании рек бассейна играет снежный покров, поэтому при заполнении водохранилищ существенным фактором является половодье. На водосборной площади представлены почвы различной степени оподзоливания и заболачивания. В Ивановском, Угличском, Рыбинском, Горь-

ковском водохранилищах аккумулируется сток оподзоленных и заболоченных почв лесной зоны. Бассейны Чебоксарского, Куйбышевского водохранилищ расположены в зоне смешанных лесов, а Саратовского – в зоне лесостепи и степи.

Работы по изучению содержания железа и компонентов солевого состава воды в Волжских водохранилищах проводились в разные годы. Еще в 1944–1945 гг. было отмечено, что по физическим и химическим свойствам воды Ивановского, Угличского и Рыбинского водохранилищ мало отличаются друг от друга, несмотря на значительную протяженность водохранилищ и

некоторую разницу в сроках заполнения. В 1944 г. в воде Ивановского водохранилища средние концентрации железа общего (в мг/дм<sup>3</sup>) в летнюю межень в поверхностном горизонте составляли 0.23, Угличского – 0.21, Рыбинского – 0.24. [Кудрявцев, 1950 (Kudryavtsev, 1950)].

По данным 1974 г. среднее содержание железа общего в водной толще Ивановского водохранилища было 0.5 мг/дм<sup>3</sup> с тенденцией уменьшения от весны к осени. Аналогичная закономерность была отмечена также для Рыбинского водохранилища. При этом в летний период средняя концентрация железа общего в воде Ивановского водохранилища составляла 0.64 мг/дм<sup>3</sup>, железа взвешенного и растворенного 0.51 мг/дм<sup>3</sup> и 0.13 мг/дм<sup>3</sup> соответственно [Степанова, 1982 (Stepanova, 1982)]. В Ивановском водохранилище преобладают железоорганические комплексы с фульвокислотами. В остальных водохранилищах доминируют комплексы гуминовых кислот с железом. [Bolgov at al., 2008].

Питание Угличского водохранилища, являющегося второй ступенью Волжского каскада водохранилищ, осуществляется в основном трансформированными водами, поступающими из Ивановского водохранилища (68% от суммарного поступления) и за счет незарегулированных боковых притоков (32%). В вегетационный период 1955–1958 гг. среднее содержание железа общего (мг/дм<sup>3</sup>) в воде Угличского водохранилища составляло весной 0.29, летом – 0.19, осенью – 0.21. В зимний период количество железа общего повышалось до 0.8–1.9 мг/дм<sup>3</sup>. [Трифонов, 1961 (Trifonova, 1961)]. По данным 1974–1980 гг. средние концентрации железа (мг/дм<sup>3</sup>) сопоставимы с периодом 1955–1958 гг. (весной 0.28 и летом – 0.19, а осенью несколько ниже – 0.16). [Былинкина, Трифонова, 1987 (Bylinkina, Trifonova, 1987)]. В 2012–2016 гг. средние концентрации железа общего в летнюю межень в Угличском и Ивановском водохранилищах составляли 0.14 и 0.13 мг/дм<sup>3</sup> соответственно. [Григорьева и др., 2017 (Grigoryeva at al., 2017)].

В связи с высокой проточностью водохранилища воды весеннего незарегулированного стока малых рек, богатых гумусовым ОВ и железом, практически не задерживаются в водохранилище и, смешиваясь с основным волжским потоком, поступают в Волжский плес Рыбинского водохранилища. В монографии [Рыбинское водохранилище..., 1972 [(Rybinsk Reservoir..., 1972)] указана среднегодовая концентрация железа (мг/дм<sup>3</sup>) по многолетним данным 0.19, при этом зимой – 0.22, весной – 0.21, летом – 0.17 и осенью – 0.14.

Водная масса Горьковского водохранилища является трансформированной водной массой Рыбинского водохранилища. В 1957 г. сразу после сооружения Горьковского водохранилища концентрации железа в его водах варьировали в пределах 0.06–1.80 мг/дм<sup>3</sup> [Зенин, 1971 (Zenin, 1971)].

По результатам экспедиционных исследований по водохранилищам Волги в летнюю межень 2009 г. [Дебольский и др., 2010 (Debol'skiy at al., 2010)] концентрация железа общего практически во всех створах не превышала 0.1 мг/дм<sup>3</sup>. При этом в водохранилищах Верхней Волги, водосборные бассейны которых значительно заболочены, железоорганические комплексы, образующиеся в болотных водах, обуславливают повышенные концентрации железа.

Чебоксарское водохранилище, являющееся пятой ступенью Волжского каскада, питается водами, поступающими из Горьковского водохранилища, и водами боковой приточности. В водохранилище впадает 28 рек, основные – Ока, Сура, Керженец, Ветлуга. На участке Чебоксарского водохранилища на территории Нижегородской области железо является одним из приоритетных загрязняющих веществ. Проведенное исследование выявило улучшение качества воды по железу на этом участке с 2004 г. по 2010 г. за счет сокращения сброса в водные объекты железа на 35.3 тонны. [Левин Ю.Ю., 2014 (Lyovin, 2014)].

Куйбышевское водохранилище в настоящее время подвержено значительной антропогенной нагрузке в основном ниже крупных населённых пунктов. Так, содержание железа общего ниже Ульяновска варьирует в пределах 0.05–0.21 мг/дм<sup>3</sup> [Завальцева и др., 2011 (Zaval'tseva at al., 2011)].

Главной миграционной формой железа в природных водах является взвешенная, в которую принято выделять частицы с размером более 0.45 мкм. [Линник, Набиванец 1986 (Linnik, Nabivanets 1986)]. Во взвешенном веществе железо может переноситься в органической (связанное железо в клетках организмов) и минеральной (в основном гели гидроокиси железа, обломочный материал) формах. Растворенное железо может находиться в ионной форме, в виде комплексных соединений с минеральными и органическими веществами. [Линник, Набиванец 1986 (Linnik, Nabivanets 1986)]. Далее взвешенное железо либо потребляется фитопланктоном, либо осаждается в зависимости от морфологии и гидродинамики водоема.

Сведения о солевом составе воды волжских водохранилищ достаточно разрознены. Работ, посвященных одновременному изучению

гидрохимического режима всех водохранилищ каскада, немного. Кроме того, часто исследователи обращают внимание лишь на отдельные компоненты солевого состава.

Некоторые результаты предыдущих гидрохимических исследований Волжских водохранилищ представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Некоторые показатели солевого состава воды Волжских водохранилищ (мг/дм<sup>3</sup>) в летнюю межень  
**Table 1.** Some indicators of salt composition of water in the Volga reservoirs (mg/dm<sup>3</sup>) during summer low–water

Водохранилище Reservoir	Год Year	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σионов Σions	Источник References
Иваньковское Ivankovskoye	1944	141	1.3	4.40	—*	Кудрявцев, 1950
	1969–1974	127–131	5.2–6.4	18.3–22.8	207–209	Волга и ее жизнь, 1978
	1997	118–160	6.7–8.9	3.9–12.2	183–235	Bikbulatov at al. 2001
	2009	116–156	7.0–14.4	4.0–4.4	—	Дебольский и др., 2010
Угличское Uglichskoye	1944	124	1.7	3.73	—	Кудрявцев, 1950
	1956	107	1.5	21.9	—	Трифопова, 1961
	1969–1974	106–126	5.6–6.6	22.3–23.2	177–208	Волга и ее жизнь, 1978
	1974–1980	113	9.0	26.3	200	Былинкина, Трифопова, 1987
Рыбинское Rybinskoye	1997	123–145	6.4–8.0	4.4–15.9	197–221	Bikbulatov at al. 2001
	2009	98–130	2.2–6.3	7.0–10.0	—	Дебольский и др., 2010
	1944	116	1.7	3.9	—	Кудрявцев, 1950
	1969–1974	81–104	1.6–5.3	20.8–26.5	145–172	Волга и ее жизнь, 1978
Горьковское Gorkovskoye	1997	8–2128	7.9–3.1	8.0–42.4	136–219	Bikbulatov at al. 2001
	2009	76–85	1.9–2.5	7.0–9.0	—	Дебольский и др., 2010
	1969–1974	86–109	6.9–7.5	22.8–25.1	160–190	Волга и ее жизнь, 1978
	1997	101–145	5.3–6.7	18.9–26.7	177–191	Бикбулатов и др. 2001
Чебоксарское Cheboksarskoye	2009	79–92	2.5–3.9	10.0–34.0	—	Дебольский и др. 2010
	1969–1974	74–112	5.3–11.9	20.7–53.0	134–238	Волга и ее жизнь, 1978
Куйбышевское Kuzybyshevskoye	2009	92–110	3.2–11.1	19.0–39.0	—	Дебольский и др. 2010
	1969–1974	96–131	22.1–39.0	45.9–54.5	241–301	Волга и ее жизнь, 1978
Саратовское Saratovskoye	2009	92–110	10.1–23.4	32.0–41.0	—	Дебольский и др. 2010
	1969–1974	99–105	42.5–46.7	45.4–49.3	269–272	Волга и ее жизнь, 1978
	2009	110–116	20.9–23.1	32.0–46.0	—	Дебольский и др. 2010

**Примечание.** “\*” — данные отсутствуют.

В августе–сентябре 2015 г. в рамках комплексных исследований на экспедиционном судне “Академик Топчиев” по каскаду водохранилищ р. Волги от Иваньковского до Саратов-

ского было отобрано 70 проб воды с поверхностного (0.5 м) горизонта, схема отбора проб воды приведена в работе Лазаревой и др. в настоящем сборнике. В пробах определяли железо, общее и

растворенное, кальций, магний, натрий, калий, хлориды, сульфаты, гидрокарбонаты. Химический анализ воды был проведен по стандартным методикам, внесенным в Государственный реестр количественного химического анализа вод. Компоненты солевого состава определяли мето-

дом капиллярного электрофореза, железо общее и растворенное фотометрическим методом с орто-фенантролином. Железо взвешенное определяли по разности железа общего и растворенного.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

За время существования в водохранилищах сформировался собственный гидрохимический режим, обусловленный физико-географическими особенностями водосбора и протекающими в них внутриводоемными процессами.

Средние концентрации железа общего в первых пяти ступенях Волжского каскада выше таковых шестой и седьмой ступени (табл. 2). По мере продвижения вниз по каскаду водохранилищ отмечена тенденция к снижению концентрации железа общего и растворенного. В данном случае наглядно продемонстрирована роль боковой приточности, имеющая определяющее значение в формировании гидрохимического режима водохранилищ верхней Волги. Большинство притоков формируется в зоне южной тайги и смешанных лесов, что и определяет качество их вод, богатых органическим веществом гумусовой природы и, как следствие, повышенным содержанием железа. К югу Волга практически не имеет притоков, и весь сток поступает с верховьев. Находящееся железо во всех пунктах наблюдения представлено преимущественно

взвешенной формой. Спускаясь к югу, водная толща теряет значительную часть железа (оно потребляется фитопланктоном, либо осаждается в зависимости от морфологии и гидродинамики водоема). Разница в его содержании, например, между Куйбышевским и Рыбинским водохранилищами может быть до 5.5 раз.

В период наблюдений на всей акватории доминирующей формой железа была взвешенная и составляла от 51 до 90% от общего содержания железа. Одним из показателей, позволяющих получить представление о формах существования железа в водоеме, является коэффициент  $Fe_{\text{раств}}/Fe_{\text{взв}}$ . На момент исследования преобладающая форма железа во всех водохранилищах была представлена взвешенными формами (коэффициент  $Fe_{\text{раств}}/Fe_{\text{взв}}$  составлял от 0.19 в Горьковском до 0.67 в Куйбышевском водохранилище). Абсолютные величины железа общего – от 0.03 мг/дм<sup>3</sup> в Саратовском до 0.87 мг/дм<sup>3</sup> в Горьковском, а железа растворенного – от 0.01 мг/дм<sup>3</sup> в Саратовском до 0.15 мг/дм<sup>3</sup> в Чебоксарском водохранилище.

**Таблица 2.** Средние концентрации железа (мг/дм<sup>3</sup>) в августе–сентябре 2015 г. в воде Волжских водохранилищ.

**Table 2.** Average concentrations of iron (mg / dm<sup>3</sup>) in August–September 2015 in the water of the Volga reservoirs.

Водохранилище Reservoir	Fe общее Fe total	Fe растворенное Fe dissolved	$Fe_{\text{раств}}/Fe_{\text{взв}}$ $Fe_{\text{dissolved}}/Fe_{\text{weighted}}$
Иваньковское Ivankovskoye	0.21 (0.15–0.46)*	0.06 (0.04–0.09)	0.37
Угличское Uglichskoye	0.21 (0.17–0.30)	0.06 (0.04–0.08)	0.40
Рыбинское Rybinskoye	0.33 (0.14–0.48)	0.06 (0.04–0.09)	0.22
Горьковское Gorkovskoye	0.3 (0.12–0.87)	0.05 (0.03–0.07)	0.19
Чебоксарское Cheboksarskoye	0.22 (0.1–0.46)	0.06 (0.04–0.15)	0.38
Куйбышевское Kuybyshevskoye	0.09 (0.06–0.13)	0.04 (0.01–0.08)	0.67
Саратовское Saratovskoye	0.06 (0.03–0.09)	0.02 (0.01–0.04)	0.50

**Примечание.** “\*” – Здесь и в таблице 3 под чертой – минимальные и максимальные значения.

Средние концентрации железа общего в Иваньковском, Угличском, Рыбинском, Горьковском, Чебоксарском превышают ПДК водных объектов рыбохозяйственного значения, равного 0.1 мг/дм<sup>3</sup>, в Куйбышевском и Саратовском – ниже ПДК (табл. 2).

Солевой состав воды волжских водохранилищ, на исследованном в августе–сентябре

2015 г. участке, имеет существенное сходство: гидрокарбонатно-кальциевый тип воды со средней минерализацией 205–319 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрации всех главных ионов находятся значительно ниже значений ПДК, установленных для водоемов рыбохозяйственного назначения.

Высокая проточность Иваньковского и Угличского водохранилищ обуславливает заметное

влияние боковых притоков на гидрохимический режим водохранилищ в период летней межени. В этих водохранилищах как абсолютные значения концентраций главных ионов, так и соотношение между ними весьма близки. Средняя минерализация воды составляет 271 мг/дм<sup>3</sup> и 289 мг/дм<sup>3</sup> (табл. 3), а сумма гидрокарбонат-иона и иона кальция более 70%. Обращает на себя внимание тот факт, что за последние 50 лет произошло увеличение минерализации воды Волжских водохранилищ. Вероятно, обусловлено это возросшим влиянием меженного стока на гидрохимический режим водохранилищ в связи с потеплением климата [Литвинов, Законнова 2014 (Litvinov, Zakonnova 2014)]. Так, летом 2015 г. средняя по Ивановскому водохранилищу минерализация воды возросла на 60 мг/дм<sup>3</sup>, а в Угличском водохранилище на 80 мг/дм<sup>3</sup> по сравнению с 1974 г. Повышение минерализации воды в этих водохранилищах обусловлено увеличением количества гидрокарбонатов кальция и магния, что также указывает на роль меженного стока. За период с 1955 г. и до настоящего времени содержание магния (как в абсолютном, так и в относительном выражении) заметно выросло. Так, в Угличском водохранилище в августе 1955–1958 гг. [Трифорова, 1961 (Trifonova, 1961)] концентрация магния составляла 3.5 мг/дм<sup>3</sup>, летом 1969–1974 гг. [Волга и ее жизнь, 1978 (Volga and its life, 1978)] – 7.0 мг/дм<sup>3</sup>, летом 1974–1980 гг. – 7.9 мг/дм<sup>3</sup> [Былинкина, Трифорова, 1987 (Bylinkina, Trifonova, 1987)], а в августе–сентябре 2015 г. – 11.5 мг/дм<sup>3</sup>. Описанное ранее [Волга и ее жизнь, 1978 (Volga and its life, 1978)], [Bikbulatov et al., 2001] антропогенное влияние на солевой состав воды Ивановского и Угличского водохранилищ нами не замечено.

Зарегулирование водного стока нарушает естественную сезонную динамику компонентов солевого состава. В результате замедленного водообмена в Рыбинском водохранилище в период летней межени сохраняется водная масса, сформированная водами весеннего половодья и трансформированная в водохранилище. В августе–сентябре 2015 г. средняя по водохранилищу величина суммы ионов составила 222 мг/дм<sup>3</sup>, что заметно ниже таковой в Угличском водохранилище. Амплитуда колебаний величины минерализации воды в Рыбинском водохранилище (123 мг/дм<sup>3</sup>) заметно выше, чем в Ивановском (38 мг/дм<sup>3</sup>) и Угличском (72 мг/дм<sup>3</sup>) водохранилищах. Более высокие значения суммы ионов отмечены в районе г. Мышкин, где поступающая из Угличского водохранилища вода смешивается с водой более минерализованных притоков – рек Корожечна и Юхоть. В Волжском плесе водохранилища сохраняется большая, по сравнению с

Главным плесом, минерализация воды.

Соотношение главных ионов в воде Рыбинского водохранилища в целом аналогично таковому в Ивановском и Угличском водохранилищах (табл. 4). Вместе с тем, по сравнению с Угличским, в Рыбинском водохранилище как концентрация, так и доля хлорид-ионов ниже, а сульфат-ионов выше, что характерно для весеннего половодья.

Речной участок Горьковского водохранилища в период летней межени заполнен трансформированными водными массами весеннего половодья, поступающими из Рыбинского водохранилища [Эдельштейн, 1968 (Edelshtein, 1968)]. В результате, в августе 2015 г. в Горьковском водохранилище отмечена самая низкая (205 мг/дм<sup>3</sup>) средняя минерализация воды по сравнению с остальными исследованными водоемами. Влияние боковых притоков на речном участке практически незаметно, солевой состав однороден, а средняя для участка минерализация воды составляет 201 мг/дм<sup>3</sup>. В Юрьевце, ниже устья р. Унжи, несущей относительно высокоминерализованные воды, величина суммы ионов возрастает до 236 мг/дм<sup>3</sup>. Средняя для озерной части водохранилища минерализация воды увеличивается до 216 мг/дм<sup>3</sup>.

Основные черты солевого состава воды, сходные в Ивановском, Угличском, Рыбинском и Горьковском водохранилище, претерпевают изменения, начиная с Чебоксарского водохранилища. Изменение почвенных и климатических условий на водосборе, смена зоны южной тайги зоной хвойных и широколиственных лесов сопровождаются соответствующими изменениями химического состава воды.

В Чебоксарском водохранилище падает доля гидрокарбонатов кальция с одновременным увеличением суммы хлорид-ионов и ионов натрия, существенно возрастает доля сульфат-иона (табл. 4). Наименее минерализованные воды Горьковского водохранилища в районе г. Н. Новгород смешиваются с водами р. Оки, имеющими минерализацию 533 мг/дм<sup>3</sup>. В итоге, средняя по водохранилищу величина суммы ионов в августе 2015 г. составила 319 мг/дм<sup>3</sup>. Вода в водохранилище крайне неоднородна, о чем свидетельствует максимальный (для всех обследованных водохранилищ) размах суммы солей – более 300 мг/дм<sup>3</sup>.

**Таблица 3.** Средние концентрации главных ионов (мг/дм<sup>3</sup>) в воде Волжских водохранилищ в августе–сентябре 2015 г.

**Table 3.** Average concentrations of main ions (mg/dm<sup>3</sup>) in the water of the Volga reservoirs in August–September 2015

Водохранилище Reservoir	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ ионов Σ ions
Иваньковское Ivanovskoye	<u>189.0</u> (180.0–202.0)*	<u>6.8</u> (5.3–8.2)	<u>9.8</u> (7.6–4.4)	<u>45.4</u> (42.2–48.2)	<u>11.2</u> (10.1–13.1)	<u>6.2</u> (5.5–7.4)	<u>1.9</u> (1.7–2.2)	<u>271</u> (252–290)
Угличское Uglichskoye	<u>193.0</u> (164.1–212.4)	<u>8.2</u> (5.2–11.1)	<u>14.8</u> (13.5–15.5)	<u>47.8</u> (41.4–52.0)	<u>11.5</u> (9.8–12.7)	<u>7.1</u> (5.3–8.9)	<u>2.2</u> (1.9–2.7)	<u>285</u> (243–315)
Рыбинское Rybinskoye	<u>144.6</u> (117.2–220.0)	<u>5.2</u> (4.4–7.2)	<u>19.2</u> (11.6–22.8)	<u>34.9</u> (30.3–49.6)	<u>10.9</u> (9.4–14.7)	<u>5.0</u> (4.1–6.7)	<u>1.7</u> (1.3–2.2)	<u>222</u> (189–312)
Горьковское Gorkovskoye	<u>128.0</u> (99.5–145.2)	<u>6.9</u> (4.4–14.9)	<u>20.1</u> (16.2–23.0)	<u>31.9</u> (25.8–37.8)	<u>9.9</u> (8.6–10.3)	<u>6.0</u> (4.6–9.1)	<u>1.8</u> (1.4–2.7)	<u>205</u> (168–237)
Чебоксарское Cheboksarskoye	<u>176.0</u> (150.0–285.0)	<u>14.5</u> (6.0–25.1)	<u>48.7</u> (16.9–87.2)	<u>52.4</u> (30.8–90.2)	<u>13.3</u> (9.5–20.3)	<u>12.0</u> (6.0–21.2)	<u>2.6</u> (1.7–4.0)	<u>319</u> (199–533)
Куйбышевское Kuibyshevskoye	<u>154.5</u> (128.8–270.9)	<u>19.9</u> (11.7–32.5)	<u>47.9</u> (37.9–57.9)	<u>47.7</u> (44.4–50.7)	<u>10.8</u> (9.2–11.9)	<u>12.7</u> (10.7–16.1)	<u>2.8</u> (2.3–3.7)	<u>296</u> (262–417)
Саратовское Saratovskoye	<u>112.4</u> (103.1–122.0)	<u>36.7</u> (33.2–41.0)	<u>44.6</u> (41.0–50.8)	<u>44.2</u> (43.2–45.2)	<u>9.3</u> (9.0–9.7)	<u>16.9</u> (15.5–18.2)	<u>3.8</u> (3.5–5.1)	<u>268</u> (260–278)

**Таблица 4.** Соотношение (%–экв) между компонентами солевого состава воды Волжских водохранилищ в августе–сентябре 2015 г.

**Table 4.** Ratio (%–equivalent) between components of salt water composition of the Volga reservoirs in August–September 2015.

Водохранилище Reservoir	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	(HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +Ca <sup>2+</sup> )	(Cl <sup>-</sup> +Na <sup>+</sup> )
Иваньковское Ivanovskoye	44.4	2.8	2.8	32.3	13.2	3.8	0.7	76.7	6.6
Угличское Uglichskoye	42.7	3.2	4.1	32.1	12.9	4.2	0.8	74.8	7.4
Рыбинское Rybinskoye	39.5	2.6	7.9	30.3	15.3	3.7	0.7	69.8	6.3
Горьковское Gorkovskoye	38.7	3.5	7.8	29.4	15.1	4.7	0.8	68.1	8.2
Чебоксарское Cheboksarskoye	34.0	4.6	11.4	30.3	12.9	6.1	0.7	64.3	10.7
Куйбышевское Kuibyshevskoye	30.0	7.2	12.8	30.6	11.4	7.1	0.9	60.6	14.3
Саратовское Saratovskoye	24.2	13.6	12.2	29.0	10.1	9.6	1.3	53.2	23.2



Гидрохимический режим Куйбышевского водохранилища определяют как собственно Волга, так и ее главный приток – р. Кама, имеющая большую минерализацию и несколько иной состав воды по сравнению с Волгой. В верхней части водохранилища, куда поступает вода из Чебоксарского водохранилища, как минерализация, так и соотношение между компонентами солевого состава сохраняются. Ниже устья р. Камы, химический состав воды которой характеризуется большим количеством хлорид-ионов и ионов натрия, доля суммы этих ионов увеличивается в 1.5 и 2 раза по сравнению с Чебоксарским и Рыбинским водохранилищами соответственно. Однако, зарегулирование стока р. Камы привело к уменьшению внутригодовых колебаний суммы ионов, и относительный минимум минерализации может сохраняться и в летний период [Волга и ее жизнь, 1978 (Volga and its life, 1978)]. Вероятно, по этой причине при смешении Волжских и Камских вод не происходит повышения средней по водохранилищу величины суммы ионов, которая в августе 2015 г. составляла 296 мг/дм<sup>3</sup> (табл. 3). В целом по водохранилищу амплитуда колебаний минерализации не превышала 35 мг/дм<sup>3</sup>, и только в приплотинном участке была отмечена максимальная минерализация 416 мг/дм<sup>3</sup>. Несмотря на различия в химическом составе воды рек Волга

и Кама, гидрокарбонаты кальция остаются преобладающими компонентами. Вместе с тем, в Куйбышевском водохранилище доля суммы хлорид- и сульфат-ионов стремится сравняться с долей гидрокарбонатов: 20%–экв и 30%–экв соответственно (табл. 4).

Участок Волги, на котором расположено Саратовское водохранилище, полностью зарегулирован. Роль боковой приточности незначительна, поэтому заметного влияния на солевой состав воды в водохранилище не оказывает. Среднее значение минерализации воды составляет 268 мг/дм<sup>3</sup>, по площади водохранилища величина ее меняется очень мало (табл. 3). Водосбор Саратовского водохранилища находится в пределах лесостепной (правобережье) и степной (левобережье) зон. Для этого региона характерно повышенное содержание хлорид-ионов в почвах [Воронков, 1970 (Voronkov, 1970)], что приводит к увеличению доли хлорид-иона вдвое по сравнению с Куйбышевским водохранилищем. Соотношение между компонентами солевого состава значительно отличается от такового в водохранилищах Верхней Волги: по сравнению с Ивановским водохранилищем доля хлорид- и сульфат-ионов больше в 4.9 и 4.4 раз соответственно, при этом доля гидрокарбонат-иона меньше в 1.8 раз (табл. 4).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По сравнению с 60–70-ми годами прошлого века величина минерализации воды Волжских водохранилищ возросла в среднем на 50 мг/дм<sup>3</sup> и составляла в августе–сентябре 2015 г. 205–319 мг/дм<sup>3</sup>. Преобладающими компонентами солевого состава во всех исследованных водохранилищах являются гидрокарбонаты кальция, но доля их убывает от 77%–экв в Ивановском водохранилище до 53%–экв в Саратовском.

Анализ динамики содержания железа общего в водохранилищах Волги за многолетний

период показал, что полученные нами значения сопоставимы с имеющимися ретроспективными данными. Концентрация железа общего убывает от 0.21–0.33 мг/дм<sup>3</sup> на Верхней Волге до 0.06 мг/дм<sup>3</sup> в Саратовском водохранилище. Доминирующей формой миграции железа является взвешенная. Определяющими факторами формирования как солевого состава воды, так и содержания железа в водохранилищах являются природные условия на водосборе, соотношение вод различного генезиса, интенсивность процессов водообмена в водоеме.

Работа выполнена в рамках темы АААА-А18-118012690104-3 «Закономерности многолетних изменений гидрологических и гидрохимических условий в водоемах бассейна Верхней Волги».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буторин Н.В., Литвинов А.С., Трифонова Н.А. Абиотические факторы формирования качества воды Верхневолжских водохранилищ // Труды ИБВВ АН СССР, № 55 (58), Л.: Наука. 1988. С. 24–41.
- Былинкина А.А., Трифонова Н.А. Гидрохимический режим Угличского водохранилища и факторы его формирования // Фауна и биология пресноводных организмов. Л.: Наука. 1987. С. 250–271.
- Волга и ее жизнь. Л.: Наука. 1978. 350 с.
- Воронков П.П. Гидрохимия местного стока Европейской территории СССР. Л.: Гидрометеиздат. 1970. 188 с.
- Григорьева И.Л., Лупанова И.А., Романов С.Н. Основные виды водопользования, влияющие на качество воды Угличского и Рыбинского водохранилищ // Труды 19-го Международного научно-промышленного форума “Великие реки 2017”. 2017. Т. 1. С. 86–89.

- Дебольский В.К., Григорьева И.Л., Комиссаров А.Б., Корчагина Я.П., Хрусталева Л.И., Чекмарева Е.А. Современная гидрохимическая характеристика реки Волги и ее водохранилищ // Вода: химия и экология. 2010. № 11. С. 2–12.
- Завальцева О.А., Коновалова Л.В., Светухин В.В. Современное эколого-гидрохимическое состояние Куйбышевского водохранилища в пределах Ульяновской области // Вода: химия и экология. 2011. № 9. С. 17–22.
- Зенин А.А. Гидрохимия Волги и ее водохранилищ // Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Новочеркасск. 1971. 40 с.
- Кривдина Т.В., Логинов В.В. Многолетняя динамика гидрохимического режима Чебоксарского водохранилища за период с 1980 по 2014 год. // Эколого-биологические особенности Чебоксарского водохранилища и водоемов его бассейна. С–Пб. 2015. С. 62–76.
- Кудрявцев Д.Д. Сравнительная характеристика гидрохимического режима водохранилищ Верхней Волги: Ивановского, Угличского и Рыбинского // Труды биологической станции Борок, Л., 1950. Вып. 1. С. 80–96.
- Левин Ю.Ю. Динамика современного состояния воды Чебоксарского водохранилища на территории Нижегородской области // Успехи современного естествознания. № 2. 2014. С. 94–100.
- Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л., Гидрометеоздат. 1986. 272 с.
- Литвинов А.С., Законнова А.В. Экологические условия в Рыбинском водохранилище при потеплении климата // Географический вестник. 2014. № 2(29). С. 41–45.
- Рыбинское водохранилище и его жизнь. Л.: Наука. 1972. 364 с.
- Степанова И.К. Формы миграции железа в воде Ивановского водохранилища // Труды ИБВВ АН СССР. Вып. 50 (53). 1982. С. 34–49.
- Трифонов Н.А. Гидрохимическая характеристика Угличского водохранилища по материалам 1955–1958 гг. // Труды Института биологии водохранилищ. АН СССР. 1961. Вып. 4(7). С. 321–327.
- Эдельштейн К.К. Формирование, перемещение и трансформация водных масс Горьковского водохранилища. // Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения. Труды Института биологии водохранилищ. АН СССР. Л.: Наука. 1968. Вып. 18(21). С. 3–71.
- Bolgov M.V., Kocharyan A.G., Lebedeva I.P., Shashkov S.N. The quality of natural waters within the cascade of Volga reservoirs // Arid ecosystems. 2008. Vol. 14. № 33–36, pp. 68–82.

#### REFERENCES

- Bikbulatov E.S., Lebedev Y.M., Litvinov A.S., Bikbulatova E.M., Roshupko V.F., Ershov Y.V., Tseltmovich O.L. 2001. Gidrohimitskaya harakteristika Verhnevolskikh vodohranilishh v letnyuyu mezhn 1997 g. [Hydrochemical characteristics of Upper Volga reservoirs during summer low–water 1997 y. ]. // Wodnye resursy. Tom 28. № 5. S. 606–614. [In Russian]
- Bolgov M.V., Kocharyan A.G., Lebedeva I.P., Shashkov S. N. 2008. The quality of natural waters within the cascade of Volga reservoirs // Arid ecosystems., Vol. 14. № 33–36, pp. 68–82.
- Butorin N.V., Litvinov A.S., Trifonova N.A. 1988. Abioticheskie factory formirovaniya kachestva vody Verhnevolskikh vodohranilishh [Abiotic factors of water quality formation in the Upper Volga reservoirs]. // Trudy IBVV ANSSSR, № 55 (58). L.: Nauka. S. 24–41. [In Russian]
- Bylinkina A.A., Trifonova H.A. 1987. Gidrohimitskiy regim Uglichskogo vodohranilishha i factory ego formirovaniya [Hydrochemical regime of the Uglich reservoir and factors of its formation] // Fauna i biologiya presnovodnykh organizmov. L.: Nauka. S. 250–271. [In Russian]
- Debolskiy V.K., Grigoryeva I.L., Komissarov A.B., Korchagina A.P., Hrustalyova L.I., Chekmaryova E.A. 2010. Sovremennaya gidrohimitskaya harakteristika reki Volgi i ee vodohranilishh // Voda: himiya i ekologiya. № 11. S. 2 – 12. [Modern hydrochemical characteristics of the Volga River and its reservoirs] // Woda: himia i ecologia. № 11. S. 2–12. [In Russian]
- Edelshtein K.K. 1968. Formirovanie, peremeshhenie i transformatsia vodnykh mass Gorkovskogo vodohranilishha [Formation, movement and transformation of Gorkovskoe reservoir water masses] // Trudy IBVV AN SSSR. M. Vyp. 18(21). S. 3–71. [In Russian].
- Grigoryeva I.L., Lupanova I.A., Romanov S.N. 2017. Osnovnye vidy vodopol'zovania, vliyayusie na kachestvo vody Uglichskogo i Rybinskogo vodohranilishh [The main types of water use that affect the water quality of the Uglich and Rybinsk reservoirs] // Trudy 19-go Megdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma “Velikie reki ‘ 2017”. 16–19 maya 2017. N. Novgorod. T. 1. S. 86–89. [In Russian]
- Krivdina T.V., Loginov V.V. 2015. Mnogoletnyaya dinamika gidrohimitskogo rejima Cheboksarskogo vodohranilishha za period s 1980 po 2014 god. [The long-term dynamics of the regime hydrochemical state of the Cheboksary reservoir over the period 1980–2014] // Sbornik nauchnykh trudov “Ekologo–biologicheskie osobennosti Cheboksarskogo vodohranilishha i vodoemov rgo basseina”. S–Pb. S. 62–76. [In Russian].
- Kudryavtsev D.D. 1950. Sravnitel'naya harakteristika gidrohimitskogo regima vodohranilishh Verhney Volgy: Ivan'kovskogo, Uglichskogo i Rybinskogo [Comparative characteristics of the hydrochemical regime of the reservoirs of the Upper Volga: Ivankovsky, Uglich and Rybinsk] // Trudy biologicheskoy stansii Borok. Vyp. 1. S. 80–96. [In Russian].
- Levin U.U. 2014. Dinamika sovremennogo sostoyaniya vody Cheboksarskogo vodohranilishha na territorii Nigegorskoj oblasti [Dynamics of the current state of water in the Cheboksary water reservoir in the territory of the Nizhny Novgorod region] // Uspehy sovremennogo estestvoznaniya. № 2. S. 94–100. [In Russian].

- Linnik P.N., Nabivanets B.I. 1986. Formy migratsii metallov v presnykh poverhnostnykh vodakh.. [Metal migration forms in fresh surface waters]. L.: Gidrometeoizdat. 272 s. [In Russian].
- Litvinov A.S., Zakonnova A.V. 2014. Ecologicheskie uslovia v Rybinskom vodohranilishhe pri poteplenii klimata. [Environmental conditions of Rybinsk Reservoir with climate warming]. // Geographicheski vestnik. № 2 (29). S. 41–45. [In Russian].
- Rybinskoe vodohranilishhe i ego zhizn'. 1972. [Rybinsk Reservoir and its life]. L.: Nauka. 364 s. [In Russian].
- Stepanova I.K. 1982. Formy migratsii zheleza v vode Ivan'kovskogo vodohranilishha [Forms of migration of iron in the water of the Ivankovo reservoir] // Trudy IBVV ANCCCR. Vyp. 50 (53). Rybinsk. S. 34–49. [In Russian].
- Trifonova H.A. 1961. Gidrohimičeskaja harakteristika Uglichskogo vodohranilishha po materialam 1955–1958 [Hydrochemical characteristics of the Uglich reservoir according to the materials of 1955–1958] // Trudy Instituta biologii vodohranilis. AN SSSR. Vyp. 4(7). S. 321–327. [In Russian].
- Volga i ee zhizn'. 1978. . [Volga and its life]. L.: Nauka. 350 s. [In Russian].
- Voronkov P.P. 1970. Gidrohimiya mestnogo stoka Evropeiskoi territorii SSSR [Hydrochemistry of local runoff of European territory USSR]. L.: Gidrometeoizdat. 188 s. [In Russian].
- Zaval'tseva O.A., Konovalova L.V., Svetuhin V.V. 2011. Sovremennoe ekologo-gidrohimičeskoe sostoyanie Kuybyshevskogo vodohranilishha v predelakh Ulyanovskoy oblasti [The modern ecological and hydrochemical state of the Kuibyshev reservoir within the Ulyanovsk region] // Woda: himia i ekologiya. № 9. S. 17–22. [In Russian].
- Zenin A.A. 1971. Gidrohimiya Volgy i ee vodohranilishh [Hydrochemistry of the Volga and its reservoirs] // Avtoref. dis. ...dokt. geogr. nauk. Novočerkassk. 40 s. [In Russian].

## CONCENTRATION OF IRON AND MAIN COMPONENTS OF SALT COMPOSITION IN WATER OF VOLGA WATER RESERVOIRS IN THE PERIOD CLEAR WATER 2015

**O. L. Tselmovich, N. G. Otyukova**

*Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences,  
Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, 152742 Russia, e-mail: otselm@ibiw.yaroslavl.ru*

In August–September 2015, the salt composition and concentrations of the total, dissolved, suspended iron in water reservoirs of the Volga cascade (from Ivankovsky to Saratovskoe) were studied. A tendency has been observed to decrease the concentration of all forms of iron as the water masses move down the cascade. It is shown that the predominant form of iron in water is suspended. Changes in salt composition and the concentrations of iron in reservoir water are due to natural conditions in the catchment area, regulation of water flow and genetic characteristics of water masses.

**Keywords:** Volga water reservoirs, hydrochemical mode, iron, salt composition of water

УДК 504.054

## ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СЕДИМЕНТАЦИИ ВОДОСБОРА ВОЛГИ ВО ВРЕМЯ ПОЗДНЕГО ПАВОДКА

И. А. Немировская, А. Г. Боев, А. М. Титова, А. В. Храмцова

Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН  
117218, Москва, Нахимовский проспект, 36, e-mail: nemir44@mail.ru

Представлены результаты изучения изменчивости органических соединений:  $C_{орг}$ , липидов, алифатических (АУВ) и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в процессе седиментации в водосборе р. Волги. Для аэрозолей влияние климатических зон проявлялось в меньшей степени, чем поступление загрязняющих веществ. В поверхностных водах увеличение концентраций взвеси и АУВ до величин, превышающих ПДК, носит локальный характер. С удалением от промышленных районов их концентрации приближались к фоновым значениям. В процессе седиментации изменялся состав углеводородов: в аэрозолях – преимущественно терригенный для взвеси и АУВ и пирогенный для ПАУ, в поверхностных водах – автохтонный для взвеси и АУВ и нефтяной для ПАУ, в донных осадках – терригенный для алканов и пирогенный для ПАУ.

**Ключевые слова:** р. Волга, аэрозоли, взвесь, донные осадки, органический углерод, алифатические и полициклические ароматические углеводороды.

DOI 10.24411/0320-3557-2018-1-0002

Волжский бассейн в значительно большей степени, по сравнению с другими районами России, испытывает негативное воздействие загрязняющих веществ, так как это практически половина страны по населению, промышленности и сельскому хозяйству. Под действием высокой антропогенной нагрузки территория бассейна Волги стала одной из наиболее экологически неблагоприятных районов [Найденко, 2003 (Naidenko, 2003)].

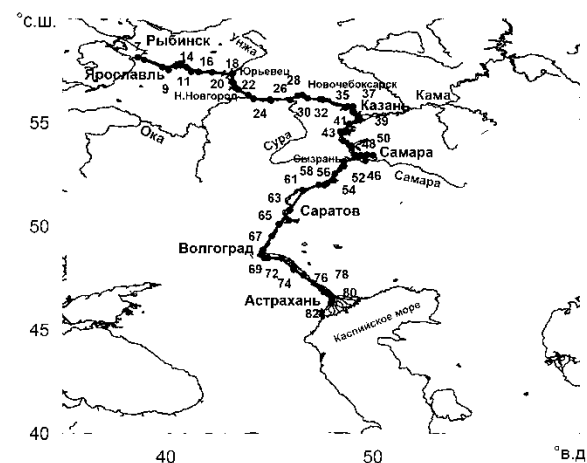
Для оценки современного состояния качества вод и донных осадков (ДО) Волжского бассейна, а также установления тенденций их изменения в последние годы, было проведено изучение седиментационных и биогеохимических процессов в Верхней, Средней и Нижней Волги от порта Борок (Рыбинское водохранилище) до порта Астрахань (2–18 июня 2016 г., НИС «Академик Топчиев», рис. 1).

Эти исследования стали особенно актуальными, так как по указу Президента РФ, 2017 год объявлен «Годом экологии», а водосбор Волги, безусловно, попадает под особо охраняемые природные территории.

Многодисциплинарные исследования бассейна Волги, проведенные во время летней межени 2009 г. (от Конаково до дельты), уста-

### ВВЕДЕНИЕ

новили низкое содержание хлорофилла «а», взвеси, БПК<sub>5</sub>. [Немировская, 2012 (Nemirovskaya, 2012)]. Аккумуляция углеводородных загрязнений происходила в ДО. При этом увеличивалась доля алифатических углеводородов (АУВ) в составе  $C_{орг}$ , а полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) имели нефтяной и пирогенный состав.



**Рис. 1.** Маршрут экспедиции и схема станций в рейсе НИС «Академик Топчиев».

**Fig. 1.** The route of the expedition and the scheme of stations in the cruise of R/V "Akademik Topchiev".

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основу методологии положено изучение взвеси и органических соединений (ОС) –  $C_{орг}$ , липидов, УВ в системе: аэрозоли–поверхностный микрослой (ПМС)–поверхностные воды–ДО. Полученный материал базируется на анализе 273 измерений гранулометрического состава аэрозолей,

6 проб сетчатых аэрозолей, 343 проб взвеси, 65 проб поверхностного слоя ДО.

Гранулометрический состав приводного аэрозоля определяли с помощью счетчика аэрозольных частиц AeroTrak (США). В процессе измерения отображалась концентрация твердых частиц в воздухе по трем каналам:

0.3–1, 1–5, 3 >5 мкм/л. Ежедневно выполняли от 7 до 12 измерений.

Параллельно сбор аэрозолей осуществляли с бака сетевым методом на ходу судна при лобовом и боковом ветре (с отклонением от курса судна не более чем на  $\pm 60^\circ$ ). После экспозиции (около суток) капроновые сети промывали бидистиллированной водой. Сетевой метод предполагает изучение только нерастворимой фракции аэрозолей и позволяет получить большое количество материала для последующих аналитических исследований. В то же время считается, что сетевой метод менее эффективен, чем фильтрационный за счет пропускания мелкой части аэрозолей сквозь сети, на которые оседает всего 10–50% от поступающих аэрозолей (Лукашин и др., 2002).

Поверхностный микрослой, толщиной 300 мкм, отбирали треугольным экраном из нержавеющей стали, рекомендованным МОК/ВМО [Справочники и руководства..., 1985; (Manuals and Guides, 1985)].

Взвесь для изучения ОС выделяли фильтрацией из воды при 0.2 атм. на предварительно прокаленные при  $450^\circ\text{C}$  стекловолокнистые фильтры GF/F (0.7 мкм), а для определения концентрации и состава взвеси – на предварительно взвешенные и отмытые от загрязнений ядерные фильтры (размер пор 0.45 мкм) под вакуумом при 0.4 атм.

ДО отбирали различными пробоотборниками: илестые – лотом с хrapцом, песчанистые – дночерпателем ДАК450 (приборы, созданные в ИБВВ РАН).

Липиды (суммарная фракция, извлекаемая органическими растворителями) выделяли метиленхлоридом на ультразвуковой бане «Сапфир» при  $35^\circ\text{C}$  из подсушенных на воз-

духе проб взвесей на борту судна. Концентрацию липидов (до колоночной хроматографии на силикагели) и АУВ (после колоночной хроматографии) определяли ИК-методом на спектрофотометре IRAffinity-1 фирмы Shimadzu. В качестве стандарта использовали смесь (по объему): 37.5% изооктана, 37.5% гексадекана и 25% бензола [Руководство ..., 1993 (Manual ..., 1985)]. Чувствительность метода – 3 мкг/мл экстракта. Для пересчета концентраций АУВ в концентрации  $C_{\text{орг}}$  использовали коэффициент 0.86 [Методы..., 1980; (Methods..., 1980)].

Состав алканов определяли методом капиллярной газовой хроматографии (колонок длиной 30 м, жидкая фаза ZB-5) на хроматографе Intersmat GC 121-2 (Франция), оснащенным пламенно-ионизационным детектором при программировании температуры от 100 до  $320^\circ\text{C}$  со скоростью  $8^\circ/\text{мин}$ .

Содержание и состав ПАУ определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе «Lab Alliance» фирмы Shimadzu, снабженным колонкой «Диасфер» фирмы БиоХимМак. В качестве стандартов использовали смесь индивидуальных ПАУ фирмы Supelco. В результате были определены индивидуальные полиаренов, рекомендованных EPA [Monitoring, 2011].

Концентрации Сорг в аэрозолях, взвесях и ДО определяли методом сухого сжигания на отечественном анализаторе АН-7529 [Люцарев, 1986 (Lutcarev, 1986)], их состав – на сканирующем электронном микроскопе VEGA-3sem, фирмы TESCAN (Чехия) с микроанализатором фирмы SEM-EDS Oxford (Англия).

Статистическую обработку данных проводили с использованием программного обеспечения пакета Microsoft Excel 2010.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

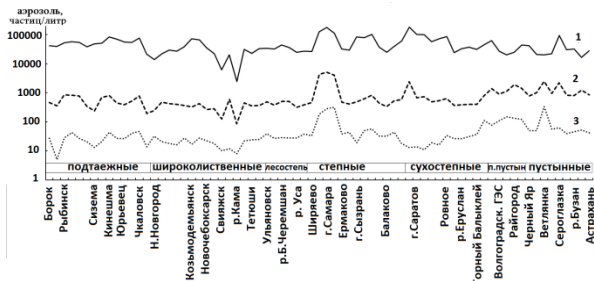
Атмосферный перенос и атмосферное осаждение – основные пути поступления природных и антропогенных соединений с суши, особенно в аридных областях [Лисицын, 2014 (Lisitzin, 2014); Duce, Tindale, 1991; Saliot, 2009; Westervelt et al., 2012 и др.]. Изучение гранулометрического состава аэрозолей показало, что на всем протяжении маршрута преобладают частицы 0.3–1 мкм (рис. 2). Из гео-сфер Земли атмосфера – самая подвижная и переменчивая, в ней быстро меняются потоки вещества, обусловленные движением воздушных масс, скорость которых, особенно для частиц 0.3–1 мкм, достаточно велика [Лисицын, 2014 (Lisitzin, 2014); Wozniak et al, 2014]. По-

этому количество этих частиц в атмосфере, менялось в большом диапазоне: от 2500 до 181000 частиц/л.

Для средних частиц 1.0–2.0 мкм отмечалось практически трёхкратное увеличение их количества (в среднем от 430 до 1370 частиц/л) от лиственных и сухостепных восточноевропейских зон к полупустынным и пустынным прикаспийским зонам.

В атмосфере аридных областей количество частиц обычно возрастает [Лисицын, 2014 (Lisitzin, 2014)]. Согласно полученным данным, наиболее резкое увеличение частиц в атмосфере приурочено к городам и промышленным центрам, расположенным вдоль берегов Волги: Чкаловск, Ульяновск, Самара, Сызрань, Вольск, Саратов, Волгоград и т.д. (рис. 2), то

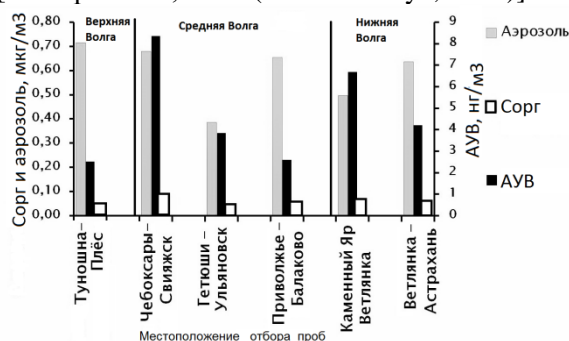
есть к районам, где расположены крупные нефтеперерабатывающие заводы с факелами, ТЭС на газовом топливе и сосредоточено большое количество автомобильного транспорта (особенно в районе от Самары до Сызрани).



**Рис. 2.** Изменчивость гранулометрического состава аэрозолей приводного слоя атмосферы на разных участках р. Волги: 1 – 0,3–1, 2 – 1–5, 3 > 5 мкм

**Fig. 2.** Variability of granulometric composition of aerosols of the atmosphere driving layer on different sections of the Volga river: 1 – 0,3–1, 2 – 1–5, 3 > 5 mkm

Потоки аэрозолей, полученные с помощью сетей, колебались от 0.385 до 0.715 мкг/м<sup>3</sup>, то есть различались незначительно для разных районов Волги (рис. 3). Для сравнения, на разрезе через Атлантический океан потоки аэрозолей, отобранные тем же методом, колебались от 0.012 до 19.890 мкг/м<sup>3</sup> [Немировская, 2017 (Nemirovskaya, 2017)].



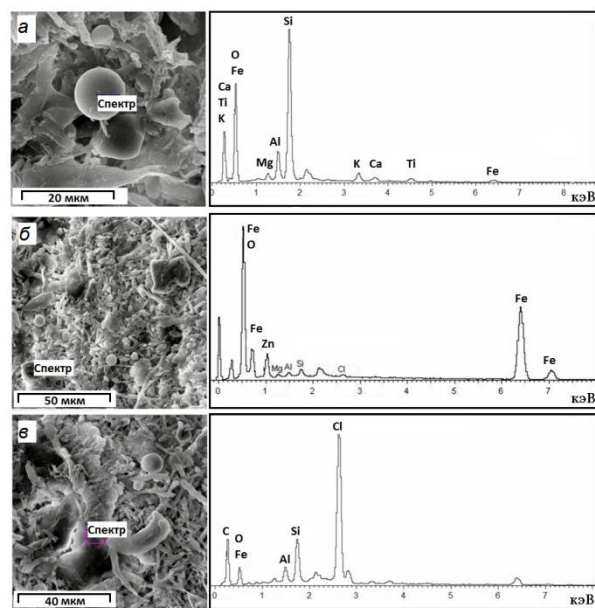
**Рис. 3.** Изменчивость содержания и состава аэрозолей, собранных сетевым методом по маршруту судна в разных участках реки.

**Fig. 3.** Variability of the content and composition of aerosols collected by the network method along the vessel's route in different parts of the river.

В составе проб аэрозолей доминировали растения (в виде спутанно-волоконистой массы) в основном сухопутного происхождения с зёрнами минералов различной степени окатанности. Вторые по значимости были антропогенные частицы (рис. 4).

Деформированная, измельчённая органическая ткань растений содержала до 11% азота и была покрыта неравномерным, субмикронным налётом минеральных алюмо-

силикатов. Валовое содержание углерода ( $C_{\text{общ.}}$ ) в пробах изменялось от 42 до 67 %.



**Рис. 4** Микрофотографии (слева) и спектры SEM-EDS (справа) частиц аэрозолей приводного слоя атмосферы (сетевой метод): а – микросферы золы; б – агрегаты гидроокислов железа; в – фрагменты тонких плёнок; 20, 50, 40 мкм – показана масштабная линейка. На спектре обозначены характеристические линии главных элементов.

**Fig. 4.** Microphotos (left) and spectra SEM-EDS (right) of the aerosol particles of the near-water layer of the atmosphere (the network approach) and ash microspheres; b – the aggregates of iron hydroxides; fragments of thin films; 20, 50, and 40 μm – scale bar is shown. The characteristic lines of the main elements are marked on the spectrum.

В составе антропогенных частиц наиболее часто встречались микросферы золы уноса ТЭС диаметром от 2 до 10 мкм, частицы стали 3 мкм, металлургического шлака от 6 до 11 мкм, агрегаты гидроокислов железа округлой формы 5x10 мкм. Крупные (от 20 до 80 мкм) фрагменты тонких плёнок хлорсодержащего полимера (до 15%) были обнаружены в пробах Верхней и Средней Волги.

Изучение фильтрационной взвеси в поверхностных водах не установило существенных различий в их средних концентрациях для Верхней Средней и Нижней Волги (табл. 1). Их средние величины изменялись в сравнительно узком диапазоне: 4.69–5.67 мг/л. Наиболее высокое содержание, как и ранее [Немировская, 2012 (Nemirovskaya, 2012)], установлено в районе впадения Оки (8.38–10.39 мг/л, рис. 5). Повышенные концентрации определены в устье Ветлуги (9.09 мг/л). Эти концентрации соизмеримы с ПДК для взвеси – 10 мг/л [Перечень..., 1999 (Enumeration...,



1999)]. К устьям рек Оки и Ветлуги приурочены максимальные показатели твердого стока

(70–150 мг/л) [Законнов, 2016 (Zakonnov, 2016)].

**Таблица 1.** Изменчивость в поверхностных водах концентраций взвеси, липидов и АУВ во взвеси разных районов реки

**Table 1.** Variability of the concentrations of suspended matter, lipids and AHCs in the suspended matter of different river regions in the surface waters

Район	Кол-во проб	Взвесь, мг/л		Липиды, мкг/л		АУВ, мкг/л	
		Интервал	$\sigma^*$	Интервал	$\sigma$	Интервал	$\sigma$
Верхняя	12	1.69–8.42	1.96	120.2–473.2	115.2	57.4–277.4	63.7
Средняя	45	5.18	2.13	230.7	152.8	124.5	63.9
		1.76–10.39		60.5–945.2		27.2–389.1	
Нижняя	13	4.69	2.52	199.5	290.8	72.8	209.2
		1.88–9.73		37.2–1004.0		16.1–722.7	
Нижняя	12**	5.67	2.59	206.5	127.3	98.8	21.3
		1.88–8.85		37.2–118.7		16.1–46.2	
		5.39		126.8		32.3	

\* – стандартное отклонение, \*\* – без учета максимальных концентраций липидов и АУВ в Золотом Затоне в г. Астрахань (проба Астрахань-2).

\* – standard deviation, \*\* – excluding the maximum concentrations of lipids and AHCs in the Golden Creek in Astrakhan (Astrakhan-2 sample).

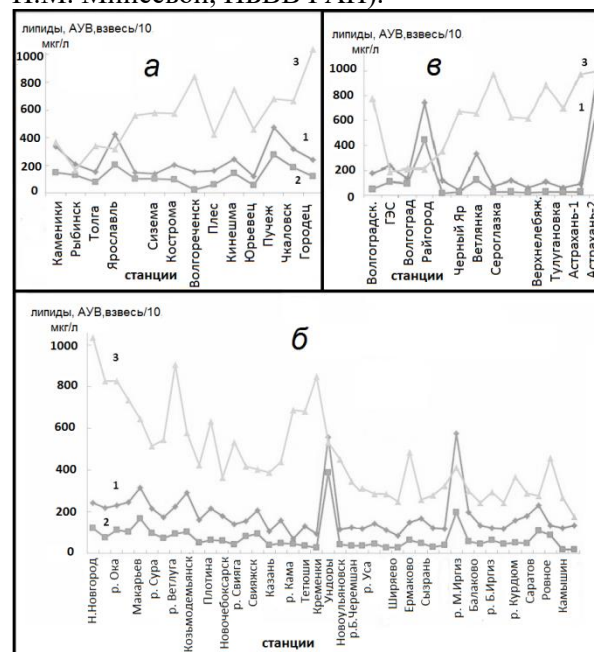
В устье реки Камы содержание взвеси ниже – 6.9 мг/л. Впадение других притоков: Б. Черемшан, Малый и Большой Иргиз, Уса не вызывало увеличения взвеси. Пониженные ее концентрации (1.69–3.11 мг/л) установлены в Рыбинском, в Куйбышевском водохранилищах, в северной части Горьковского водохранилища и после Волгограда. Видимо поэтому при изучении растворенной части  $S_{орг}$  в волжских водах пришли к выводу, что экосистема каскада водохранилищ находится в стабильном отрегулированном состоянии и не нарушает сток органических веществ [Немировская и др., 2017 (Nemirovskaya et al, 2017)].

Перед плотинами в одних случаях происходил рост концентраций взвеси. В частности, перед Новочекбоксарском ее количество возросло с 4.23 до 6.33 мг/л, а в верхнем бьефе Волгоградской ГЭС – до 7.79 мг/л, понижаясь к нижнему бьефу до 1.88 мг/л. В то же время в районе Самарской ГЭС содержание взвеси практически не менялось: 1.84–1.85 мг/л.

Влиянием позднего паводка можно объяснить более высокое содержание взвеси по сравнению с июлем 2009 г., в среднем 3.47 мг/л [Немировская, 2012 (Nemirovskaya, 2012)]. После Волгограда (Нижняя Волга) произошло резкое уменьшение их концентраций. Повышение концентрации взвеси в районе Черного Яра (6.73 мг/л), Сероглазки (9.73 мг/л), Тулугановки (8.85 мг/л), возможно, связаны с абразией и денудацией берегов (рис. 5в).

В составе взвеси так же, как в аэрозолях, в основном преобладали три источника: биогенный, минеральный и антропогенный. Однако в отличие от аэрозолей во взвесах биоген-

ные частицы были представлены различными видами диатомовых водорослей. Видимо поэтому существует корреляция между распределением взвеси и хлорофилла «а»:  $r=0.60$  (данные по хлорофиллу «а» предоставлены Н.М. Минеевой, ИБВВ РАН).



**Рис. 5.** Изменчивость в поверхностных водах концентраций (мкг/л): липидов (1), АУВ (2) и взвеси/10 (3): (а) – Верхней, (б) – Средней, (в) – Нижней Волги.

**Fig. 5.** Variability of concentrations (µg/l) in surface waters: lipids (1), AHCs (2) and suspended matter/10 (3): (a) – Upper, (b) – Middle, (C) – Lower Volga.

В минеральной части взвеси доминировали пелитовые глинистые и гидрослюдыстые частицы крупностью 2–5 мкм, с редкими агрегатами до 10–18 мкм. Часто частицы были по-

крыты плёнкой гидроокислов марганца и железа. Антропогенные частицы, встречались практически во всех пробах и состояли из сфер золы от ТЭС размером до 10 мкм и металлургического шлака, состоящего из окислов тяжёлых металлов: Ti, Cr, Fe, Zn.

Концентрации АУВ, которые отождествляют обычно с нефтяными углеводородами – НУ [Найденко, 2003 (Naidenko, 2003); Качество..., 2015 (Quality..., 2015)] во взвеси поверхностных вод также оказались значительно выше, чем летом 2009 г. [Немировская, 2012 (Nemirovskaya, 2012)], с максимальным диапазоном для Нижней Волги: 161–722.7 мкг/л (табл. 1). Как правило, содержание АУВ возрастало к большим промышленным центрам: городам Ярославль, Н. Новгород, Волгоград, Астрахань (Золотой затон) и др. (рис. 5). При этом увеличивалась доля АУВ в составе липидов с 17–30% до 50–70%, что может косвенно свидетельствовать о влиянии на их концентрации нефтяных загрязняющих веществ.

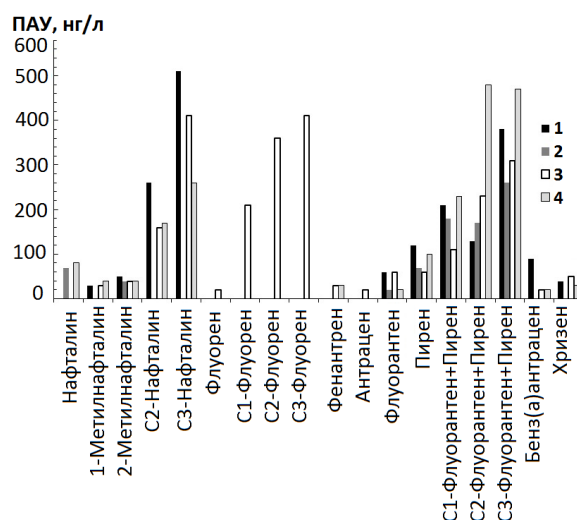
Из-за гидрофобных свойств АУВ легко сорбируются взвесью, и при одинаковых источниках обычно наблюдается корреляция между содержанием АУВ и взвеси [Немировская, 2013 (Nemirovskaya, 2013)]. Наиболее высокие концентрации АУВ в составе взвеси приурочены, к району Рыбинска (76.4 мкг/мг) и Ярославля (64.2 мкг/мг). При впадении реки Ока их содержание составило всего 14 мкг/мг. Для Верхней Волги связь между распределением концентраций взвеси и АУВ отсутствовала:  $r = -0.34$ . Лучше зависимости между этими параметрами для Средней ( $r = 0.53$ ) и особенно для Нижней Волги ( $r = 0.71$ ), где практически отсутствуют большие промышленные центры. Резкий рост концентраций АУВ произошёл в районе Астрахани в районе Золотого Затона (рис. 5).

При переходе из поверхностного микро-слоя к поверхностным водам, несмотря на полный штиль, концентрации АУВ различались всего в 2 раза. Для морских вод эти различия обычно выше [Немировская, 2013 (Nemirovskaya, 2013)].

В растворенной форме концентрации АУВ колебались в интервале 8–24 мкг/л ( $n = 12$ ), и были значительно ниже ПДК для нефтяных УВ – 50 мкг/л. Даже при подходе к Астрахани их содержание не превысило 13 мкг/л и 31% в составе липидов. Нефтяные пленки практически не встречались по маршруту экспедиции. В 90-х годах прошлого века более высокое содержание АУВ было установлено в водах водохранилищ Волжско-Камского каскада гидроузлов – до 990 мкг/л, а

в большинстве районов они колебались в интервале 150–300 мкг/л [Найденко, 2003 (Naidenko, 2003)].

Загрязнение вод в наибольшей степени отмечено для ПАУ, где их содержание достигало 600 нг/л в акватории больших городов. Повышенная доля метилированных гомологов нафталина (рис. 6), приурочена к промышленным центрам, что, несомненно, свидетельствует о загрязнении этих вод нефтепродуктами [АМАР, 2007; Tolosa et.al, 2004]. Влияние свежих пирогенных продуктов на состав ПАУ проявлялось в повышенной доли пирена относительно флуорантена, так как отношение ФЛ/П в большинстве проб  $< 1$ .



**Рис. 6.** Состав ПАУ в поверхностных водах в наиболее загрязненных районах: 1 – Рыбинск, 2 – Ярославль, 3 – Саратов, 4 – Астрахань-2.

**Fig. 6.** Composition of PAHs in surface waters in the most polluted areas: 1 – Rybinsk, 2 – Yaroslavl, 3 – Saratov, 4 – Astrakhan-2.

Содержание АУВ в поверхностном слое ДО обычно зависит от их гранулометрического типа (Немировская, 2013), поэтому в табл. 2 авторы привели и влажность ДО. Концентрации АУВ в илистых ДО практически в 8 раз были выше, чем в песчаных (в среднем 99 и 13 мкг/г соответственно). Примечательно, что средние концентрации  $C_{орг}$  и АУВ оказались близки к данным 2009 г. (табл. 2).

Песчаные ДО считаются загрязненными при превышении содержания АУВ 10 мкг/г, а илистые – 50 мкг/г [Качество..., 2015 (Quality ... 2015); АМАР, 2007; Tolosa et al, 2004]. Полученные концентрации АУВ в ДО Волги в песчаных осадках превышали фон на трех станциях (в районе Костромы – 230, Н. Новгорода – 37 и Астрахани – 53 мкг/г), а в илистых осадках – на 9 станциях



были выше даже 100 мкг/г (в районе от Костромы до Юрьевица и Камышина).

В составе  $C_{орг}$  доля АУВ повышалась (рис. 7) в районе больших городов – особенно Волгограда (6.1%), Н. Новгорода (4.0%), Тольятти (3.4%), Сызрани (2.6%) и Астрахани (1.4%), что характерно для ДО загрязненных

нефтью [Немировская, 2013 (Nemirovskaya, 2013)]. В то же время в районе Саратова доля АУВ была меньше 1%, так как пробу отобрали в сравнительно чистом районе и основные промышленные предприятия были расположены на другом берегу.

**Таблица 2.** Содержание органических соединений и влажности в поверхностном слое донных осадков.

**Table 2.** Content of organic compounds and moisture in the surface layer of bottom sediments.

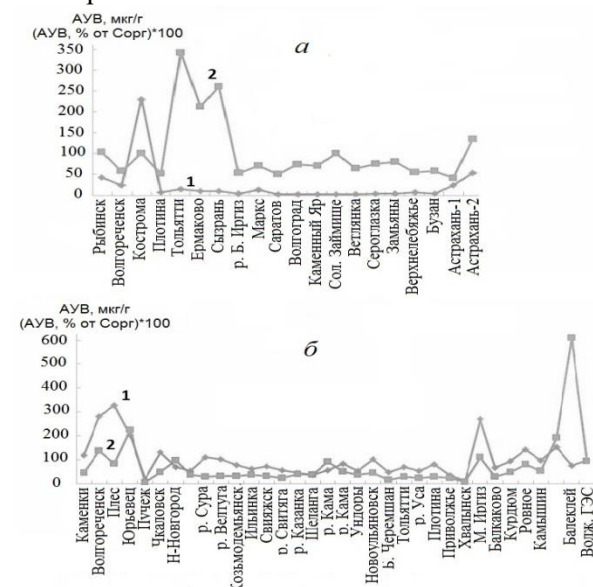
Состав осадков	Количество проб	АУВ, мкг/г		С <sub>орг</sub> , %		Влажность, %	
		интервал	среднее	интервал	среднее	интервал	среднее
2009 г.							
пески	21	2.0–33.3	10.6	0.006–0.499	0.109	14.0–33.5	22.2
илы	11	18.6–485.4	94.4	0.08–3.90	1.88	35.4–65.9	49.5
2016 г.							
пески	23	1.5–53.0	13.2	0.025–0.482	0.121	15.2–33.9	21.1
илы	38	12.1–328.1	98.8	0.105–6.330	1.800	24.0–82.5	60.2

В 2016 г. связь между распределением  $C_{орг}$  и АУВ наблюдалась только для песчаных осадков, где значения  $r(C_{орг}-АУВ)=0.98$ , что, скорее всего, обусловлено их низкой сорбционной емкостью. В илистых осадках даже между влажностью и  $C_{орг}$  значение  $r$  составило всего 0.29, связи между распределением концентраций между АУВ, влажностью и  $C_{орг}$  были еще слабее:  $r(ВЛ-АУВ)=0.06$ , а  $r(C_{орг}-АУВ)=0.19$ . Это предполагает, что разные источники формировали распределение  $C_{орг}$  и АУВ (рис. 7б). Гидродинамические процессы, поступление загрязняющих веществ и морфометрические особенности формирования ДО приводят к большой пестроте в распределении ОС.

В то же время, в большинстве проб состав алканов не соответствовало нефтяному распределению (рис. 8). Алканы – наименее устойчивый углеводородный класс. Они быстро трансформируются в водной среде [Израэль, Цыбань, 2009 (Izrael, Tziuban, 2009); АМАР, 2007]. В составе алканов ДО доминировали высокомолекулярные нечетные терригенные гомологи. Отсутствие нафтеноароматического «горба», а также близкие концентрации н- и изо-алканов (отношения н- $C_{17}/Pr$ , н- $C_{18}/Pf$  колебались от 1 до 0.7) могут указывать на начальную стадию разложения АУВ.

В составе ПАУ в ДО, так же, как и в воде – в отдельных случаях преобладали нафталины (маркеры нефтяного генезиса), а в других – пирогенные полиарены (рис. 9). Уменьшение концентраций пирена, который преимущественно образуется при горении топлива, по

сравнению с флуорантеном может указывать, что в осадки поступают уже преобразованные полиарены.

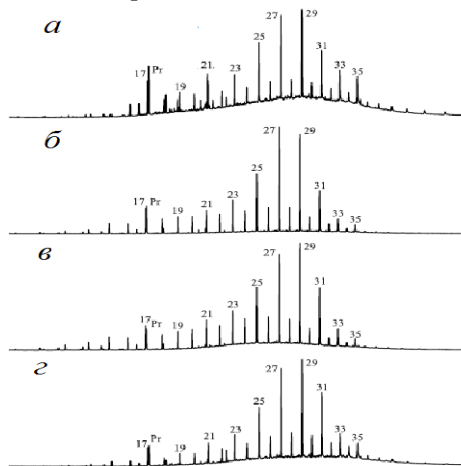


**Рис. 7.** Распределение АУВ (1) в пересчете на сухую массу и в составе  $C_{орг}$  (2) в песчаных (а) и в илистых (б) ДО.

**Fig. 7.** The distribution of AHCs (1) in terms of dry mass and in the composition of  $C_{орг}$  (2) in sandy (a) and silty (b) bottom sediments.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в составе приводного аэрозоля по всему маршруту преобладали частицы 0.3–1 мкм, скорость диффузии которых достаточно велика (Шевченко, 2006). Зависимость в распределении количества частиц в атмосфере от климатических и ландшафтных зон (расти-

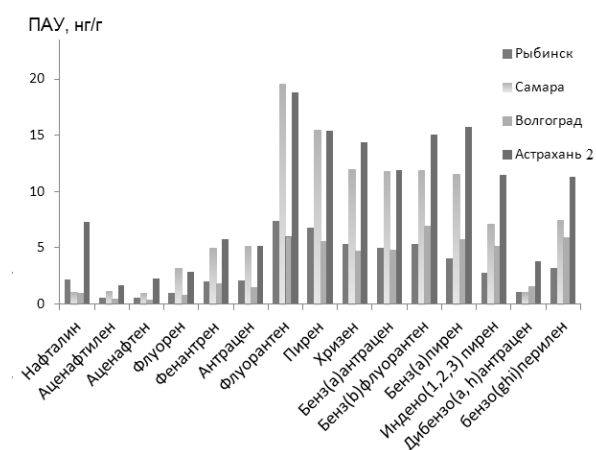
тельного покрова по берегам Волги, силы и направления ветра, температуры и влажности воздуха и т.д.) проявлялась в меньшей степени, чем от антропогенных источников. Обычно в приводных аэрозолях существует три источника ОС: высшие растения суши; водные источники и антропогенные соединения [Gogou et al, 1998].



**Рис. 8.** Хроматограммы алканов из ДО, отобранных в районе Рыбинска (а), Саратова (б), в – Астрахани (в), Камышина (з).

**Fig. 8.** Alkane chromatograms selected near Rybinsk (a), Saratov (b), Astrakhan (v), Kamyshevo (d).

Все три источника подвержены сезонной изменчивости и зависят от природы воздушных масс и направления ветра. Синхронное изменение концентраций аэрозолей,  $C_{org}$  и УВ указывает на близкие источники в их формировании. Это подтверждает состав аэрозолей (рис. 4) и АУВ, в котором обычно доминировали терригенные компоненты. [Немировская, 2017a (Nemirovskaya, 2017); Gogou et al, 1998].



**Рис. 9.** Состав ПАУ в ДО отдельных районов.

**Fig. 9.** The composition of PAHs of bottom sediments in individual regions.

В аэрозолях над промышленными и городскими районами, согласно нашим данным, содержится значительное количество частиц

сажевого углерода размером менее 1.0 мкм (рис. 4). Главными источниками таких частиц являются транспорт и предприятия, сжигающие природный газ и нефтепродукты. Сферические частицы углеродной сажи обладают высокой температурой в момент своего образования, рыхлой пористой поверхностью, и легко поднимаются и переносятся воздушными массами на большие расстояния [Шевченко, 2006 (Shevchenko, 2006)].

Содержание водной взвеси в период наших исследований в основном были ниже ПДК (табл. 1) и значительно ниже средних концентраций для рек Мира (460–500 мг/л) (Лисицын, 2014). Однако эти данные близки к массовой концентрации взвеси в устье Северной Двины – 10 мг/л [Кравчишина, 2009 (Kravchishina, 2009)]. В то же время, необходимо отметить, что полученные величины концентраций во время позднего паводка оказались выше, чем во время летней межени в конце июня – начале июля 2009 г., когда они в среднем составили 3.47 мг/л [Немировская, 2012 (Nemirovskaya, 2012)].

Концентрации АУВ во взвеси поверхностных вод Волги также были выше, чем летом 2009 г., когда они изменялись в интервале 6.2–39.2 мкг/л (при среднем содержании – 16.4 мкг/л), и соответствовали фоновому уровню АУВ в прибрежных акваториях (16–20 мкг/л) [Немировская, 2013 (Nemirovskaya, 2013)]. Более высокие концентрации АУВ в поверхностных водах могут указывать на возрастающее загрязнение (возрождающаяся промышленность и главное – увеличение туристического и маломерного флота), которое проявляется не только в составе взвеси, но и АУВ. С другой стороны, повышение концентраций АУВ во взвеси, но не в растворенном состоянии, могут быть вызваны влиянием паводка, когда в реку при таянии снега попадают накопленные за зиму загрязнения. Определенную роль в изменении содержания загрязняющих веществ во взвеси также должны играть русловые процессы, в частности размыв берегов. Наличие в потоке островов способствует неравномерному распределению наносов [Загрязняющие вещества..., 2017 (Pollutants ..., 2017)], что может приводить к различной сорбции АУВ на взвеси.

Необходимо отметить, что полученные нами концентрации АУВ в воде и в ДО реки Волги оказались значительно ниже, чем в водотоках С-Петербурга, где их среднее содержание в воде изменялось в интервале 3865–12143 мкг/г, а в ДО – 2268–10955 мкг/г [Опекунов и др., 2014 (Opekunov et al, 2014)]. Вли-

яние сезонов на формирование ОС приводит к тому, что в летние месяцы в составе ПАУ в водах водоемов, так же как и Волги определены нефтяные, а в зимние – пирогенные источники [Петрова и др., 2009 (Petrova et al, 2009)]. Во время половодья в малых реках восточной части Финского залива и водотоков Санкт-Петербурга, концентрации ПАУ в воде в среднем составили 600 нг/л, что выше, чем в водах Волги. При этом отмечали уменьшение суммарного содержания ПАУ в реках с увеличением скорости течения.

Благодаря быстрой трансформации в составе алканов и ПАУ в ДО нефтяные гомологи практически не фиксируются. Такое же заключение было сделано при изучении АУВ в ПАУ в прибрежных морских ДО промышленных центров Британской Колумбии [Yunker et al., 2015]. Несмотря на то, что ПАУ входят в список устойчивых органических загрязняющих веществ [Monitoring, 2011], их состав в поверхностных водах и ДО различался. Наименее устойчивые из них, 2-4-циклические полиарены (в частности нафталины), разлагались в процессе седиментации. Более тяжелые и сложные соединения сырой нефти и продукты пиролиза органического сырья обладают большей устойчивостью к микробной деградации. В водной среде ПАУ различного происхождения осаждаются на частицах (глина, ил, организмы, детрит и микробы) и переходят в

ДО, где они подвергаются биотрансформации до более простых и легких соединений [Петрова и др., 2014 (Petrova et al., 2009)]. Накопление и биологическая аккумуляция ПАУ в водной среде и организмах связана с их способностью к метаболизму и химическим превращениям [Хаустов, Редина, 2017 (Khaustov, Redina, 2017)]. Поэтому в ДО в составе ПАУ уже преобладали высокомолекулярные, наиболее токсичные и устойчивые полиарены, продукты горения органического топлива. Однако их суммарные концентрации в основном не превышали 1000 мг/кг, то есть по имеющейся классификации [Monitoring..., 2011], ДО соответствовали концентрациям ПАУ I и II уровням токсичности, и свидетельствуют в основном об умеренном загрязнении.

Из-за многочисленности источников, формирующих интегральный состав АУВ и ПАУ, и быстрой их трансформации, используемые молекулярные маркеры не являются однозначными показателями их происхождения. Нефтяные углеводороды, попадающие в водоемы из антропогенных источников, становятся близки к природным, которые постоянно существует в ходе естественных биогеохимических процессов. Антропогенные углеводороды повышают в воде и осадках их уровень, создавая тем самым современный углеводородный фон.

## ВЫВОДЫ

(промышленных центров) концентрации всех изученных ОС приближались к фоновым.

В процессе седиментации изменялся состав взвеси. На формирование аэрозолей большое влияние оказывают терригенные источники, в поверхностных водах – биогенные (диатомовые водоросли), а в составе ПАУ возрастала роль нефтяных углеводородов. В ДО в составе алканов доминировали терригенные, а в составе ПАУ – пирогенные гомологи.

Для более обоснованных выводов необходимо продолжить исследование в другой сезон года.

Загрязнение обнаружено как в аэрозолях, так и в поверхностных водах и ДО, но только в акваториях непосредственно примыкающим к крупным промышленным центрам. Зависимость в распределении количества частиц приводного аэрозоля от климатических и ландшафтных зон проявлялась в меньшей степени, чем от антропогенных факторов.

В поверхностных водах произошло увеличение концентраций взвеси и АУВ по сравнению с исследованиями 2009 г., что может быть обусловлено не только загрязнением, но и их поступлением с паводковыми водами. С удалением от антропогенных источников

Авторы благодарят В.В. Законнова за помощь в отборе проб ДО. Результаты исследований, представленные в статье, получены в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0016), участие в экспедиционных работах – за счет средств РНФ (проект № 14-27-00114-П), частичная обработка результатов за счет средств РФФИ (грант № 17-05-00356) и проекта ПП РАН I.49 (тема № 0149-2018-0029).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Загрязняющие вещества в водах Волжско-Каспийского бассейна. Астрахань: Из-во Сорокин Р. В., 2017. 406 с.
- Законнов В.В. Илонакопление в системе водохранилищ волжского каскада // Труды Института биологии внутренних водоемов РАН. 2016. вып. 75 (78). С. 30–40.
- Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана. М.: Флинта: Наука, 2009. 532 с.

- Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2014. Под ред. Коршенко А.Н. М.: Наука, 2015. 156 с.
- Кравчишина М.Д. Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав. М.: Науч. мир, 2009. 264 с.
- Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер земли. Мировой океан Т. 2. М.: Научн. мир. 2014. С. 331–571.
- Лукашин В.Н., Исаева А.Б., Серова В.В., Николаева Г.Г. Геохимия осадочного вещества и его потоки в восточной части экваториальной Атлантики // Геохимия. 2002. № 3. С. 306–318.
- Люцарев С.В. Определение органического углерода в морских донных отложениях методом сухого сжигания // Океанология. 1986. Т. 26. Вып. 4. С. 704–708.
- Методические указания. Определение загрязняющих веществ в пробах морских донных отложений. РД 52.10.556-95. М.: Гидрометеиздат, 1996. С. 18–26.
- Методы исследования органического вещества в океане. М.: Наука, 1980. 343 с.
- Найденко В.В. Великая Волга на рубеже тысячелетий. Н. Новгород: Промграфика, 2003. 432 с.
- Немировская И.А. Изменчивость различных соединений в воде, взвеси и осадках Волги летом 2009 г. // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39. № 5. С. 533–545.
- Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научн. мир, 2013, 432 с.
- Немировская И.А. Осадочное вещество и органические соединения в аэрозолях и в поверхностных водах на трансатлантическом разрезе // Геохимия, 2017. № 4. С. 344–357.
- Немировская И.А., Боев А.Г., Титова А.М., Торгунова Н.И. Исследование р. Волги в рейсе научно-исследовательского судна «Академик Топчиев» // Вод. Ресурсы, 2017. Т. 44. № 2. С. 342–345.
- Опекунов А.Ю., Митрофанова Е.С., Шейнерман Н.А. Особенности техногенного осадконакопления в водотоках центральной части Санкт-Петербурга // Биосфера, 2014. Т. 6, № 3. С. 250–256.
- Островская Е.В., Немировская И.А., Бреховских В.Е. и др. Углеводороды воды и взвеси в районе геохимического барьера дельта р. Волга – Северный Каспий // Юг России: экология, развитие. 2009. № 4. С. 150–159.
- Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1999. 304 с.
- Петрова В.Н., Хорошко Л.О., Жаковская З.А., Викторовский И.В. Содержание и состав полиароматических углеводородов в малых реках водосбора восточной части Финского залива // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36, № 4. С. 452–458.
- Руководство по методам анализа морских вод. (1993) РД 52.10. 243-92. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 264 с.
- Справочники и руководства. МОК/ВМО. Париж: Юнеско. 1985. №15. 12 с.
- Хаустов А.П., Редина М. М. Геохимические маркеры на основе соотношений концентраций ПАУ в нефти и нефтезагрязненных объектах. // Геохимия 2017. №1. С. 57–67.
- AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Chapter 4. Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic. Oslo: AMAP, 2007. 87 p.
- Duce R.A., Tindale N.W. Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean. Limnology and Oceanography. 1991. P. 1715–1726.
- Gagosian R.B., Zafiriou O.C., Peltzer T., Alford J.B. (1982) Lipids in aerosols from the Tropical North Pacific: temporal variability. J. Geophysic. Res. 1982. V. 87. № 13. P. 133–144.
- Gogou A. I., Apostolaki M., Stephanou E.G. Determination of organic molecular markers in marine aerosols and sediments: one-step flash chromatography compound class fractionation and capillary gas chromatographic analysis. J. Chromatography. 1998. V. 799. P. 215–231.
- Monitoring of hazardous substances in the White Sea and Pechora Sea: harmonisation with OSPAR's Coordinated Environmental Monitoring Programme . Tromsø: Akvaplan-niva. 2011. P. 71.
- Salot A. Sources markers in aerosols, oceanic particles and sediments // Eur. Phys. J. Conferences. 2009. № 1. P. 189–197.
- Tolosa I., Mora S., Sheikholeslami M.R et al. Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments // Mar. Pol. Bul. 2004. V. 48. P. 44–60.
- Westervelt D. M., Moore R. H., Nenes A., Adams P. J. Effect of primary organic sea spray emissions on cloud condensation nuclei concentrations. Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12. P. 89–101.

- Wozniak A. S., Willoughby A. S., Gurganus S. C., Hatcher P. G. Distinguishing molecular characteristics of aerosol water soluble organic matter from the 2011 trans-North Atlantic US GEOTRACES cruise. *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V.14. P. 8419–8434.
- Yunker M. B., Macdonald, R. W., Ross Neil P. S., Dangerfiel J.S. Alkane and PAH provenance and potential bioavailability in coastal marine sediments subject to a gradient of anthropogenic sources in British Columbia, Canada// *Organic Geoch.* 2015. № 89–90. P. 80–116.

#### REFERENCES

- AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). 2007. Chapter 4. Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic. Oslo: AMAP. P. 87
- Duce R.A., Tindale N.W. 1991. Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean. *Limnology and Oceanography*. P. 1715–1726.
- Gagosian R.B., Zafiriou O.C., Peltzer T., Alford J.B. 1982. Lipids in aerosols from the Tropical North Pacific: temporal variability. *J. Geophysic. Res.* V. 87. № 13. P. 133–144.
- Gogou A. I., Apostolaki M., Stephanou E.G. 1998. Determination of organic molecular markers in marine aerosols and sediments: one-step flash chromatography compound class fractionation and capillary gas chromatographic analysis. *J. Chromatography*. V. 799. P. 215–231.
- Izrael U.A., Tziban A.B. 2009. Antropogennaia Ekologiiia okeana. M.: Flinta: Nauka. S. 532 [In Russian]
- Kachestvo morskikh vod po gidrokhimicheskim pokazateliim. Ezhsegodnik 2014 (Marine water pollution. Annual report). Pod red. Korshenko A.N. 2015. : Nauka. S. 156 [In Russian]
- Khaustov A.P., Redina M.M. 2017. Indicator Ratios of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons for Geoenvironmental Studies of Natural and Technogenic Objects// *Water Resources*, 2017, Vol. 44, № 7, P. 903–913. DOI: 10.1134/S0097807817070065
- Kravchichina M.D. 2009. Vzveshennoe veshchestvo Belogo moria i ego granulometricheskii sostav. M.: Nauch. Mir. S. 264 [In Russian]
- Lisitzin A.P. 2014. Sovremennye predstavleniia ob osadkoobrazovanii v okeanakh i moriakh. Okean kak prirodnyi samopisec vzaimodeistviia geosfer zemli. Mirovoi ocean T. 2. M.: Nauch. Mir. S. 331–571. [In Russian]
- Lukashin V.N., Isaev A.B., Serova B.B., Nikolaeva G.G. 2002. Geokhimiia osadochnogo veshchestva i ego potoki v vostochnoi chasti ekvatorialnoi Atlantiki (Geochemistry of sedimentary matter and its flows in the eastern part of the equatorial Atlantic) // *Geokhimiia*. № 3. S. 306–318. [In Russian]
- Lutcarev S.V. 1986. Opredelenie organicheskogo ygleroda v morskikh donnykh otlozhseniakh metodom sykhogo sozhseniia// *Okeanologiiia*. T. 26. V. 4. S. 704–708. [In Russian]
- Metodicheskie ykazaniia. 1996. Opredelenie zagriazniaushchikh veshchestv v probakh morskikh donnykh otlozhsenii. RD 52.10.556-95. M.: Gidrometeoizdat, S. 18–26. [In Russian]
- Metody isledovaniia organicheskogo veshchestva v okeane. 1980. M.: Nauka. S. 343 [In Russian]
- Monitoring of hazardous substances in the White Sea and Pechora Sea: harmonisation with OSPAR's Coordinated Environmental Monitoring Programme. 2011. Tromsø: Akvaplan-niva. P. 71
- Naidenko V.V. 2003. Velikaia Volga na rubezhse tysiacheletii. Nizhsnii Novgorod: Promgrafika, 432 s. [In Russian]
- Nemirovskaya I.A. 2012. Variations in Different Compounds in Volga Water, Suspension, and Bottom Sediments in the Summer of 2009 // *Water Resources*. 2012. Vol. 39. № 5. P. 533–545
- Nemirovskaya I.A. 2013. Neft v okeane (zagriaznenie I prirodnye potoki). M.: Nauch. Mir. 432 s.[In Russian]
- Nemirovskaya I.A. 2017. Sedimentary Matter and Organic Compounds in the Aerosols and Surface Waters along the Transatlantic Section // *Geochemistry International*. Vol. 55. № 4. P. 367–379.
- Nemirovskaya I.A., Boev A.G., Titova A.M., Torgynova N. I. 2017. Studying the Volga R. in the Voyage of the R/V Akademik Topchiev // *Water Resources*. Vol. 44, № 2, pp. 342–345. DOI: 10.1134/S0097807817020099
- Opekunov A.U., Mitrofanova E.S., Sheinerman N.A. 2014. Osobennosti tekhnogenogo osadkonakopleniia v vodotokakh zentralnoi chasti Sankt-Peterburga // *Biosfera*, T. 6, № 3. S. 250–256. [In Russian]
- Ostrovskaiia E.V., Nemirovskaiia I.A., Brechovskikh V.E. i dr. 2009. Uglevodorody vody i vzvesi v rayone geokhimicheskogo barera delta r. Volga – Severnyi Kaspii // *Ug Rossii: ekologiiia, razvitie*. № 4. S. 150–159. [In Russian]
- Perechen rybokhoziaistvennykh normativov: predelno dopustimyykh koncentrazii (PDK) i orientirovochno bezopasnykh urovnei vozdeistviia (OBUV) vrednykh veshchestv dlia vodnykh obektov, imeushchikh rybokhoziaistvennoe znachenie. 1999. M.: VNIRO, 304 s. [In Russian]

- Petrova V.N. et al, 2009. The Concentration and Composition of Polyaromatic Hydrocarbons in Small Rivers in the Drainage Area of the Eastern Gulf of Finland // *Water Resources* Vol. 36, № 4. P. 431–437. DOI: 10.1134/S009780780904006X
- Rykovodstvo po metodam analiza morskikh vod. RD 52.10. 243-92. S-Peterbyrg: Gidrometeoizdat, 1993. 264 s. [In Russian]
- Salot A. 2009. Sources markers in aerosols, oceanic particles and sediments // *Eur. Phys. J. Conferences*. № 1. P. 189–197.
- Spravochniki i rukovodstva. 1985. Parizhs: Unesko. № 15. 12 p. [In Russian]
- Tolosa I., Mora S., Sheikholeslami M.R et al. 2004. Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments // *Mar. Pol. Bul.* V. 48. P. 44–60.
- Westervelt D. M., Moore R. H., Nenes A., Adams P. J. Effect of primary organic sea spray emissions on cloud condensation nuclei concentrations. *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 89–101.
- Wozniak A. S., Willoughby A. S., Gurganus S. C., Hatcher P. G. Distinguishing molecular characteristics of aerosol water soluble organic matter from the 2011 trans-North Atlantic US GEOTRACES cruise. *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 8419–8434.
- Yunker M. B., Macdonald, R. W., Ross Neil P. S., Dangerfiel J.S. 2015. // Alkane and PAH provenance and potential bioavailability in coastal marine sediments subject to a gradient of anthropogenic sources in British Columbia, Canada// *Organic Geochem.* № 89–90. P. 80–116.
- Zagreznaushichie veshchestva Volzhsko-Caspiskogo basseina. Astrahan: Sorokin R.V. 2017. 406 s. [In Russian]
- Zakonov V.V. 2016. Ilonakoplenie v sisteme vodokhranilishch volzhskogo kaskada//Trydu Instituta vny-trennih vod. Vup. 75 (78). S. 30–40. [In Russian]

## **ORGANIC COMPOUNDS IN THE PROCESS OF THE SEDIMENTATION OF THE VOLGA WATER DURING LATE FLOOD**

**I. A. Nemirovskaya, A. G. Boev, A. M. Titova, A. M. Khramtsova**

*Institute of Oceanology. P. Shirshov RAS Moscow, Nakhimovsky prospect, 36, e-mail: nemir44@mail.ru*

There are presented the results of study of variability of organic compounds: organic carbon, lipids, aliphatic hydrocarbons (AHCs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the process of sedimentation in the reception basin of the Volga River. It was established that influence of climate zones played less role for aerosols than the input of contaminants. The increase of the concentrations of suspended matter and AHCs in surface waters to values exceeding MPC has local character. With the distance from the industrial areas, their concentration decrease to background values. The composition of the hydrocarbons changes during the process of sedimentation. In aerosols alkanes were predominantly terrigenous; in surface waters – autochthonous, in the sediments – terrigenous again. During the process of sedimentation the role of the oil compounds reduces in the composition of PAHs. In the bottom sediments PAHs consisted mainly of more sustainable high-molecular pyrogenic compounds.

**Keywords:** Volga River, aerosols, suspended matter, bottom sediments, organic carbon, aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons



## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ДОННЫХ ОСАДКОВ ВЕРХНЕВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГРУНТОВОЙ СЪЕМКИ 2016 г.

А. В. Ермаков<sup>1</sup>, В. В. Законнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН 119017 Москва, Пыжевский пер, 7, e-mail: a.v.ermakov@gmail.com

<sup>2</sup>Институт биологии внутренних вод им. И.Д.Папанина РАН  
152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: ZAK@ibiw.yaroslavl.ru

В работе изложены результаты исследования теплопроводности (коэффициента теплопроводности) донных осадков трех водохранилищ верхневолжского каскада: Ивановского, Угличского и Рыбинского по материалам грунтовой съемки 2016 г. В полевых, а затем в лабораторных условиях теплопроводность определяли нестационарным методом линейного источника тепла постоянной мощности. Измерения выполняли на 36 стандартных грунтовых станциях. Теплофизические исследования на водохранилищах возобновлены после значительного перерыва, при этом полученные значения впервые привязаны к конкретным станциям. Такой подход дает возможность не только выявить связь величины теплопроводности с типами осадков и изменениями характеристик в пределах типа, но и оценить ее пространственную изменчивость и связь с условиями осадконакопления.

*Ключевые слова:* теплопроводность, донные осадки, водохранилища.

DOI 10.24411/0320-3557-2018-1-0003

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование теплофизических свойств осадков необходимо при определении теплообмена между донными отложениями и водной толщей, изучении термического режима грунтов и придонного слоя воды. В холодное время года донные отложения расходуют накопленный теплозапас, определяя температурные условия развития гидробионтов [Буторин и др., 1982 (Butorin et al., 1982)]. Эволюция процессов осадконакопления после заполнения водохранилища приводит к изменению пло-

щадей распространения грунтового комплекса, изменению состава седиментированных донных осадков, что сказывается на их теплофизических свойствах, а в итоге и на составляющих теплового баланса водоема. Поэтому анализ теплофизических свойств осадков целесообразно включать в комплекс исследований при проведении стандартных грунтовых съемок. На водохранилищах Верхней Волги теплофизические исследования возобновлены авторами после значительного перерыва.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование теплопроводности донных осадков Ивановского, Угличского и Рыбинского водохранилищ проводили в ходе комплексной гидробиологической экспедиции в августе 2016 г. на НИС «Академик Топчиев» ИБВВ РАН.

Пробы отбирали лотом с храпцом, грунтовой трубкой ГОИН и автоматическим коробчатым дночерпателем (ДАК-250). Использование разных пробоотборников позволило выявить особенности получаемых образцов с точки зрения последующего определения теплопроводности. Наиболее представительные пробы дает отбор дночерпателем, так как из них можно вырезать образец с ненарушенной структурой необходимого объема, где возможно провести несколько измерений. В то же время нарушение структуры для несвязных грунтов существенно не влияет на получаемое значение теплопроводности, так как она, в большей мере, определяется их влажностью, наличием органических остатков, минеральным и гранулометрическим составом. Использование гравитационных трубок наиболее ин-

формативно для послойного определения теплопроводности илистых отложений. Это позволяет проследить ее изменения по стратиграфическим горизонтам. На тех станциях, где несколько проб отбирали разными пробоотборниками, теплопроводность определяли во всех образцах. Теплопроводность осадков, взятых дночерпателем и лотом на одних станциях, практически одинакова, что свидетельствует о достаточной представительности полученных проб.

Определение теплопроводности проводили с помощью игольчатого зонда ЛИТОС, (метод линейного источника тепла постоянной мощности) и экспериментального зонда аналогичной конструкции. Пробы осадков Ивановского и Угличского водохранилищ исследовали на судне сразу после отбора, Рыбинского – в лаборатории по завершении рейса по ранее опробованным методикам [Буторин и др., 1975 (Butorin et al., 1975)]. Несколько проб исследовали и в полевых, и в лабораторных условиях.

Физико-химические свойства осадков определяли в лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН: объемную массу – методом режущего цилиндра (объем 14 см<sup>3</sup>); влажность – методом высушивания до постоянной массы при 105°C; гранулометрический состав анализировали в сырых пробах с применением

электромагнитной просеивающей установки “Analysette-3” Alfred Fritsch & CO (Германия); содержание органического вещества определяли, как потерю массы при прокаливании (ППП) в муфельной печи при температуре 600°C.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Всего выполнили 107 определений теплопроводности на 36 станциях (см. таблицу), из них 10 – в акватории Иваньковского, 8 – Угличского и 18 – Рыбинского водохранилищ. При рассмотрении связей теплопроводности с другими параметрами станции Мышкин и Глебово объединены со станциями Иваньковского и Угличского водохранилищ, как обособленные в геолого-геоморфологическом отношении от остальных станций Рыбинского водохранилища. Средние значения теплопроводности для Иваньковского и Угличского водохранилищ практически одинаковы: 1.01 и 1.02 Вт/м·°K, как и дисперсия среднего – 0.29 и 0.30, соответственно. Для Рыбинского водо-

хранилища среднее значение существенно выше: 1.21 Вт/м·°K при меньшей дисперсии 0.17.

В географическом распределении значений теплопроводности явных закономерностей не наблюдали. При этом из всей совокупности значений (рис. 1.) можно условно выделить “фоновые” (менее 1.0 Вт/м·°K) и “экстремальные” (более 1.5 Вт/м·°K), учитывая, что сами по себе все полученные значения абсолютно типичные для донных осадков. Фоновые значения демонстрируют тенденцию к увеличению с юга на север, которая не выражена статистически значимым трендом.

Теплопроводность донных осадков Иваньковского, Угличского и Рыбинского водохранилищ

Thermal conductivity of bottom sediments of Ivankovskoye, Uglichskoye and Rybinskoye reservoirs

Станция Station	Координаты, с.ш, в.д. Coordinates, north, east	Теплопроводность, Вт/м·°K Thermal conductivity, W/ m·°K
Иваньковское Ivankovskoye		
Лисицы Listsy	56.78144°, 36.33017°	1.53
Городня Gorodnya	56.70111°, 36.34662°	1.77
Видогощи Vidogoschi	56.70353°, 36.36978°	0.32
Горки Gorki	56.63399°, 36.55004°	0.71
Шоша Shosha	56.59176°, 36.43668°	0.92
Свердлово Sverdlovo	56.63748°, 36.60896°	0.56
Созь Soz	56.79789°, 36.72033°	0.65
Мошковичский залив Moshkovichskiy zaliv	56.76559°, 36.79436°	1.91
Уходово Ukhodovo	56.79656°, 36.95369°	0.98
Липня Lipnya	56.76791°, 37.03257°	0.72
Угличское Uglichskoye		
Дубна Dubna	56.79657°, 37.26400°	1.68
Кимры Kimry	56.86785°, 37.36117°	2.00
Белый Городок Bely Gorodok	56.98826°, 37.48156°	1.09
Медведица Medveditsa	57.07086°, 37.51732°	0.58
Кашинка Kashinka	57.26839°, 37.72606°	0.54

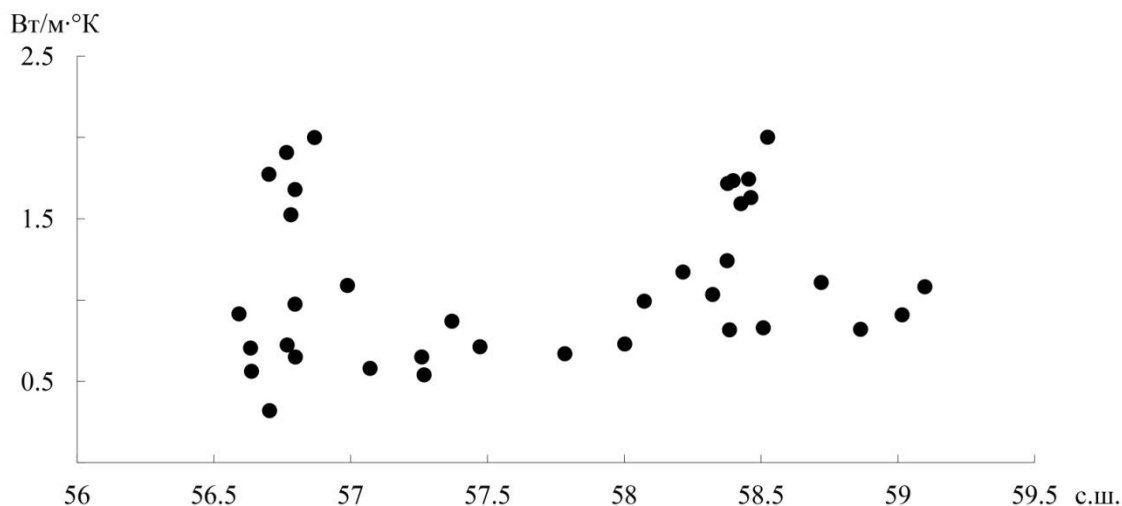


Калязин Kalyazin	57.25966°, 37.85654°	0.65
Прилуки Priluki	57.37000°, 38.08928°	0.87
Грехов ручей Grekhov Ruchey	57.47262°, 38.28444°	0.71
Рыбинское Rybinskoye		
Мышкин Myshkin	57.78274°, 38.46171°	0.67
Глебово Glebovo	58.00181°, 38.42470°	0.73
Коприно Koprino	58.07314°, 38.29941°	0.99
Молога Mologa	58.21452°, 38.45981°	1.17
Брейтово Breytovo	58.32300°, 37.94975°	1.03
Первомайка Pervomayka	58.39783°, 37.74595°	1.73
Себла Sebla	58.45440°, 37.62996°	1.74
Противье Protivye	58.52397°, 37.53165°	2.00
Ваганиха Vaganikha	59.09871°, 37.72983°	1.08
Любец Lyubets	59.01558°, 37.85336°	0.91
Мякса Myaksa	58.86366°, 38.12815°	0.82
Ягорба Yagorba	58.71995°, 38.26646°	1.11
Средний Двор Sredniy Dvor	58.50808°, 38.34777°	0.83
Измайлово Izmaylovo	58.46253°, 38.47842°	1.63
Центральный Мыс Tsentralny Mys	58.42645°, 38.28476°	1.59
Наволоок Navolok	58.37778°, 38.38935°	1.72
Всехсвятское Vsekhsvyatskoye	58.38476°, 38.63440°	0.82
Ухра Ukhra	58.37596°, 38.88025°	1.24

Две группы экстремальных значений привязаны к относительно узким широтным зонам протяженностью ~0.15–0.17 градуса на русловых участках Ивановского и Угличского водохранилищ (за исключением Мошковичского залива, находящегося в зоне влияния подогретых вод Конаковской ГРЭС), и на Моложском и Главном плесах Рыбинского водохранилища. Как правило, на этих участках развиты берега абразионного типа, что может быть причиной накопления крупнозернистых наносов. Кроме того, для этих районов характерны конечно-моренные образования московского оледенения, а на площади, занятой Рыбинским водохранилищем, предполагаемая максимальная граница осташковского оледенения [Государственная..., 2000 (Gosudarstvennaya..., 2000)] проходит между станция-

ми с экстремальными значениями. Эти ледниковые образования могут являться источниками высокотеплопроводных тяжелых минералов с плотностью  $> 2.8 \text{ г/см}^3$ .

Примером изменения теплопроводности может служить сравнение теплопроводности донных осадков на станции Белый Городок и аллювиального песка с пляжа у этой станции: в песке под обрывом абразионного уступа террасы теплопроводность составляет  $2.26 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{К}$ , а на глубине 10 м –  $1.09 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{К}$ . Таким образом, на относительно небольшом расстоянии теплопроводность изменяется более чем в два раза, что свидетельствует о влиянии сортировки осадочного материала при изменении скоростей течения и разбавлении его органическим веществом и минеральными частицами из других источников.

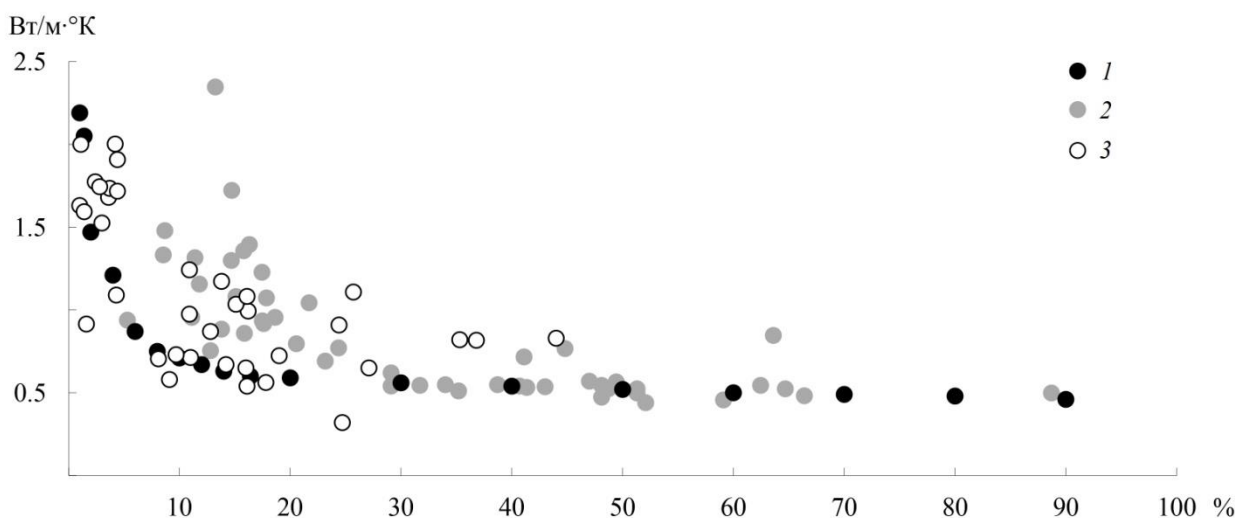


**Рис. 1.** Распределение теплопроводности (Вт/м·°К) по широте.

**Fig. 1.** Latitudinal distribution of thermal conductivity.

Органическое вещество имеет наиболее низкую теплопроводность из компонентов осадков (за исключением газовых включений); теплопроводность торфа и сапропеля составляет 0.46–0.47 Вт/м·°К, воды – 0.62 Вт/м·°К, минеральных частиц – более 0.7 Вт/м·°К. Поэтому теплопроводность донных осадков обычно демонстрирует обратную зависимость

от ППП и влажности. Для грунтов и осадков верхневолжских водохранилищ ранее была установлена обратная зависимость теплопроводности от содержания органики (Бакастов, 1966); наиболее значительное уменьшение теплопроводности происходит в интервале 0–10 % массы органики (рис. 2).



**Рис. 2.** Зависимость теплопроводности осадков от потери массы при прокаливании по данным грунтовых съемок разных лет. 1 – по С.С. Бакастову [1966], 2 – по Н.В. Буторину с соавторами [1982], 3 – съемка 2016 г.

**Fig. 2.** Plot of thermal conductivity of sediments versus loss on ignition according to the data of soil surveys of different years. 1 – from Bakastov (1966), 2 – from Butorin et al. (1982), 3 – by 2016 year survey.

Менее четко эта зависимость проявляется по данным [Буторин и др., 1982 (Butorin et al., 1982)] для Рыбинского водохранилища: отдельные значения демонстрируют заметный разброс, интервал максимальных изменений теплопроводности смещен правее, к 10–20 % массы органики. Результаты съемки 2016 г. также демонстрируют значительный разброс значений. Характерная для проб 2016 г. более

высокая теплопроводность связана с уменьшением количества органики в осадках, которая ранее поступала за счет размыва торфяных сплавин, всплывших в результате метаногенеза [Законнов, 1995 (Zakonnov, 1995)].

При разделении станций на две группы (в первую входят станции Иваньковского, Угличского водохранилищ и станции Мышкин и Глебово, во вторую – остальные станции Ры-

бинского водохранилища) значения коэффициентов корреляции увеличиваются, и зависимость теплопроводности от содержания органики становится значимой для обеих выделенных групп (рис. 3). Расположение точек на графике указывает на большую теплопроводность минеральной составляющей осадков Рыбинского водохранилища, при равном или большем содержании в них органики. Наименьшее значение теплопроводности 0.32 Вт/м·°К, измеренное в образце со станции Видогощи (затопленное пойменное озеро), скорее всего связано с присутствием в пробе газовых включений, образовавшихся при разложении органики, которое оценивается в 25%, а вниз по керну – до 40%.

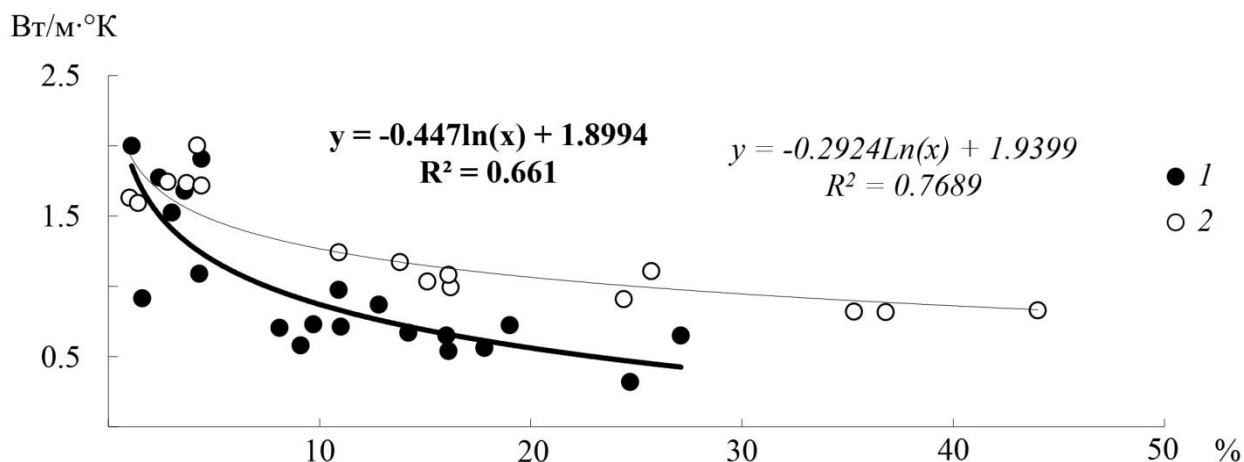
Между теплопроводностью и влажностью, теплопроводностью и сухой объемной массой исследованных осадков также имеется значимая корреляция, несмотря на большой разброс значений (рис. 4, 5). Самые высокие значения теплопроводности измерены в пробах с влажностью менее 40 % массы и объемной массой более 0.9 г/см<sup>3</sup>, что характерно для осадков со значительной долей песчаного материала. Теплопроводность осадков с влажностью более 60 % массы и объемной массой менее 0.4 г/см<sup>3</sup> значительно варьирует, что свидетельствует о присутствии в алевритовой или пелитовой фракции минералов как с высокой, так и с низкой зерновой (фракционной) теплопроводностью.

О разнородном минеральном составе исследованных осадков свидетельствует и разброс значений в пределах их основных типов (рис. 6). Для первых двух типов медианные значения близки, для песка и илистого песка

значения 2016 г. существенно выше, что может быть следствием уменьшения содержания органического вещества в донных осадках этих типов.

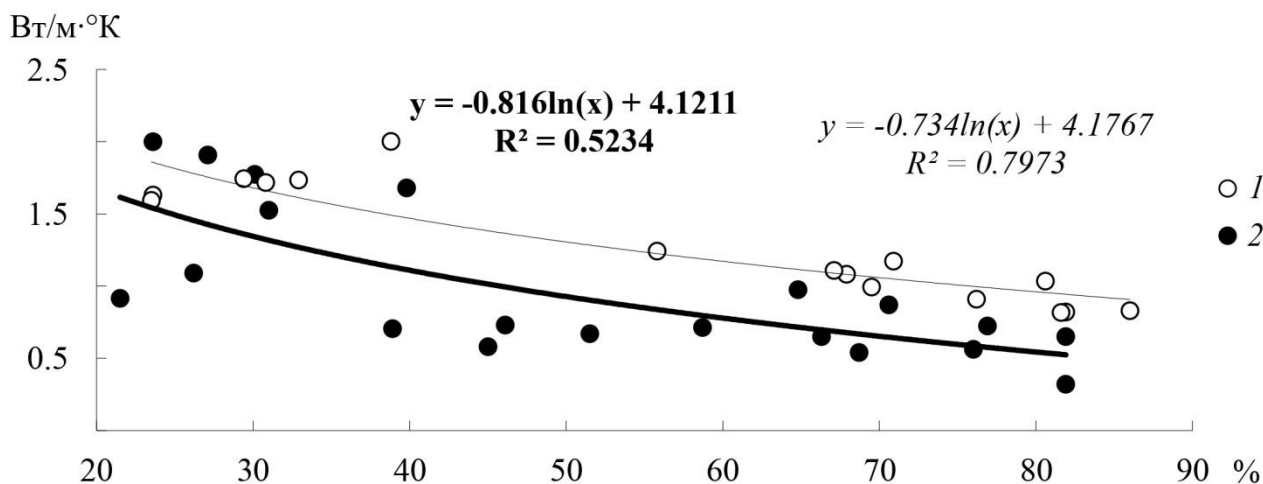
Изменение теплопроводности происходит не только в пространстве, но и во времени в основном из-за уплотнения однотипных осадков или изменения вклада основных источников осадочного материала, что проявляется при послойном анализе донных отложений. При отборе грунтовой трубкой на станции Липня получена колонка осадков длиной около 40 см, верхние 5 см которой представлены полужидким наилком, глубже залегает горизонт серого глинистого ила мощностью 35 см, нижние 5 см сложены первичным грунтом, отличающимся по консистенции и цвету от верхней части осадка.

Теплопроводность регистрировали поинтервально через 5 см (рис. 7). Самая верхняя часть керна (0–5 см) растекалась, что не позволило опробовать этот интервал. Теплопроводность первичного грунта составляет 0.61 Вт/м·°К. В верхней части горизонта ила наблюдали постепенное увеличение теплопроводности от 0.52 до 0.82 Вт/м·°К, что может быть интерпретировано как следствие уменьшения влажности при уплотнении осадка. Интервал 30–40 см, характеризующийся двумя близкими значениями теплопроводности (0.74 и 0.72 Вт/м·°К), по этому параметру может быть выделен в отдельный слой, хотя визуально различий между отложениями этого и вышележащих интервалов не наблюдается. Этот залегающий на первичном грунте слой, по-видимому, откладывался в других условиях, чем вышележащий.



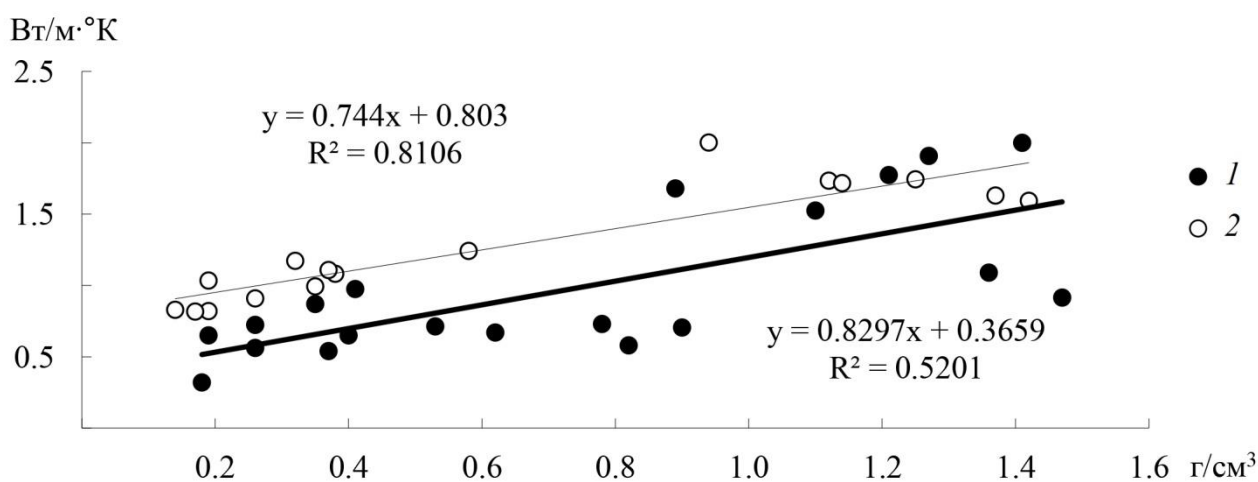
**Рис. 3.** Зависимость теплопроводности от потери массы при прокаливании. 1 – станции от Лисиц до Глебово, 2 – станции от Коприно до Ухры. Жирным выделены линия тренда и уравнения для станций Ивановского и Угличского водохранилищ.

**Fig. 3.** Plot of thermal conductivity versus loss on ignition. 1 – stations from Lisitsy to Glebovo, 2 – station from Koprino to Ukhra. Bold trend line and equations for Ivankovskoe and Uglichskoe reservoirs stations.



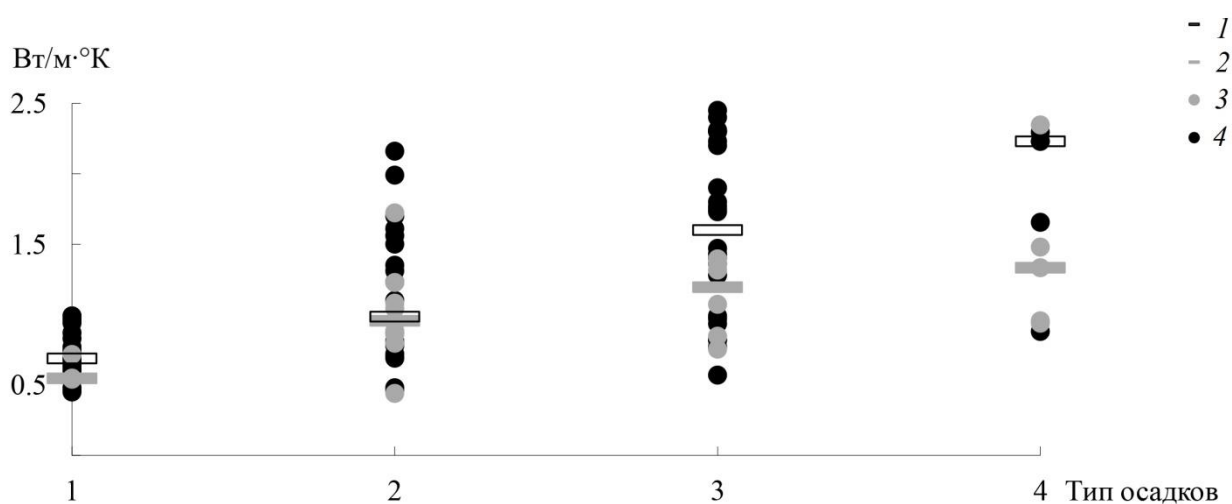
**Рис. 4.** Зависимость теплопроводности от влажности. Обозначения – см. рис. 3.

**Fig. 4.** Plot of thermal conductivity versus water content. Legend – see fig. 3.



**Рис. 5.** Зависимость теплопроводности от объемной массы. Обозначения – см. рис. 3.

**Fig. 5.** Plot of thermal conductivity versus dry bulk density. Legend – see fig. 3.



**Рис. 6.** Теплопроводность основных типов донных осадков (1 – глинистый ил, 2 – песчаный ил, 3 – илистый песок, 4 – песок). 1–2 – медианные значения, 3–4 – отдельные замеры; 2, 3 – значения по [Буторин и др., 1982], 1, 4 – данные съемки 2016 г.

**Fig. 6.** Thermal conductivity of the main types of bottom sediments. (1 – clayely silt, 2 – sandy silt, 3 – silty sand, 4 – sand). 1–2 – median values, 3–4 – individual values: 2, 3 – data from (Butorin et al., 1982), 1, 4 – 2016 year survey data.

Таким образом, исследование теплопроводности позволяет в визуальном однородном вертикальном разрезе донных осадков выявить неоднородности строения, дальнейшая интерпретация которых возможна при выполнении

более подробного анализа физических свойств. Измерение теплопроводности в экспедиционных условиях можно рассматривать в качестве экспресс-метода определения особенностей строения керна.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сравнении с данными предыдущих исследований, полученные авторами значения теплопроводности донных осадков оказываются выше, что можно рассматривать, как результат эволюции процессов осадконакопления после заполнения водохранилищ. Увеличение площади дна, занимаемой песчаными наносами, и уменьшение количества органического вещества во вновь откладывающихся тонкодисперсных отложениях способствует увеличению средних значений теплопроводности. В свою очередь, это приводит к уменьшению теплоемкости вторичных донных осадков и сокращению вклада теплозапаса в них в тепловой баланс водохранилищ. Значительная

изменчивость теплопроводности для отдельных типов осадков, по-видимому, связана с изменениями в минеральном составе: исследованная территория достаточно велика, чтобы иметь широкий спектр источников поступления терригенного материала. Это предположение нуждается в уточнении в ходе дальнейших исследований. Материалы по теплофизическим свойствам донных осадков могут быть использованы для изучения изменений условий осадконакопления, зафиксированных в кернах. Такие исследования целесообразно проводить в комплексе с изучением минералогического состава осадков.

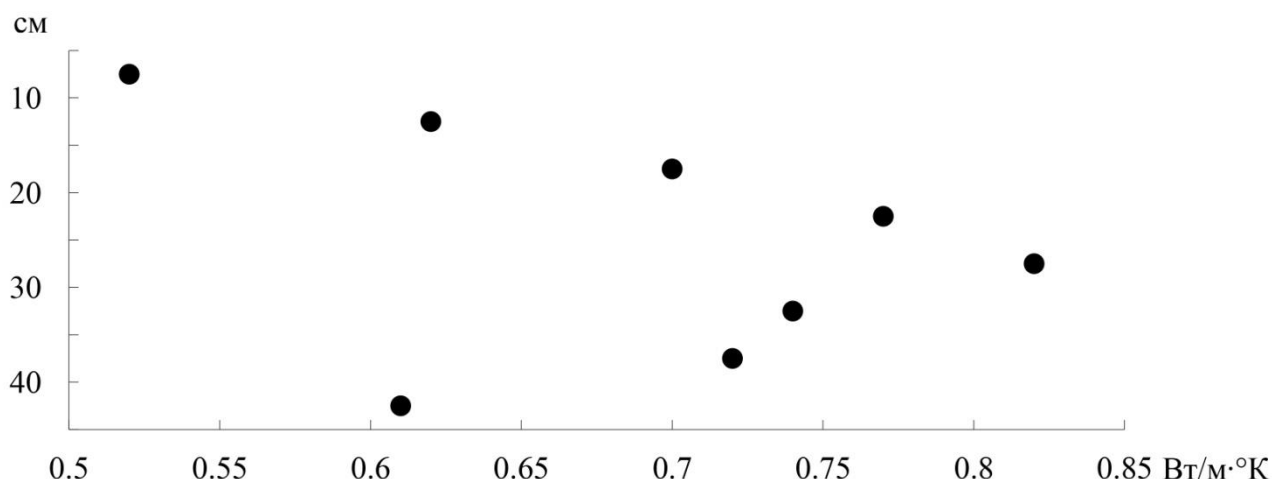


Рис. 7. Распределение теплопроводности в кернах, ст. Липня.

Fig. 7. Distribution of thermal conductivity in the core at Lipnya station.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема АААА-А18-118012690104-3) и приоритетного проекта «Оздоровление Волги».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакастов С.С. Теплофизические характеристики затопленных грунтов // Тр. Ин-та биол. внутр. вод АН СССР. Л.: Наука, 1966. Вып. 13 (16). С. 89–94.
- Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 160 с.
- Буторин Н.В., Курдина Т.Н., Бакастов С.С. Температура воды и грунтов Рыбинского водохранилища. Л.: Наука, 1982. 223 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации (новая серия). Масштаб 1:1000 000. Лист О-37, (38). Нижний Новгород, 2000.
- Законнов В.В. Пространственно-временная неоднородность распределения и накопления донных отложений верхневолжских водохранилищ // Вод. ресурсы. 1995. Т. 22. № 3. С. 362–371.

## REFERENCES

- Bakastov S.S. Teplofizicheskie kharakteristiki zatoplennykh gruntov [Thermophysical properties of submerged grounds] // Tr. In-ta biol. vnutr. vod. L.: Nauka, 1966. Vyp. 13 (16). S. 89–94. [In Russian]
- Butorin N.V., Ziminova N.A., Kurdin V.P. Donnye otlozheniya verkhnevolzhskikh vodokhranilishch [Bottom Sediments in the Upper Volga Reservoirs]. L.: Nauka, 1975. 160 S. [In Russian]
- Butorin N. V., Kurdina T.N., Bakastov S.S. Temperatura vody i gruntov Rybinskogo vodokhranilisha [Temperature in Water and Sediments in the Rybinsk Reservoir]. L.: Nauka, 1982. 223 p. [In Russian]
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii (novaya seriya) [State geological map of Russian Federation (new series)]. Masshtab 1:1000 000. List O-37, (38). [In Russian]
- Zakonnov V.V. Prostranstvenno-vremennaya neodnorodnost raspredeleniya i nakopleniya donnykh otlozheniy verkhnevolzhskikh vodokhranilishch // Vod. Resursy. 1995. T. 22. № 3. S. 362–371. [In Russian]

## THERMAL CONDUCTIVITY OF BOTTOM SEDIMENTS OF THREE UPPER VOLGA RESERVOIRS BY 2016 YEAR GROUND SURVEY

**A. V. Ermakov<sup>1</sup>, V. V. Zakonnov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Geological Institute Russian Academy of Sciences*

*119017 Pyzhevsky lane 7, Moscow, Russia, e-mail: a.v.ermakov@gmail.com*

<sup>2</sup>*Papanin Institute for biology of inland waters Russian Academy of Sciences,*

*Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, 152742 Russia, e-mail: ZAK@ibiw.yaroslavl.ru*

The study of thermal conductivity was performed on the basis of 2016 year ground survey aboard RV “Akademik Topchiev” IBIW RAS. Thermal conductivities of the bottom sediments of three Upper Volga reservoirs (Ivankovskoe, Uglichskoe and Rybinskoe) were measured during and after survey cruise. 107 needle probe thermal conductivities were collected on 36 stations. Thermal properties studies in the area have been re-established after more than 30-year break. Measurements were connected not only to the main sediment types, but to distinct locations to get estimation of spatial variation of thermal conductivity.

*Keywords:* thermal conductivity, bottom sediments, water reservoirs

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ДОННЫХ ОСАДКОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО КАСКАДА

В. В. Законнов<sup>1</sup>, А. В. Законнова<sup>1</sup>, А. И. Цветков<sup>1</sup>, Н. Г. Шерышева<sup>2</sup>

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

152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: [zak@ibiw.yaroslavl.ru](mailto:zak@ibiw.yaroslavl.ru)

<sup>2</sup>Институт экологии Волжского бассейна РАН

445012 г. Тольятти, ул. Комзина, 10

Приведены результаты мониторинга донных отложений водохранилищ Волги и экспериментальные данные по рейсу 2016 г. на экспедиционном судне «Академик Топчиев» по 155 гидрологическим станциям, наглядно демонстрирующим роль гидродинамических процессов в происхождении и формировании грунтового комплекса в системе водохранилищ Волжско-Камского каскада. Показана идентичность гидрологических и седиментационных процессов в водоемах Волжско-Камского бассейна, как в целом по водохранилищам, так и отдельным орографическим районам – озеровидным расширениям и крупным заливам. В работе принят формализованный показатель средней скорости течений, объединяющий воздействие стоковых и ветровых течений на ложе водоемов. Этот подход позволяет дать оценку происходившим экстремальным гидрометеорологическим ситуациям, провести датировку керн, а также решать ряд задач, связанных с функционированием экосистем водохранилищ.

*Ключевые слова:* мониторинг донных осадков, гидродинамические и седиментационные процессы, стоковые, ветровые течения, гранулометрия.

DOI 10.24411/0320-3557-2018-1-0004

### ВВЕДЕНИЕ

Динамика вод – основа гидрологического режима любого водоема, важная составляющая функционирования экосистемы, его биологической продуктивности и качества воды (Эдельштейн, 2014).

Роль стоковых и ветровых течений – основных элементов гидродинамического режима в происхождении и формировании нижнего яруса экосистем водоемов и водотоков весьма существенна (Буторин, 1969; Буторин и др., 1975). На основании комплексных гидроэкологических исследований (уровенный и термический режимы, течения, волнение, физико-химический состав воды и донных осадков) получены количественные зависимости функциональных связей в системе вода – донные отложения. Транспорт наносов – перемещение – размыв, трансседиментация – переотложение, аккумуляция – накопление в реках, озерах, водохранилищах и морях являются составной частью энерго-массообмена в водных экосистемах (Литвинов, 2000, Лиси-

цын, 2001). Теоретические основы водной и ветровой эрозии Земли, эмпирические коэффициенты и экспериментальные значения приведены и описаны в монографии (Звонков, 1962). Помимо научного интереса эти процессы имеют важное практическое значение в связи с размывом берегов и дна, образованием аккумулятивных форм (пляжей, баров, пересыпей, валов, побочней, осередков, подводных банок и гряд), нивелировкой рельефа ложа, спрямлением берегов, отторжением суши части акватории и, наоборот, меандрированием, образованием стариц, занесением и заилением водоемов, каналов, портов и т.д. (Законнов и др., 2017).

Цель работы – на основании результатов мониторинга донных отложений и комплексного экспедиционного рейса 2016 г. оценить роль гидродинамических процессов в формировании наносов водохранилищ Волжско-Камского каскада и их отдельных орографических районов.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе рассматривается по единой схеме и методикам влияние гидродинамических процессов: ветровых и стоковых течений на формирование донных осадков (ДО) в системе крупных равнинных водохранилищ Волжско-Камского каскада, как в многолетнем аспекте, так и по результатам экспериментальной грунтовой съемки, выполненной в августе 2016 г. на экспедиционном судне «Академик Топчиев».

В статье использованы в качестве иллюстрационного материала описания и схемы цир-

куляции вод, опубликованные ранее, которые сыграли и продолжают играть основную роль в пространственно-временной трансформации грунтового комплекса водохранилищ (Буторин, 1969; Литвинов, 2002; Поддубный, Сухова, 2002; Законнов и др., 2010).

Отбор проб проводился с помощью гравитационных грунтовых трубок ГОИН-1 и 1.5 и дночерпателей различной конструкции с поверхностного горизонта 5–10 см. Гранулометрический состав определялся сухим и влажным про-

сеиванием на ситах с помощью электромагнитной установки «Analysette-3» фирмы Alfred Fritsch & CO (Германия), а также планктонными сетками с различным диаметром отверстий с выделением размерных фракций крупного песка >1 мм, среднего и мелкого – 1.0–0.1, алеврита – 0.1–0.01 и пелита <0.01 мм.

Всего в многолетнем аспекте обработано около 15 тыс. станций, а в рейсе 2016 г. более 150, как по продольным (судовой ход), так и по поперечным профилям, согласно методикам, апробированных на водохранилищах Верхней Волги (Буторин и др., 1975). Толщину керна определяли по маркирующему слою в виде дерновины и руслового песка. Согласно этим методикам, ошибки определения ареалов различных типов ДО и интенсивности осадконакопления составили 5–20% (Законнов, 2016).

Скорость стоковых течений определялась по расходам воды через плотины гидроузлов с учетом изменения скоростного режима по длине водохранилища. В полевых условиях исследования проводились на автоматических буйковых станциях (АБС) или с судов, оборудованных лебедками и гидрометрическими приборами (Буторин, 1969; Поддубный, Сухова, 2001). Ветровые

течения и их дрейфы измерялись вертушками, глубинными и поверхностными поплавками, а также по данным наблюдений Гидрометеослужбы, опубликованных в открытой печати. В работе принят простейший формализованный показатель средней скорости, объединяющий воздействие стоковых и ветровых течений на ложе водоемов. Для решения этой задачи использовались данные по Горьковскому водохранилищу, где проводился большой комплекс синхронных и мониторинговых гидрологических съемок (Буторин, 1969; Законнов и др., 2017). В итоге получена четкая зависимость между средним диаметром наносов и скоростью течения на основных створах (180 станций). В дальнейшем, с графика связи были сняты средние скорости течения в водоемах гумидной зоны, включая оз. Белое и системы водохранилищ Волжско-Камского каскада до г. Тольятти (124 станции). Такая же процедура проведена и для нижележащих водохранилищ, расположенных в аридной зоне, вплоть до дельты Волги (31 станция). Результаты обработки статистически в пакете программ STATISTICA, с использованием метода дисперсионного анализа ANOVA и процедуры LSD-теста при уровне значимости  $p \leq 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Преобладающее влияние на циркуляцию вод в речных плесах водохранилищ оказывает объем стока с водосборной площади. Расходы воды в притоках приводят к изменению скоростного и уровня режима водотоков в большом диапазоне величин, что способствует размыву берегов и дна, и выносу взвешенных веществ вниз по течению в устьевые участки рек и далее в акваторию принимающего водоема, где они формируют отложения различного гранулометрического состава.

Не менее сложна система ветровых течений. Они свойственны крупным озерам, а также озеровидным расширениям водохранилищ. На мелководьях вдольбереговые течения создают аккумулятивные формы рельефа – валы, косы и пляжи и нивелируют ложе.

Сочетание однонаправленных стоковых и флюктуирующих ветровых течений приводит к пестроте распределения типов донных отложений (ДО) в водохранилищах. Максимальные скорости течений являются определяющими в формировании типа ДО, а пульсации скоростей приводят к насыщению основного скелета наносов дополнительными размерными фракциями, которые и определяют окончательный тип осадка и его средний диаметр.

Согласно классификации грунтового комплекса равнинных водохранилищ (табл. 1) (За-

коннов, 2014) грунты подразделяются на три группы:

«первичные», реликтовые (остаточные) – сохранившие после затопления свои свойства и качество – скальные, каменистые, галечно-гравийные, песчаные, глины и торф;

трансформированные – затопленные почвы и подстилающие породы – разбухшие (заболоченные), обнаженные (размытые вплоть до иллювиального горизонта) и болотно-луговые в пределах границ НПУ;

вторичные – образовавшиеся в водохранилищах – собственно донные осадки – гетеродисперсные минерально-органические крупнозернистые наносы (пески) и тонкодисперсные отложения (илы).

Каждая из групп делится на две подгруппы – минеральные и органические. Первые содержат менее 30% органического вещества (ОВ), вторые – более 30%. Разделение подгруппы на отдельные типы производится по гранулометрическому составу в зависимости от принадлежности (процентного соотношения) к фракциям песка, алеврита, пелита и содержания ОВ. Основным критерием выделения типа ДО служит 30% доля в преобладании той или иной фракции и концентрация ОВ.



**Таблица 1.** Классификация грунтов равнинных водохранилищ (Законнов, 2007; 2014)

**Table 1.** Classification of soils of lowland reservoirs (Zakonnov, 2007, 2014)

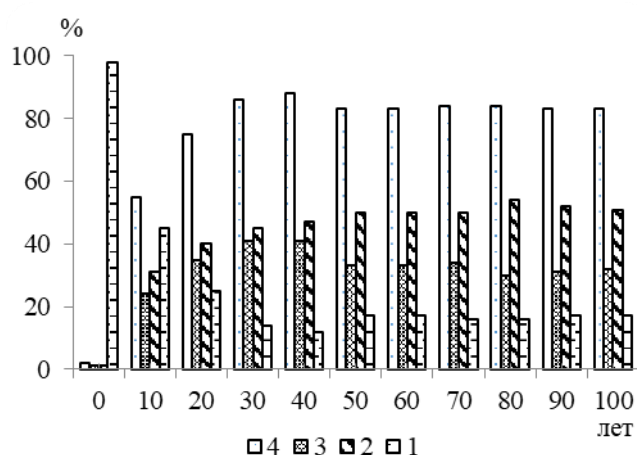
Грунты Soils			Основные физико-химические характеристики Basic physical and chemical characteristics		
Группа Group	Подгруппа Subgroup	Тип Type	Сумма фракций, % Amount of frac- tions,%		Органическое вещество, % Organic matter,%
			>0.1 мм >0.1 mm	<0.01 мм >0.01 mm	
Реликтовые (остаточные) Relict	Минеральные Mineral	Скалы Rocks	—	—	<1
		Валуны Boulders	—	—	<1
		Галька Pebbles	—	—	<1
		Гравий Gravel	—	—	<1
		Пески Sands	>90	<10	<1
		Глины Clays	<10	>90	<1
		Торф Peat	—	—	>70
Трансформированные Transformed	Минеральные Mineral	Обнаженные (размы- тые) почвы и породы Naked (blurred) soil and rock	>30	<30	<3
		Разбухшие почвы и породы Swollen soils and rocks	<30	>30	>10
		Заболачивающиеся почвы Dampening soils	<30	>30	<30
		Болотные почвы Marsh soils	<30	>30	>30
		Пески Sands	100	—	<1
Вторичные Secondary precipita- tion	Минеральные Mineral	Илистые пески Silt sands	>70	<30	1–5
		Песчанистые илы Sandy silts	<70	>30	5–10
		Глинистые илы Clayey silt	<30	>70	10–30
		Отложения из рако- вин Deposits from shells of shellfish	—	—	<1
	Органические Organic	Торфогенный ил Peaty silt	<30	>30	30–40
		Торфянистый ил Peaty ooze	—	>30	40–70
		Отложения из мак- рофитов Deposits from macrophytes	—	—	>30

По результатам 38 гидрологических съемок водохранилищ Волги с 1947 по 2016 гг. выявлена четкая динамика в хронологическом ряду распределения площадей грунтов и ДО, которая отражает следующие закономерности (рис. 1):

сокращение площадей под обнаженными (размытыми) и разбухшими почвами (с 99 до 15–17%);

увеличение площадей, занятых крупнозернистыми наносами – песками (с 0.9 до 55% и более);

увеличение площадей тонкодисперсных отложений (илов) к 30–40 годам эксплуатации водохранилищ (до 40–50%), а затем их сокращение и постепенное выравнивание (в пределах 30–35%).



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

**Fig. 1.** Distribution of areas of various soils and DO in the reservoirs of the Volga. 1 – transformed soils, 2 – coarse-grained deposits, 3 – fine-dispersed deposits, 4 – secondary sediments.

Площади вторичных отложений, находятся в противофазе к трансформированным грунтам. Последние, в результате заболачивания мелководий, постепенно превращаются в болотные почвы, отчуждая часть акватории.

С учетом стабилизации седиментационных процессов в пространстве и во времени были сделаны прогнозы распределения основных ареалов грунтов и ДО к 100-летию существования водохранилищ (Законнов, 2016).

Однако это не означает, что структура грунтового комплекса одинакова во всех водохранилищах. Интенсивность осадконакопления в отдельно взятом водохранилище зависит от многих факторов, которые в итоге приводят к разному соотношению площадей песков ( $F_{\text{пес}}$ ) и илов ( $F_{\text{ил}}$ ), (табл. 2). Это соотношение характеризует

показатель структуры ДО ( $\alpha$ ), сформировавшейся в период относительной стабилизации и выражается формулой:

$$\alpha = F_{\text{пес}} / F_{\text{ил}},$$

что позволило выделить три группы водохранилищ:

соотношение площадей примерно равное ( $\alpha < 1.5$ ) – Ивановское, Куйбышевское, Волгоградское;

площади песков превышают почти в 2 раза ареалы илов ( $\alpha = 1.5 - 2.5$ ) – Угличское, Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское;

площади песчаных наносов превышают более, чем в 3 раза ареалы глинистых илов ( $\alpha > 2.5$ ) – Саратовское.

Деление на группы условное, но, тем не менее, в водохранилищах Волги со сложными гидродинамическими процессами вторичные осадки – secondary precipitation (BO – SP) стремятся к установлению определенных соотношений ареалов. Очевидно, что при существующих гидрометеорологических условиях, геологическом, геоморфологическом строении ложа и берегов, и эксплуатационном режиме эти пропорции соответствуют оптимальной структуре ДО в каждом водохранилище. Итоговая табл. 2 может быть использована в балансовых, седиментологических, гидробиологических и гидрохимических расчетах, т.к. характеризует нижний ярус экосистемы как стабильный на современном этапе.

Средняя толщина слоя песчаных наносов для длительно эксплуатируемых водохранилищ выравнивается по каскаду и составляет 8.3–13.5 см, в Чебоксарском (30 лет) она пока минимальная – 3.2 см. Средняя толщина илистых отложений более неравномерна и постоянно возрастает (Законнов, 2016). Однако темпы осадконакопления по основным типам ДО постепенно увеличиваются от водохранилищ Верхней к Нижней Волге, подтверждая зональность седиментационных потоков от гумидной к аридной зоне в пределах Волжского бассейна (Законнов, Законнова, 2008).

Наиболее сложная картина формирования ДО в реках. Максимальная величина эпюры скорости течения проходит по стрежню, что приводит к образованию на дне песчано-галечно-каменистых наносов. По поперечному разрезу скорости течения уменьшаются к берегам, поэтому тонкодисперсные наносы накапливаются в прибрежье на прямолинейных участках. В излучинах, в вогнутой части происходит подмыв берега, в выпуклой – намыв кос, а ближе к стрежню – образование осередков и гряд, что связано с поперечной циркуляцией воды.

**Таблица 2.** Интенсивность осадконакопления в водохранилищах Волги

**Table 2.** Intensity of sedimentation in the reservoirs of the Volga

Тип осадка Sediment type	Площадь, км <sup>2</sup> Area, km <sup>2</sup>	Средняя толщина, h, см Average thickness, h, cm	Объем, V, млн.м <sup>3</sup> Volume, V, mln.m <sup>3</sup>	Масса, млн. т Mass, million tons	Среднегодовое накопление Average annual accumulation		
					мм mm	тыс. т thousand tons	кг/м <sup>2</sup> kg / m <sup>2</sup>
Иваньковское (2012), α = 1.2 (Ivankovskoe Reservoir(2012), α = 1.2)							
Крупнозернистые Coarse-grained	133.9	8.4	11.2	12.9	1.1	248	1.9
Тонкодисперсные Fine-dispersed	109.6	22.5	24.7	17.9	3.0	160	1.5
Всего БО, Total SP	243.1	14.6	35.9	30.8	1.9	411	1.7
Угличское (2012), α = 2.2(Uglich Reservoir (2012), α = 2.2)							
Крупнозернистые Coarse-grained	138.9	8.6	12.0	17.2	1.2	239	1.7
Тонкодисперсные Fine-dispersed	62.6	28.6	17.9	5.8	4.0	81	1.3
Всего БО, Total SP	201.5	14.8	29.9	23.0	2.1	320	1.6
Рыбинское (2010), α =2.0 (Rybinsk Reservoir(2010), α =2.0)							
Крупнозернистые Coarse-grained	2550	8.3	2120	290.0	1.2	4203	1.6
Тонкодисперсные Fine-dispersed	1274	41.0	5220	155.0	5.9	2250	1.8
Всего БО, Total SP	3824	19.2	7340	445.0	2.8	6453	1.7
Горьковское (2010), α =1.6 (Gorky Reservoir(2010), α =1.6)							
Крупнозернистые Coarse-grained	790	8.5	672	76.0	1.5	1382	1.7
Тонкодисперсные Fine-dispersed	506	25.1	1270	68.0	4.6	1236	2.4
Всего БО, Total SP	1296	15.0	1942	144.0	2.7	2618	2.0
Чебоксарское (2010), α = 1.7 (Cheboksary Reservoir(2010), α = 1.7)							
Крупнозернистые Coarse-grained	630	3.2	20.2	37.0	1.1	1276	2.0
Тонкодисперсные Fine-dispersed	362	8.8	31.9	20.0	3.0	690	1.9
Всего БО, Total SP	992	5.3	52.1	57.0	1.8	1966	2.0
Куйбышевское (2016), α = 1.0 (Kuibyshev Reservoir(2016), α = 1.0)							
Крупнозернистые Coarse-grained	2602	11.1	2890	281.0	1.8	4738	1.8
Тонкодисперсные Fine-dispersed	2480	43.2	10714	590.0	7.1	9672	3.9
Всего БО, Total SP	5082	26.8	13604	871.0	4.4	14410	2.8
Саратовское (2005), α = 3.5 (Saratov Reservoir(2005), α = 3.5)							
Крупнозернистые Coarse-grained	1120	11.5	1290	187.2	2.4	3900	3.5
Тонкодисперсные Fine-dispersed	320	40.8	1310	76.8	8.5	1600	5.0
Всего БО, Total SP	1440	18.1	2600	264.0	3.8	5500	3.8
Волгоградское (2012), α = 1.0 (Volgograd Reservoir(2012), α = 1.0)							
Крупнозернистые Coarse-grained	1500	13.5	2025	254.4	2.5	5300	3.5
Тонкодисперсные Fine-dispersed	1250	44.3	5537	360.0	8.2	7500	6.0
Всего БО, Total SP	2750	27.5	7562	614.4	5.2	12800	4.7

Течения в не зарегулированных участках рек всех порядков, а также в нижних бьефах плотин водохранилищ ведут себя, как типичные речные потоки, размывая ложе и берега и формируя наносы в соответствии с расходами воды и их транспортирующей способностью (Девяткова, 2006, Законнов и др., 2010).

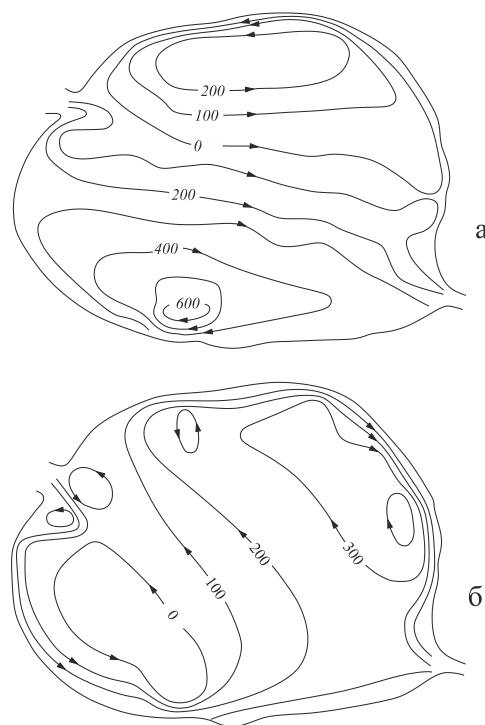
Несколько иная картина наблюдается в верхних бьефах. С учетом максимальных глубин у плотины, большой массы воды и слабых изменений уровня режима, течения могут захватывать только верхнюю часть акватории, не воздействуя на дно. В связи с неравномерной работой ГЭС могут возникать прямые и обратные волны попуска, которые захватывают всю толщу воды, что приводит к размыву ложа и уменьшению темпов седиментации в приплотинных участках.

Регулирование водного стока оказывает существенное влияние на проточность, а через нее на интенсивность эрозионно-абразионных и седиментационных процессов. Степень этого воздействия зависит от режима эксплуатации гидроузлов, который включает естественные (сезонные, годовые) и искусственные (суточные и недельные) сбросы воды в каскаде водохранилищ (Буторин, 1969; Литвинов, 2000; Эдельштейн, 1998, 2014). Многолетние периоды воздействия гидродинамических процессов нивелируют их флуктуирующую тенденцию, выражаемую в среднегодовых темпах осадконакопления, которые в водохранилищах Волги составляют от 1.8 до 5.2 мм/год (табл. 2).

В мелководном проточном оз. Белое ( $F=1284 \text{ км}^2$ ) Шекснинского, озеровидном Главном плесе ( $F=3077 \text{ км}^2$ ) Рыбинского и Волжско-Камском расширении ( $F=1011 \text{ км}^2$ ) Куйбышевского водохранилищ наблюдаются стоковые и ветровые течения, которые взаимодействуя создают циклональные и антициклональные вихри, определяющие перенос водных масс в пределах акватории водоемов. Сейшевые и денивеляционные колебания незначительны и не превышают 0.5 м. При этом может наблюдаться слоистость ветровых и стоковых течений.

Результаты расчетов показали, что в оз. Белое при ветрах западных и восточных румбов прослеживается два устойчивых вихревых образования, локализованных в северной и южной части акватории, а при ветрах южных и северных румбов – в западной и восточной части озера (рис. 2а, б) (Литвинов, 2002).

Такая система течений привела к тому, что на Белозерском участке Шекснинского водохранилища донные отложения в основном представлены глинисто-илистыми осадками, которые занимают всю центральную котловину и



**Рис. 2.** Распределение функций полных потоков воды в поверхностном слое оз. Белое при реальном рельефе дна. а – ветер восточный, 5 м/с, б – ветер северо-западный, 7 м/с.

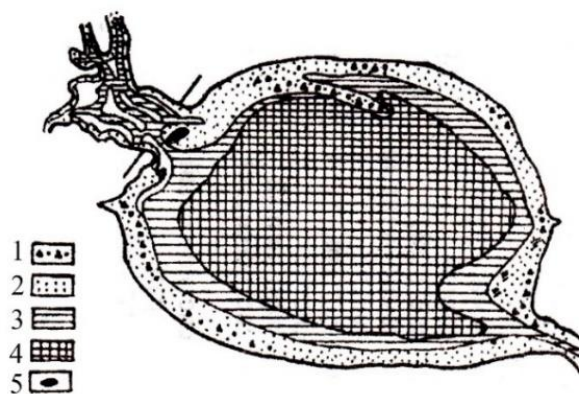
**Fig. 2.** Distribution of functions of total flows in the surface layer of the Lake. White with a real bottom relief. a - east wind, 5 m/s, b - northwesterly wind, 7 m/s.

составляют ~90%, а по периферии – песками ~10%, где преобладают волновые процессы, вдольбереговой перенос крупнозернистых наносов и размыв древних морен последнего оледенения (рис. 3) (Законнов, 2002).

Иная картина наблюдается в крупных озеровидных расширениях Рыбинского и Куйбышевского водохранилищ. В Главном плесе общая циркуляция вод представляет собой систему разнонаправленных круговоротов в большом диапазоне величин: от мезомасштабных – 5–10 км, до крупномасштабных – 10–90 км. Площадь этих вихрей достигает 2 тыс. км<sup>2</sup>, или 65% акватории (рис. 4) (Поддубный, Сухова, 2002).

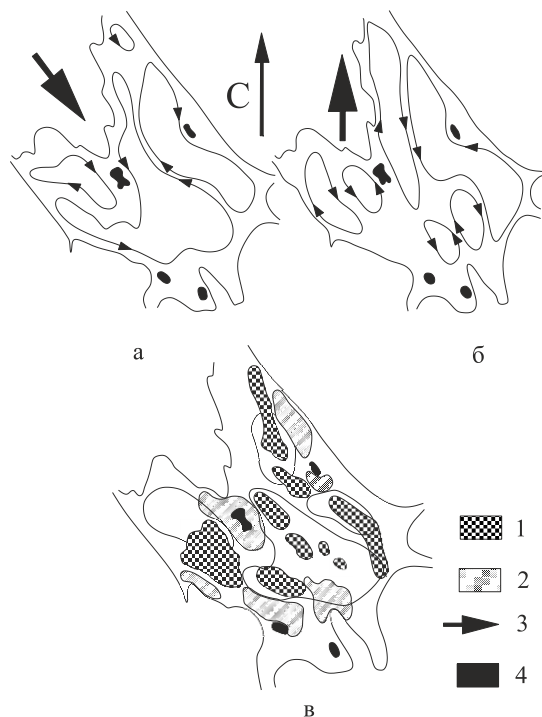
Скорости течений в верхних слоях составляют 3.0–12, а в средних и нижних – 1.0–4.0 см/с. При усилении ветра до 15 м/с, структура циркуляции не меняется, а скорости течения по вертикали увеличиваются в 1.5–2 раза.

Поскольку глубоководные участки Главного плеса – районы интенсивного илонакопления (5.9 мм/год), вертикальная компонента течения может играть достаточно ощутимую роль в перемещении взвесей. Ветровое волнение в Рыбинском водохранилище имеет значительные размеры. В центральной части, а также над затопленными долинами рек Волги, Мологи и Шексны отмечаются максимальные высоты волн (2.5 м).



**Рис. 3.** Карта-схема распределения донных отложений Белого озера (съемка 1995 г.). 1 – камни, галечник, 2 – песок, илистый песок, 3 – песчаный ил, 4 – глинистый ил, 5 – острова.

**Fig. 3.** Map-scheme of distribution of bottom sediments of the White Lake (1995 survey). 1 – stones, pebbles, 2 – pe-sauce, muddy sand, 3 – sandy ooze, 4 – clayey mud, 5 – islands.

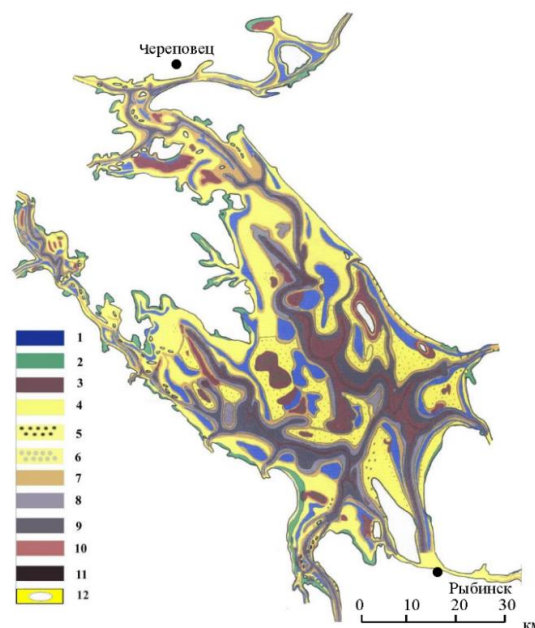


**Рис. 4.** Схемы интегральной циркуляции воды в безледный период в Рыбинском водохранилище. а – при северо-западном ветре 6 м/с, б – при южном ветре 6 м/с, в – при суммарном ветровом воздействии с учетом двух румбов 315 и 180 градусов, 1–2 соответственно зоны минимальных и максимальных скоростей интегрального переноса, 3 – направление ветра, 4 – острова.

**Fig. 4.** Schemes of integral circulation of water in the ice-free period in the Rybinsk Reservoir. a – with a northwesterly wind of 6 m/s, b – with a southerly wind of 6 m/s, c – with a total wind impact, taking into account two knobs of 315 and 180 degrees, 1–2 respectively zones of maximum and minimum short, 3 – wind direction, 4 – islands.

Так, осенью при наибольших сработках уровня при ветрах 5, 10, 15 м/с глубина размывающего действия волн находится в интервале 4–8 м от НПУ. При ветрах более 15 м/с воздействие волн прослеживается до отметки 10 м, ниже которой и аккумулируются илистые (торфогенные) отложения (Курдин, Зимина, 1968).

Зафиксированное ранее продвижение песчаных наносов в глубь водоема имеет место и на современном этапе (Буторин и др., 1975). Их граница четко обозначилась изобатой 6 м. Между изобатами 6–10 м располагаются ДО различного гранулометрического состава – это переходная зона. Площади под торфогенными илами к 2012 г. не изменились (рис.5) (Законнов, 2007).



**Рис. 5.** Карта донных отложений Рыбинского водохранилища (съемка 1992–1994 гг.). 1 – размытые почвы, 2 – заболачивающиеся почвы, 3 – затопленный торф, 4 – пески, 5 – песок с торфяной крошкой, 6 – песок с галькой, 7 – илистый песок, 8 – песчаный ил, 9 – глинистый (серый) ил, 10 – торфянистый ил, 11 – торфогенный ил, 12 – острова.

**Fig. 5.** Map of bottom sediments of the Rybinsk Reservoir (survey 1992–1994). 1 – blurred soil, 2 – swampy soil, 3 – flooded peat, 4 – sand, 5 – sand with peat, 6 – sand with gullet, 7 – muddy sand, 8 – sandy ooze, 9 – clayey (gray) yl, 10 – peaty silt, 11 – peaty silt, 12 – islands.

Волжско-Камский плес в течение всего года заполнен двумя генетически разнородными водными массами – Волжской и Камской и их модификациями с четко выраженной фронтальной зоной между ними, определяемой объемом притока по Волге и Каме (Поддубный, Сухова, 2002). Согласно натурным измерениям, выполненным в 1989–1991 гг. по хозяйственной теме «Оценка влияния добычи ПГС на водную среду и гидрофауну Куйбышевского водохранилища...», установлено, что на мелководных участках преобладает

ветровой перенос вод, характеризующийся однонаправленностью по вертикали.

В затопленных руслах рек прослеживаются стоковые течения. При штормовых ветрах, противоположных направлению стоковых течений, образуются циклональные и антициклональные вихри протяженностью до 10 км.

При сложной схеме наибольших скоростей интегрального переноса при ветрах различных

румбов средняя скорость течений наблюдается по всей толще водного столба (12 м) в пределах 8.0–17.0 см/с, что способствует хорошей промываемости дна. В результате чего структура ложа весьма неоднородна и представляет собой мозаику зон размыва, трансседиментации и накопления (табл. 3).

**Таблица 3.** Распределение и накопление ДО в Волжско-Камском расширении (Камское Устье – Рыбная Слобода) в 2016 г.

**Table 3.** Distribution and accumulation of DO in the Volga-Kama expansion (Kamskoye Ustie – Rybnaya Sloboda) in 2016.

Тип грунта, донных осадков Type of soil, bottom sediments	Площадь, км <sup>2</sup> Area, km <sup>2</sup>	Средняя толщина, см Average thickness, cm	Объем, млн. м <sup>3</sup> Volume, million m <sup>3</sup>	Объемная масса, т/м <sup>3</sup> Volumetric weight, t/m <sup>3</sup>	Масса млн.т Weight mln.t	Среднегодовое накопление Average annual accumulation		
						мм mm	тыс. т thousand tons	кг/м <sup>2</sup> kg/m <sup>2</sup>
Заболачивающиеся почвы Dampening soils	7	–	–	–	–	–	–	–
Валуны Boulders	3	–	–	–	–	–	–	–
Галька Pebbles	5	–	–	–	–	–	–	–
Трансформированные грунты Transformed soils	150	–	–	–	–	–	–	–
Песок Sand	245	6.6	161.7	1.60	25.8	1.1	430	1.8
Илистый песок Thick sand	183	9.6	175.7	0.90	15.8	1.6	263	1.4
Песчанистый ил Sandy ooze	200	21.0	420.0	0.65	27.3	3.5	455	2.3
Глинистый (серый) ил Clay (gray) ooze	200	45.0	900.0	0.50	45.0	7.5	750	3.8
Глинистый (бурый) ил Clayey (brown) silt	15	56.4	84.6	0.90	7.5	9.4	125	8.3
Отложения из макрофитов Deposits from macrophytes	3	66.0	20.0	0.40	0.8	11.0	13	4.3
ВСЕГО TOTAL	1011	17.4	1762	0.69	122.2	2.9	2036	2.0

В крупных заливах (площадью более 100 км<sup>2</sup>), образовавшихся в местах впадения в водоем одной или нескольких рек, стоковые и ветровые течения формируют структурный скелет наносов и обеспечивают темпы их накопления во многом схожие с основным водоемом (табл. 4) (Законнов и др., 2010).

Анализ корреляционной матрицы по материалам экспедиции 2016 года показал, что не все физико-химические показатели объектов исследования взаимосвязаны (табл. 5).

Гидродинамические, морфометрические, размерные фракции наносов имеют высокую степень функциональной связи с типом донных осадков (средним диаметром частиц) и некото-

рыми их свойствами, что свидетельствует о единой природе их формирования. Так, естественная влажность, органическое вещество и средний диаметр четко зависят от типа наносов: крупнозернистые – насыщены влагой на 15–25%, илистые пески – 25–30%, песчанистые илы – 30–50%, глинистые илы – 50–65%, торфянистые илы и отложения из отмерших макрофитов более чем на 65%. Соответственно, в данном ряду увеличивается содержание органического вещества и уменьшается средний диаметр частиц.



**Таблица 4.** Гидроморфометрические и седиментационные показатели крупных заливов

**Table 4.** Hydromorphometric and sedimentation indices of large bays

Залив Bay	Площадь, км <sup>2</sup> Area, km <sup>2</sup>	Длина, км Length, km	Глубина средняя, м Depth average, m	Глубина макс, м Depth of the max, m	Ширина макс. м Width of max. m	Объем, км <sup>3</sup> Vol- ume, km <sup>3</sup>	Кв Coeffi- cient of water exchange	Скорость седиментации, мм/год Speed sedimentation, mm / year
Иваньковское Ivan'kovskoye								
Шошинский Shoshinskiy	122	35	1.7	10	5	0.2	1.0	2.1 (1.9)
Рыбинское Rybinskoye								
Моложский Molozhskiy	144	20	3.2	12	13	0.5	12.6	2.6 (2.8)
Ухро- Согожский Ukhro- Sogozhskiy	114	18	4.0	15	18	0.5	7.4	3.1 (2.8)
Волковский Volkovskiy	148	21	5.5	30	14	0.8	41.6	2.8 (2.8)
Горьковское Gor'kovskoye								
Костромской Kostromskoy	286	30	1.2	9	8	0.3	7.1	2.5 (2.7)
Куйбышевское Kuzybyshevskoye								
Черемшано- Сусканский Cheremshan- Suskanskiy	678	50	9.5	22	14	6.4	5.2	3.0 (4.5)

**Примечание.** В скобках темпы седиментации в водохранилище.

**Note.** In brackets, the rate of sedimentation in the reservoir.

**Таблица 5.** Корреляция натуральных гидрологических характеристик и наносов Волжско-Камских водохранилищ.

**Table 5.** Correlation of natural hydrological characteristics and deposits of the Volga-Kama water reservoirs.

Переменные Variables	H	T	V	Омв	Омс	ЕВ	ППП	>1	1-0.1	0.1– 0.01	<0.01	d
H	1.00	<b>0.25</b>	<b>-0.16</b>	<b>-0.23</b>	<b>-0.24</b>	<b>0.27</b>	<b>0.26</b>	-0.08	<b>-0.16</b>	0.04	<b>0.38</b>	-0.14
T	<b>0.25</b>	1.00	<b>0.23</b>	<b>0.28</b>	<b>0.29</b>	<b>-0.31</b>	-0.15	0.13	<b>0.29</b>	<b>-0.36</b>	-0.04	<b>0.23</b>
V	<b>-0.16</b>	<b>0.23</b>	1.00	<b>0.82</b>	<b>0.81</b>	<b>-0.77</b>	<b>-0.61</b>	<b>0.55</b>	<b>0.84</b>	<b>-0.85</b>	<b>-0.63</b>	<b>0.98</b>
Омв	<b>-0.23</b>	<b>0.28</b>	<b>0.82</b>	1.00	<b>0.99</b>	<b>-0.98</b>	<b>-0.78</b>	<b>0.36</b>	<b>0.83</b>	<b>-0.78</b>	<b>-0.65</b>	<b>0.83</b>
Омс	<b>-0.24</b>	<b>0.29</b>	<b>0.81</b>	<b>0.99</b>	1.00	<b>-0.99</b>	<b>-0.78</b>	<b>0.35</b>	<b>0.83</b>	<b>-0.79</b>	<b>-0.66</b>	<b>0.83</b>
ЕВ	<b>0.27</b>	<b>-0.31</b>	<b>-0.77</b>	<b>-0.98</b>	<b>-0.99</b>	1.00	<b>0.81</b>	<b>-0.30</b>	<b>-0.83</b>	<b>0.77</b>	<b>0.65</b>	<b>-0.80</b>
ППП	<b>0.26</b>	-0.15	<b>-0.61</b>	<b>-0.78</b>	<b>-0.78</b>	<b>0.81</b>	1.00	<b>-0.22</b>	<b>-0.67</b>	<b>0.59</b>	<b>0.57</b>	<b>-0.65</b>
>1	-0.08	0.13	<b>0.55</b>	<b>0.36</b>	<b>0.35</b>	<b>-0.30</b>	<b>-0.22</b>	1.00	0.12	<b>-0.31</b>	<b>-0.23</b>	<b>0.50</b>
1-0.1	<b>-0.16</b>	<b>0.29</b>	<b>0.84</b>	<b>0.83</b>	<b>0.83</b>	<b>-0.83</b>	<b>-0.67</b>	0.12	1.00	<b>-0.92</b>	<b>-0.66</b>	<b>0.89</b>
0.1-0.01	0.04	<b>-0.36</b>	<b>-0.85</b>	<b>-0.78</b>	<b>-0.79</b>	<b>0.77</b>	<b>0.59</b>	<b>-0.31</b>	<b>-0.92</b>	1.00	<b>0.38</b>	<b>-0.90</b>
<0.01	<b>0.38</b>	-0.04	<b>-0.63</b>	<b>-0.65</b>	<b>-0.66</b>	<b>0.65</b>	<b>0.57</b>	<b>-0.23</b>	<b>-0.66</b>	<b>0.38</b>	1.00	<b>-0.64</b>
d	-0.14	<b>0.23</b>	<b>0.98</b>	<b>0.83</b>	<b>0.83</b>	<b>-0.80</b>	<b>-0.65</b>	<b>0.50</b>	<b>0.89</b>	<b>-0.90</b>	<b>-0.64</b>	1.00

**Примечание.** H – глубина, м; T – температура грунта, °C; V – средняя скорость течения, м/с; Омв – объемная масса влажная, г/см<sup>3</sup>; Омс – объемная масса сухая, г/см<sup>3</sup>; ЕВ – естественная влажность, %; PPP – органическое вещество, %; >1–<0.01 – размерные фракции, d – средний диаметр частиц, мм. Жирным шрифтом отмечены значимые коэффициенты корреляции.

**Note.** H is the depth, m; T is the temperature of the soil, °C; V is the average flow velocity, m/s; Омв – volumetric mass wet, g/cm<sup>3</sup>; Омс – bulk density dry, g/cm<sup>3</sup>; ЕВ – natural humidity, %; PPP organic matter, %; > 1–<0.01 – size fractions, %; d is the average particle diameter, mm. Significant correlation coefficients are indicated in boldface.

Распределение наносов в естественных и техногенных водоемах определяется циркумизобатной структурой рельефа дна, изрезанностью берегов и их ориентацией в пространстве. Связь с глубиной прослеживается слабо, что объясняется непостоянством уровневого режима, свя-

занного с водностью года, режимом эксплуатации, интенсивностью гидродинамических процессов.

Таким образом, приведенные примеры показывают, что разнообразие стоковых и ветровых течений в различных частях водоемов, при-

водит к пестроте распределения в них типов ДО, которые различаются степенью воздействия гидродинамических сил на формирование наносов, через размыв, транзит, переотложение – трансседиментацию и аккумуляцию (накопление). При этом, натурные данные рейса 2016 г. по водохранилищам Волжско-Камского каскада, четко подтверждают наличие тесной корреляционной связи среднего диаметра частиц со средней скоростью течения в водоемах различных климатических зон, полученной нами для поверхностных вод Евразии в виде степенной функции с коэффициентом ( $R^2 = 0.92$ ) и ошибкой, не превышающей 10%:

$$V = 2.16 \times d^{1.07} (R^2 = 0.92, n = 222) \text{ (Законнов, 2017)}.$$

Анализ накопленных результатов по донным отложениям водохранилищ Волги показал, что скорости течения в интервале значений от 0.01 до 0.1 м/с формируют тонкодисперсные глинисто-илистые отложения со средним диаметром частиц 0.01–0.05 мм;  $V = 0.1\text{--}0.2$  м/с – переходный тип – илистый песок,  $d = 0.05\text{--}0.2$  мм;  $V = 0.2\text{--}1.0$  м/с – крупнозернистые наносы (мелкий и средний песок),  $d = 0.2\text{--}0.5$  мм;  $V \Rightarrow 1.0$  м/с – крупный песок,  $d = 0.5\text{--}1.0$  мм (табл.6).

В природе редко встречаются одноразмерные фракции, чаще всего это процентное соотношение частиц различного гранулометрического состава. Поэтому осредненные значения скоростей течения и среднего диаметра частиц

наносов, наиболее соответствуют природным условиям и характеризуют тип донного осадка. В ядрах часто встречаются слои не типичные для данного осадка, поэтому вышеупомянутые прослойки могут быть реперами по датировке экстремальных гидрометеорологических событий. Такой метод позволяет сделать ретроспективную оценку происходивших природных явлений и катаклизмов палеоклимата.

**Таблица 6.** Шкала формирования донных осадков различного диаметра (d) в зависимости от проточности (V) в водохранилищах Волжско-Камского каскада.

**Table 6.** Scale formation of bottom sediments of various diameters (d) as a function of flow (V) in reservoirs of the Volga-Kama cascade.

Тип донных осадков Type of bottom sediments	d, мм d, mm	V, м/с V, m/s
Крупный песок Coarse sand	0.5–1.0	>1.0
Средний песок Medium sand	0.3–0.5	0.5–1.0
Мелкий песок Fine sand	0.2–0.3	0.2–0.5
Илистый песок Thick sand	0.05–0.2	0.1–0.2
Песчанистый ил Sandy ooze	0.02–0.05	0.05–0.1
Глинистый ил Clayey silt	0.01–0.02	0.01–0.05

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на природные различия гумидной и аридной зон Европейской территории России, гидродинамические процессы – стоковые и ветровые течения создают только им свойственные типы донных осадков (наносов).

Скорости течения выше средних формируют основной гранулометрический скелет осадков, а меньше средних – насыщают его структуру тонкодисперсными частичками. При максимальных скоростях происходит размыв дна и берегов, и сортировка осадков по крупности, а при слабых градиентах скоростного режима – создаются условия для накопления тонкодисперсных фракций с повышенными сорбционными свойствами.

Естественным процессом в трансформации взвешенных веществ, поступающих из различных источников, является их интегральное перемешивание и аккумуляция на дне водотоков и

водоемов в виде донных осадков (Законнов, 2007). В зависимости от проявления гидродинамической активности они безвозвратно захораниваются или многократно участвуют во внутриводоемных процессах трансседиментации и взаимодействия с водой и гидробионтами. При этом донные отложения теряют первоначальные свойства в результате растворения, сорбции, десорбции, микробиальной деструкции и т.д. Процесс седиментации – осаждение взвешенных минерально-органических частиц (80–90%), химическое выпадение солей, биогенных и ряда других элементов, в том числе и поллютантов, а также самоочищение воды с учетом биотических факторов (10–20%) – представляют собой не только проявление физико-химических законов, а сложный энерго-массообмен в системе вода – донные осадки – биота (Остроумов, 2005).

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема АААА-А18-118012690104-3) и приоритетного проекта «Оздоровление Волги».



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 322 с.
- Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 160 с.
- Девяткова Т.П. Оценка транспортирующей способности потока в нижнем бьефе Воткинской ГЭС // Инновационный потенциал естественных наук. Экология и рациональное природопользование. Управление инновационной деятельностью. Тр. Международной научной конференции. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2006. Т. II. С. 204–208.
- Законнов В.В. Генетическая классификация грунтового комплекса равнинных водохранилищ // Комплексные исследования водохранилищ. Межвуз. сб. науч. тр. Перм. гос. ун-та. Пермь, 2014. С. 23–30.
- Законнов В.В. Донные отложения // Современное состояние экосистемы Шекснинского водохранилища. Ярославль: Изд-во ЯРГУ, 2002. С. 45–51.
- Законнов В.В. Илонакопление в системе водохранилищ Волжского каскада // Гидролого-гидрохимические исследования водоемов бассейна Волги. Тр. ИБВВ РАН. Вып. 75 (78). Ярославль: Филигрань, 2016. С. 30–40.
- Законнов В.В. Осадкообразование в водохранилищах Волжского каскада. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: ИГРАН, 2007. 39 с.
- Законнов В.В. Поддубный С.А., Законнова А.В., Касьянова В.В. Осадкообразование в зонах переменного подпора водохранилищ Волжского каскада // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 4. С. 425.
- Законнов В.В. Течения и их роль в формировании наносов // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Гидро- и геодинамические процессы. Управление водными ресурсами Т. 1. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2017. С. 65–68.
- Законнов В.В., Законнова А.В. Географическая зональность осадкообразования в системе волжских водохранилищ // Изв. РАН. Сер. геогр. 2008. № 2. С. 105–111.
- Законнов В.В., Костров А.В., Законнова А.В. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 4. Роль берегозащиты в формировании донных отложений Горьковского водохранилища // Водное хозяйство России. № 4. 2017. С. 60–74.
- Звонков В.В. Водная и ветровая эрозия земли. М: Изд-во АН СССР, 1962. 175 с.
- Курдин В.П., Зиминова Н.А. Об изменениях в грунтовом комплексе Рыбинского водохранилища // Биология внутренних вод: Информ. бюлл. 1968. № 2. С. 38–40.
- Лисицын А.П. Потоки вещества и энергии во внешних и внутренних сферах Земли // Глобальные изменения природной среды – 2001. Новосибирск: СО РАН, филиал “Гео”, 2001. С. 163–248.
- Литвинов А.С. Гидродинамические процессы в водохранилище. Гидрологические особенности Шекснинского водохранилища // Современное состояние экосистемы Шекснинского водохранилища. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2002. С. 23–27.
- Литвинов А.С. Энерго- и массообмен в водохранилищах Волжского каскада. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2000. 83 с.
- Остроумов С.А. О самоочищении водных экосистем // Антропогенное влияние на водные экосистемы. М.: МГУ, 2005. С. 94–119.
- Поддубный С.А., Сухова Э.В. Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах. Руководство для пользователей. Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2002. 120 с.
- Эдельштейн К.К. Водохранилища России: Экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 227 с.
- Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ. Учебник для вузов. – М.: Перо, 2014. 399 с.

## REFERENCES

- Butorin N.V. 1969. Gidrologicheskie protsessy i dinamika vodnykh mass v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada [Hydrological Processes and Dynamics of Water Masses in the Volga Cascade Reservoirs]. L.: Nauka. 322 s. [In Russian].
- Butorin N.V., Ziminova N.A., Kurdin V.P. 1975. Donnye otlozheniia verkhnevolzhskikh vodokhranilishch [Bottom Sediments in the Upper Volga Reservoirs]. L.: Nauka. 160 s. [In Russian].
- Deviatkova T.P. 2006. Otsenka transportirujushchei sposobnosti potoka v nizhnem b'efe Votkinskoi GES [Estimation of the transporting Capacity of the Stream in the lower tail of the Votkinskaya HPP] // Innovatsionnyi potentsial estestvennykh nauk. Ekologiya i ratsional'noe prirodopol'zovanie. Upravlenie innovatsionnoi deyatel'nost'u. Tr. Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. Perm. gos. un-t. Perm'. T. II. S. 204–208. [In Russian].
- Edel'shtein K.K. 1998. Vodokhranilishcha Rossii: Ekologicheskie problemy, puti ich resheniia [Reservoirs of Russia: Ecological problems and Ways of their Decision]. M.: GEOS. 227 s. [In Russian].
- Edelstein K.K. Gidrologiya ozer i vodokhranilishch. Uchebnik dlya vuzov. [Hydrology of lakes and reservoirs. Textbook for high schools]. Moscow: Pero, 2014. 399 p. [In Russian].
- Kurdin V.P., Ziminova N.A. 1968. Ob izmeneniiach v gruntovom komplekse Rybinskogo vodokhranilishcha / [About Changes in the ground Complex of the Rybinsk Reservoir] / Biologiya vnutrennich vod: Inform. biull. № 2. S. 38–40. [In Russian].

- Lisitsyn A.P. 2001. Potoki veshchestva i energii vo vneshnirh i vnutrennikh sferakh zemli [Flows of Matter and Energy in the outer and inner Spheres of the Earth] // Global'nye izmeneniia prirodnoi sredy – 2001. Novosibirsk: SO RAN, filial "Geo". S. 163–248. [In Russian].
- Litvinov A.S. 2000. Energo-i massoobmen v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada [Energy and Mass Exchange in the Volga Cascade Reservoirs. Yaroslavl: YaGTU. 83 p. [In Russian].
- Litvinov A.S. 2002. Gidrodinamicheskie protsessy v vodokhranilishche. Gidrologicheskie osobennosti Sheksninskogo vodokhranilishcha [Hydrodynamic Processes in the Reservoir. Hydrological Features of the Sheksna Reservoir] // Sovremennoe sostoianie ekosistemy Sheksninskogo vodokhranilishcha. Iaroslavl': Izd-vo IaRGU. S. 23–27. [In Russian].
- Ostroumov S.A. 2005. O samoochishchenii vodnykh ekosistem [On the self-purification of aquatic ecosystems] // Antropogennoe vliianie na vodnye ekosistemy. M.: MGU. C. 94–119. [In Russian].
- Poddubnyi S.A., Sukhova E.V. 2002. Modelirovanie vliianiia gidrodinamicheskikh i antropogennykh faktorov na raspredelenie gidrobiontov v vodokhranilishchakh. Rukovodstvo dlia pol'sovatelei [Modeling the Influence of hydrodynamic and anthropogenic Factors on the Distribution of aquatic Organisms in the Reservoirs]. Rybinsk: Pybinskij dom pečati. 120 s. [In Russian].
- Zakonov V.V. 2002. Donnye otlozheniia [Bottom Sediments] // Sovremennoe sostoianie ekosistemy Sheksninskogo vodokhranilishcha. Yaroslavl': Izd-vo IaRGU. S. 45–51. [In Russian].
- Zakonov V.V. 2007. Osadkoobrazovanie v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada. Avtoref. dis. ... dokt.geogr. nauk [Sediment Formation in Reservoirs of the Volga Cascade. Extended Abstract of Dr. Sci. (Geogr.) Dissertation]. M.: Inst. geogr. RAS. 39 p. [In Russian].
- Zakonov V.V. 2014. Geneticheskaia klassifikatsiia gruntovogo kompleksa ravninnykh vodokhranilishch [Genetic classification of the ground Complex of lowland Reservoirs] // Kompleksnye issledovaniia vodokhranilishch. Mezhvuz. sb. nauch. tr. Perm. gos. un-ta. Perm'. S. 23–30. [In Russian].
- Zakonov V.V. 2016. Ilonakoplenie v sisteme vodokhranilishch Volzhskogo kaskada [Silt Accumulation in the System of the Volga Cascade Reservoirs] // Gidrologo-gidrokhimicheskie issledovaniia vodoemov basseina Volgi. Tr. IBVV RAN. Vyp. 75 (78). Yaroslavl': Filigran'. S. 30–40. [In Russian].
- Zakonov V.V. 2017. Tечения i ich rol' v formirovanii nanosov [Currents and their Role Informations of Sedimentes] // Sovremennye problemy vodokhranilishch i ich vodosborov. Gidro- i geodinamicheskie protsessy. Upravlenie vodnymi resursami. T. 1. Perm. gos. un-t. Perm'. S. 65–68. [In Russian].
- Zakonov V.V., Kostrov A.V., Zakonova A.V. 2017. Prostranstvenno-vremennaia transformatsiia gruntovogo kompleksa vodokhranilishcha Volgi. Soobshchenie 4. Rol' beregozashchity v formirovanii donnykh otlozhenii Gor'kovskogo vodokhranilishcha [Spatial and Temporal Transformation of the Ground Complex in the Volga Reservoirs. Communication 4. The role of bank protection in formation of sediments in the Gorky Reservoir] // Vodnoe khoziaistvo Rossii. № 4. S. 60–74. [In Russian].
- Zakonov V.V., Poddubnyi S.A., Zakonova A.V., Kas'yanova V.V. 2010. Sedimentation in variable-backwater Zones of Volga cains Reservoirs // Water Resources. V. 37, No. 4. P. 462–470. DOI: [10.1134/S0097807810040056](https://doi.org/10.1134/S0097807810040056)
- Zakonov V.V., Zakonova A.V. 2008. Geograficheskaia zonalnost' osadkoobrazovaniia v sisteme volzhskikh vodokhranilishch [Geographical Zonality of Sediment Formation in the System of the Volga Reservoirs]. Izv. RAN. Ser. geogr. № 2. S. 105–111. [In Russian].
- Zvonkov V.V. 1962. Vodnaia i vetrovaia eroziia zemli [Water and wind Erosion of the Earth]. M: Izd-vo AN SSSR. 175 s. [In Russian].

## HYDRODYNAMIC PROCESSES AND THEIR ROLE IN FORMATION OF BOTTOM SEDIMENTS IN RESERVOIRS OF THE VOLGA - KAMA CASCADE

V. V. Zakonov<sup>1</sup>, A. V. Zakonova<sup>1</sup>, A. I. Tsvetkov<sup>1</sup>, N. G. Sherysheva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, 152742 Russia, e-mail: [zak@ibiw.yaroslavl.ru](mailto:zak@ibiw.yaroslavl.ru)*

<sup>2</sup>*Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS  
445012 Togliatti, ul. Komzina, 10*

The results of monitoring of bottom sediments in the Volga River reservoirs and experimental data obtained during the expedition onboard the RV *Academician Topchiev* along 155 hydrobiological stations are presented. The data demonstrate the role of hydrochemical processes in origin and formation of the sediment complex in the Volga-Kama cascade of reservoirs. The identity of hydrological and sedimentation processes in reservoirs, in whole, and in some orographical areas such as lake-like expansions and large bays is shown. A formalized parameter of the average current velocity based on easily calculated average diameter of sediment particles is accepted in the work. This approach makes it possible to assess extremal hydrometeorological situations, date the core, and solve some problems concerning functioning of reservoir ecosystems.

**Keywords:** monitoring of bottom sediments, hydrodynamic and sedimentary processes, runoff, wind currents, granulometry

## КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛГИ И КАМЫ В ПЕРИОД ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА: ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ЗООПЛАНКТОНА И ЗООБЕНТОСА

В. И. Лазарева, И. Э. Степанова, А. И. Цветков, Е. Г. Пряничникова, С. Н. Перова

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

*152742 пос. Борок Некоузского р-на, Ярославской обл., e-mail: [lazareva\\_v57@mail.ru](mailto:lazareva_v57@mail.ru)*

Летом 2015–2016 гг. исследованы термическая структура и кислородный режим 11-ти водохранилищ Волго-Камского каскада. Проанализированы изменения состава и структуры зоопланктона и зообентоса в условиях дефицита растворенного кислорода. Установлено, что прогрев поверхности воды чаще всего превышал норму на 1.5–6°C, во всех водохранилищах особенно сильно вода прогревалась летом 2016 г. Кислородный режим в июне был благоприятным для гидробионтов по всей Волге, в августе – на Средней и Нижней Волге, а также в Каме ниже плотины Воткинской ГЭС. Опасно низкое для животных содержание  $O_2$  (<5 мг/л) у дна зарегистрировано в двух водохранилищах (Иваньковское и Угличское) в августе 2015 г. и в пяти (Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Камское и Воткинское) в августе 2016 г. Слой с  $O_2$  от <1 до 5 мг/л локально занимал 10–60% столба воды, встречаемость дефицита кислорода варьировала от 30% станций в Рыбинском до 90% в Иваньковском и Угличском водохранилищах. При прогреве вод до 23–25°C формировались анаэробные условия в гипolimнии самых глубоких участков водохранилищ вблизи плотин ГЭС, в верховье некоторых из них (Иваньковское и Угличское) низкое содержание  $O_2$  наблюдалось во всем столбе воды, протяженные участки от 35 до >200 км русла Волги и Камы были заморными. Гибель беспозвоночных и рыбы в Камских водохранилищах регистрировали визуально во время экспедиционных работ. Многолетние (с 2011 г.) наблюдения на водоемах Верхней Волги указывают на увеличение частоты встреч летнего (июль–август) придонного дефицита кислорода, периода его проявления и мощности слоя над дном с недостатком кислорода. Выявлено, что формированию дефицита кислорода способствует повышенный прогрев (>20°C) глубоких слоев воды. В условиях недостатка кислорода снижается видовое богатство и обилие донных и планктонных ракообразных (Cladocera, Calanoida, Amphipoda), нарушается процесс размножения и уменьшается численность двусторчатых моллюсков сем. Dreissenidae, изменяется вертикальное распределение зоопланктона, уменьшается доля фильтраторов в планктоне и бентосе. Фильтраторы зоопланктона исчезают из состава доминантов при мощности слоя с  $O_2$  <5 мг/л более 50% столба воды, при содержании  $O_2$  <4 мг/л во всем столбе воды ракообразные фактически отсутствуют, в планктоне доминируют коловратки. Обсуждается токсическое действие аммиака и сероводорода как дополнительные факторы, усугубляющие состояние гидробионтов в условиях высокой температуры воды и недостатка растворенного кислорода.

*Ключевые слова:* потепление климата, Волга, Кама, водохранилища, температура воды, дефицит растворенного кислорода, зоопланктон, зообентос, вертикальное распределение, структура, обилие

DOI 10.24411/0320-3557-2018-1-0005

### ВВЕДЕНИЕ

В каскаде Волги восемь водохранилищ (Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское, Куйбышевское, Саратовское и Волгоградское), с ними связаны еще четыре на крупных притоках. Шекснинское водохранилище на р. Шексна, сток из которого поступает в Шекснинский плес Рыбинского водохранилища, и три (Камское, Воткинское и Нижнекамское) на р. Кама, сток из них поступает в Камский плес Куйбышевского водохранилища (рис. 1). Исторически сложилось подразделение бассейна и каскада на Верхнюю Волгу, нижней границей которой служит плотина Рыбинской ГЭС, Среднюю Волгу с южной границей по Жигулевской ГЭС и Нижнюю Волгу, включающую два водохранилища (Саратовское и Волгоградское) и участок незарегулированной Волги ниже Волжской ГЭС

[Волга и ее жизнь, 1978; Эдельштейн, 1998 (The River Volga..., 1979; Edelstein, 1998)].

Кислородный режим водохранилищ изучали в 1950–1970-х годах методом Винклера, обобщение результатов этих работ приведено в монографии [Волга и ее жизнь, 1978 (The River Volga..., 1979)]. Для Рыбинского водохранилища установлено, что летом насыщение воды кислородом ( $O_2$ ) составляет в среднем 87%, зимой 73%, локально в речных плесах 10–40% [Аничкова, 1959; Рыбинское водохранилище..., 1972 (Anichkova, 1959; The Rybinsk Reservoir..., 1972)]. В целом, по руслу Волги летний дефицит  $O_2$  у дна (<40% насыщения) отмечали в Иваньковском водохранилище и локально в Куйбышевском в период массового развития водорослей [Волга и ее жизнь, 1978 (The River Volga..., 1979)]. Сделано заключение, что минимальное содержание  $O_2$  в водо-

хранилищах Волги наблюдается зимой подо льдом, чаще всего в маловодные годы. Летом кислородный режим не представляет угрозы для гидробионтов. В общем, создание Волго-Камского каскада водохранилищ привело к существенному улучшению кислородного режима обеих рек, особенно в среднем и нижнем течении.

По материалам зимнего мониторинга Гидрометслужбы (1984–1985 гг.) и летних наблюдений Института биологии внутренних вод РАН впервые проанализировано распределение  $O_2$  у поверхности воды и дна по всей акватории Рыбинского водохранилища [Экологические проблемы..., 2001 (Ecological problems..., 2001)]. Оказалось, что зимой наименее обеспечены  $O_2$  воды Моложского плеса водохранилища, даже у поверхности его среднее содержание крайне низко (4.4 мг/л или 30% насыщения), на отдельных участках отмечены заморы (1.8–2.3 мг/л или <20% насыщения во всем столбе воды). В других плесах водохранилища насыщение  $O_2$  придонной воды подо льдом составило >55%. Летом локально наблюдался дефицит  $O_2$  у дна в Волжском (<40% насыщения), Шекснинском и Главном (<45%) плесах водохранилища. В июле теплого 1989 г. по данным масштабной съемки (76 станций) выявлено, что содержание  $O_2$  в поверхностном и придонном слоях воды Рыбинского водохранилища различаются незначительно (в среднем на 1.2 мг/л), лишь вдоль русла Волги и Шексны эта разница достигает >4 мг/л [Корнева, 1993 (Korneva, 1993)]. В целом, в 1980-х годах летний кислородный режим был благоприятным для гидробионтов.

В последующем до 2011 г. летом содержание  $O_2$  и его распределение в толще воды водохранилищ Волги измеряли редко. Так, в 1990-х годах на Ивановском водохранилище изучали скорость потребления  $O_2$  в донных отложениях и воде [Бреховских и др., 2006; Кременецкая, 2007 (Brekhovskih et al., 2006; Kremenetskaya, 2007)]. В июне–августе 2009 г.

Институтом водных проблем РАН проведены исследования гидрохимического режима Волги от с. Городня (Иваньковское водохранилище) до г. Астрахань (Нижняя Волга), содержание растворенного  $O_2$  измеряли только в поверхностном слое воды – зарегистрировано высокое (>70%) насыщение  $O_2$  вод Волги, локально даже перенасыщение (до 170%) [Дебольский и др., 2010 (Debol'skij et al., 2010)].

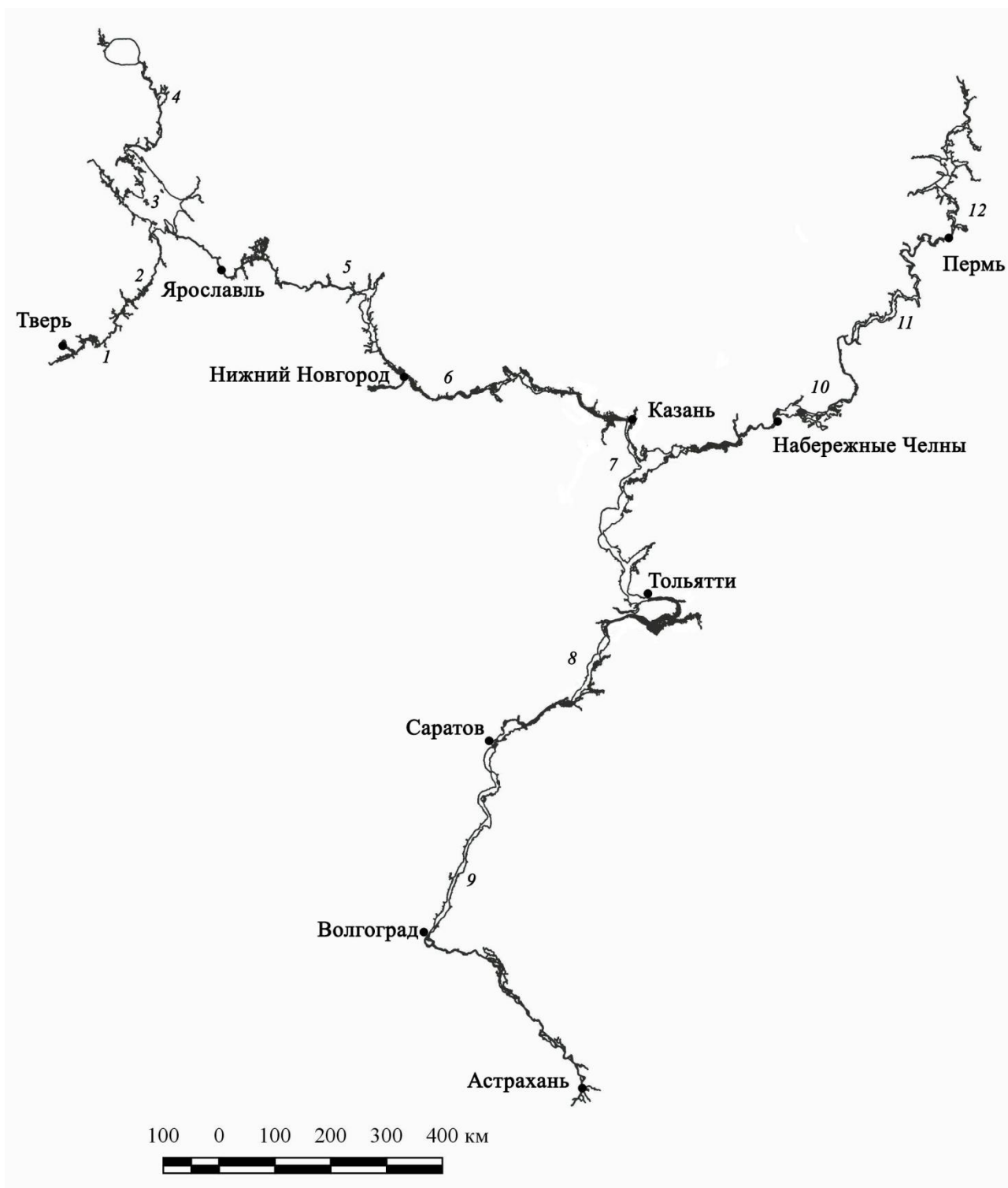
С 1960-х годов в северном полушарии отмечают повышение температуры (Т) воздуха и воды водоемов. В европейской России последние 30 лет темп увеличения Т воздуха составляет 0.49–0.53°C/10 лет, воды в Рыбинском водохранилище в среднем – 0.76°C/10 лет, максимально в июле – 1°C/10 лет [Законнова, Литвинов, 2016 (Zakonnova, Litvinov, 2016)]. В водных экосистемах одно из следствий потепления климата – значительное усиление термической стратификации, снижение прозрачности и содержания  $O_2$  в гипolimнионе [Лазарева, 2014 (Lazareva, 2014); Adrian et al., 2009]. Летом периодически (чаще ночью) дефицит  $O_2$  у дна регистрируют даже в мелководных эвтрофированных озерах, вызванный им вынос фосфатов из грунтов увеличивает внутреннюю биогенную нагрузку, стимулируют развитие водорослей и эвтрофирование [Wilhelm, Adrian, 2008; Adrian et al., 2009]. Дефицит кислорода – один из главных факторов, лимитирующих состав и структуру водных сообществ гетеротрофов. Ситуацию усугубляет выделение из грунтов в анаэробных и микроанаэробных условиях ядовитых для животных соединений ( $NH_3$ ,  $H_2S$ ) [Дзюбан, 2006 (Dzyuban, 2006)].

Цель работы – исследование вертикального и горизонтального распределения содержания  $O_2$  в водохранилищах Волги, сезонной динамики его концентрации на станциях регулярного мониторинга в Рыбинском водохранилище, выявление заморных зон и сроков их формирования, а также откликов донных и планктонных сообществ на дефицит кислорода.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье проанализированы данные комплексных работ Института биологии внутренних вод РАН на семи водохранилищах Волги (Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское, Куйбышевское и Саратовское) в августе 2015 г., восьми водохранилищах (Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское, Куйбышевское, Саратовское и Волгоградское) и не зарегулированном участке нижней Волги от плотины Волжской ГЭС до г. Астрахань в июне 2016 г.,

а также на шести водохранилищах Волги (Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское, Куйбышевское) и трех водохранилищах Камы (Нижекамское, Воткинское и Камское до г. Березники) в августе 2016 г. (табл. 1). В статье использованы данные сезонных наблюдений распределения и динамики растворенного  $O_2$  на Рыбинском водохранилище в 2011–2016 гг., а также многолетние (август 2012–2015 гг.) наблюдения на Ивановском и Угличском водохранилищах.



**Рис. 1.** Карта-схема водохранилищ Волго-Камского каскада. Водохранилища: 1 – Ивановское, 2 – Угличское, 3 – Рыбинское, 4 – Шекснинское, 5 – Горьковское, 6 – Чебоксарское, 7 – Куйбышевское, 8 – Саратовское, 9 – Волгоградское, 10 – Нижнекамское, 11 – Воткинское, 12 – Камское.

**Fig 1.** Map-scheme of the Volga-Kama cascade reservoirs. Reservoirs: 1 – Ivankovo, 2 – Uglich, 3 – Rybinsk, 4 – Sheksna, 5 – Gorky, 6 – Cheboksary, 7 – Kuibyshev, 8 – Saratov, 9 – Volgograd, 10 – Lower Kama, 11 – Votkinsk, 12 – Kama.

**Таблица 1.** Точки отбора проб в водохранилищах Волги и Камы летом 2015–2016 гг.

**Table 1.** Sampling points in the Volga and Kama River Reservoirs during summer 2015–2016

Станция		Координаты с.ш., в.д.	Станция		Координаты с.ш., в.д.
Но- мер	Название		Но- мер	Название	
Иваньковское водохранилище, 12–16.08.15, 03–04.08.16			26	<u>Наволоки</u>	58° 22.378', 38° 23.217'
1	Лисицы*	56° 46.309', 36° 20.248'	27	<u>Измайлово</u>	58° 27.444', 38° 28.473'
2	Городня*	56° 42.202', 36° 20.264'	28	<u>Средний Двор</u>	58° 30.305', 38° 21.006'
3	оз. Видогощь	56° 42.066', 36° 22.050'	29	<u>Брейтово</u>	58° 19.198', 37° 56.577'
4	Выше р. Шоша*	56° 38.183', 36° 33.178'	30	Устье р. Сить	58° 23.457', 37° 44.545'
5	Шошинский залив	56° 35.511', 36° 26.197'	31	Первомайка	58° 17.546', 37° 52.543'
6	Свердлово*	56° 38.134', 36° 36.338'	32	Центральный мыс	58° 26.537', 38° 17.056'
7	Устье р. Созь	56° 47.868', 36° 43.243'	33	Всехсвятское	58° 23.061', 38° 37.583'
8	Мошквичский залив	56° 45.932', 36° 47.584'	34	Против устья р. Ухра	58° 22.061', 38° 52.583'
9	Корчева*	56° 47.383', 36° 50.386'	35	Волково	58° 09.401', 38° 47.476'
10	Уходово*	56° 47.485', 36° 56.330'	36	Ягорба	58° 43.487', 38° 16.057'
11	Липня*	56° 45.537', 37° 02.478'	37	Мякса	58° 51.370', 38° 06.514'
Угличское водохранилище, 12–16.08.15, 01–03.08.16			38	Любец	59° 00.914', 37° 51.124'
12	Ниже г. Дубна*	56° 52.562', 37° 25.068'	39	Ваганиха	59° 05.979', 37° 43.720'
13	В черте г. Кимры*	56° 52.562', 37° 25.068'	40	Торово	59° 07.564', 37° 42.133'
14	Белый городок*	56° 59.114', 37° 28.464'	41	Кошта	59° 06.330', 36° 46.470'
15	Устье р. Медведица	57° 04.189', 37° 31.207'	42	Кабачино	59° 05.962', 38° 01.986'
16	Против устья р. Нерль*	57° 16.111', 37° 43.375'	43	Устье р. Себла	58° 27.189', 37° 38.030'
17	Кашинка*	57° 16.111', 37° 43.375'	44	Противье	58° 31.220', 37° 32.030'
18	Ниже г. Калязин*	57° 16.068', 37° 52.200'	Горьковское водохранилище, 21–23.08.15, 02–05.06.16, 12–14.08.16		
19	Прилуки*	57° 28.364', 38° 17.049'	45	В черте г. Рыбинск*	58° 02.260', 38° 56.680'
20	Грехов ручей*	57° 28.364', 38° 17.049'	46	Выше г. Ярославль*	57° 41.760', 39° 49.260'
Рыбинское водохранилище, 12–21.08.15, 26.05–2.06.16, 01–12.08.16			47	Ниже г. Ярославль*	57° 33.700', 40° 07.010'
21	В черте г. Мышкин*	57° 47.121', 38° 27.518'	48	Красный Профинтерн*	57° 44.960', 40° 27.510'
22	Глебово*	58° 00.121', 38° 25.518'	49	Против р. Сизема*	57° 46.870', 40° 42.300'
23	<u>Коприно</u> *	58° 04.228', 38° 17.563'	50	Костромское расширение	57° 48.010', 40° 41.100'
24	<u>Молога</u> *	58° 12.472', 38° 27.336'	51	Ниже г. Кострома*	57° 41.220', 40° 59.660'
25	Каменники*	57° 10.145', 38° 38.117'	52	Волгореченск*	57° 28.618', 41° 12.704'

Станция		Координаты
Но- мер	Название	с.ш., в.д.
53	Ниже г. Плес*	57° 27.200', 41° 33.870'
54	Ниже г. Кинешма*	57° 26.700', 42° 14.180'
55	Юрьевец*	57° 21.440', 43° 11.840'
56	Пучеж*	56° 58.630', 43° 11.700'
57	Против г. Чкаловск*	56° 41.250', 43° 20.450'
Чебоксарское водохранилище, 24–26.08.15, 05–07.06.16, 15–18.08.16		
58	Городец*	56° 36.450', 43° 29.450'
59	В черте г. Н-Новгород*	56° 19.968', 43° 59.088'
60	Юрьевец на Оке	56° 12.051', 43° 40.815'
61	р. Ока выше Желнино	56° 10.193', 43° 17.978'
62	Кстово*	56° 09.800', 44° 13.628'
63	Макарьев*	56° 04.832', 45° 04.650'
64	Васильсурск*	56° 08.382', 45° 00.494'
65	Устье р. Ветлуга	56° 18.648', 46° 24.846'
66	Козьмодемьянск*	56° 20.997', 46° 35.654'
67	Ильинка*	56° 11.190', 46° 50.000'
68	Ниже г. Чебоксары*	56° 08.600', 47° 26.334'
Куйбышевское водохранилище, 26–29.08.15, 07–10.06.16, 18–19.08.16		
69	Ниже г. Новочебоксарск*	56° 06.870', 47° 34.188'
70	Ниже г. Звенигово*	55° 55.940', 48° 05.170'
71	Ниже г. Свияжск*	55° 47.290', 48° 45.990'
72	Шеланга*	55° 32.102', 49° 01.143'
73	Камское устье*	55° 12.894', 49° 16.284'
74	Атабаево**	55° 12.520', 49° 21.594'
75	Балахчино**	55° 21.024', 49° 58.092'
76	Рыбная слобода**	55° 25.956', 50° 06.078'
77	Чистополь**	55° 22.644', 50° 35.142'
78	Грахань**	55° 33.948', 51° 30.948'
79	Ниже г. Елабуга**	55° 42.942', 51° 57.606'
80	Тетюши*	54° 57.419', 48° 51.083'

Станция		Координаты
Но- мер	Название	с.ш., в.д.
81	Ундоры*	54° 35.520', 48° 25.988'
82	Кременки*	54° 36.606', 48° 41.846'
83	Ниже г. Новоульяновск*	54° 07.929', 48° 34.166'
84	Против р. Большой Чремшан*	53° 51.026', 48° 57.268'
85	Против р. Уса*	53° 26.462', 49° 09.452'
86	В черте г. Тольятти*	53° 26.330', 49° 25.087'
Саратовское водохранилище, 30–31.08.15, 10–12.06.16		
87	Нижний бьеф Жигулев- ской ГЭС*	53° 27.882', 49° 42.558'
88	Ширяево*	53° 26.000', 50° 00.573'
89	Ермаково*	53° 09.822', 49° 38.227'
90	Выше г. Сызрань*	53° 08.604', 48° 35.774'
91	Разлив у п. Приволжье*	52° 53.978', 48° 35.462'
92	Выше г. Хвалынский*	52° 32.964', 48° 10.168'
93	Против устья р. Малый Иргиз*	52° 13.530', 48° 06.116'
94	В черте г. Балаково*	52° 08.88', 47° 52.77'
Волгоградское водохранилище, 12–15.06.16		
95	Нижний бьеф Саратов- ской ГЭС*	52° 00.232', 47° 38.474'
96	Против устья р. Большой Иргиз*	52° 00.697', 47° 22.876'
97	Ниже п. Маркс*	51° 44.190', 46° 41.184'
98	Против устья р. Курдюм*	51° 38.117', 46° 13.755'
99	Ниже г. Саратов*	51° 23.765', 45° 58.502'
100	Ровное*	50° 47.517', 45° 59.337'
101	Против устья р. Еруслан*	50° 19.314', 45° 45.826'
102	Выше г. Камышин*	50° 06.046', 45° 27.271'
103	Горный Балыклей*	49° 32.026', 45° 06.324'
104	Верхний бьеф Волжской ГЭС*	48° 51.271', 44° 40.273'
Незарегулированная Волга, 15–18.06.16		
105	В черте г. Волгоград*	48° 45.000', 44° 37.242'
106	Светлый Яр*	48° 29.548', 44° 45.092'
107	Райгород*	48° 28.497', 44° 55.236'

Станция		Координаты
Но- мер	Название	с.ш., в.д.
108	Каменный Яр*	48° 28.463', 45° 35.297'
109	Черный Яр*	48° 06.265', 46° 09.547'
110	Соленое займище*	47° 55.129', 46° 09.901'
111	Ветлянка*	47° 38.055', 46° 38.806'
112	Сероглазка*	46° 59.276', 47° 33.553'
113	Замьяны*	46° 51.708', 47° 44.376'
114	Вернелебязь*	46° 44.765', 47° 49.908'
115	р. Бузан	46° 44.370', 47° 53.668'
116	Тулугановка*	46° 31.960', 48° 01.394'
117	В черте г. Астрахань*	46° 23.470', 48° 02.274'
118	Ниже г. Астрахань*	46° 18.305', 47° 58.519'
Нижекамское водохранилище, 20–21.08.16		
119	В черте г. Набережные Челны**	55° 42.906', 52° 18.534'
120	Икское устье**	55° 54.882', 52° 35.016'
121	Против устья р. Белая**	55° 54.888', 53° 32.304'
122	Вятское**	56° 02.694', 53° 50.256'
123	Ниже г. Сарапул**	56° 25.068', 53° 51.648'

Станция		Координаты
Но- мер	Название	с.ш., в.д.
124	Ниже устья р. Сива**	56° 48.744', 53° 53.688'
Воткинское водохранилище, 22–23.08.16		
125	Выше г. Чайковский**	56° 49.028', 54° 09.564'
126	Воткинск**	56° 59.387', 54° 11.562'
127	Елово**	57° 03.773', 54° 51.231'
128	Оса**	57° 19.097', 55° 31.683'
129	Ниже г. Оханск**	57° 39.756', 55° 25.290'
130	Против устья р. Нытва**	57° 52.698', 55° 19.464'
131	У г. Краснокамск**	58° 04.320', 55° 40.770'
Камское водохранилище, 24–25.08.16		
132	Выше г. Пермь**	58° 09.102', 56° 20.286'
133	Добрянка**	58° 23.975', 56° 26.493'
134	Против устья р. Обва**	58° 36.853', 56° 05.417'
135	Ниже устья рек Иньва и Косьва**	58° 53.238', 56° 12.752'
136	Против устья р. Кондас**	59° 20.217', 56° 28.388'
137	Выше г. Березники**	59° 25.999', 56° 41.787'

**Примечание.** Здесь и в табл. 3–12: “\*” – точки отбора проб на русле р. Волги (сверху вниз по течению реки), “\*\*” – точки отбора проб на русле р. Камы (снизу вверх по течению реки), подчеркиванием выделены станции регулярных (стандартных) наблюдений на Рыбинском водохранилище (каждые 2 нед май–октябрь 2011–2014 гг.).

Их описание приведено в работах [Рыбинское водохранилище..., 1972; Волга и ее жизнь, 1978; Ивановское водохранилище..., 1978; Эдельштейн, 1998; Экологические проблемы..., 2001; Куйбышевское водохранилище..., 1983, 2008 (The Rybinsk Reservoir..., 1972; The Ivankovo Reservoir..., 1978; The River Volga..., 1979; Edelstein, 1998; Ecological problems..., 2001; The Kuibyshev Reservoir..., 1983, 2008)].

Для измерения содержания  $O_2$  на борту экспедиционного судна на каждой станции использовали три метода. В 2011–2016 гг. на стандартных станциях в Рыбинском водохранилище, а также в экспедициях по Волге в 2015 и 2016 гг. определяли концентрацию кислорода у поверхности воды (глубина 0.5 м) и в метровом слое над дном водохранилища йодометрическим методом (по Винклеру) [Семе-

нов, 1977 (Semenov, 1977)]. Оперативные данные о вертикальном распределении  $O_2$  и  $T$  воды получали электрохимическим и оптическим методами с использованием ручных портативных измерителей YSI-85 (электрохимический, гальванический) и YSI ProODO (оптический) (YSI, Inc., USA), замеры показателей производили во всем столбе воды от поверхности до дна с интервалом 1 м. Портативными измерителями кислородный режим акватории волжских водохранилищ исследовали во всех летних маршрутных экспедициях с 2012 по 2016 г.

Стандартные пробы зоопланктона в пелагиали Рыбинского водохранилища отбирали планктобатометром системы Дьяченко-Кожевникова объемом 10 л. Послойно облавливали весь столб воды с интервалом 2 м, за-



тем полученные сборы объединяли и анализировали как одну интегральную пробу. На отдельных станциях в большинстве обследованных водохранилищ изучали вертикальное распределение зоопланктона: делали послойные (3–4 горизонта) ловы тем же батометром с интервалом 1 м. Тотальные пробы зоопланктона в маршрутных экспедициях отбирали малой сетью Джеди (диаметр входного отверстия 12 см, сито с диагональю ячеей 105 мкм), облавливали весь столб воды от дна до поверхности водоема. Сборы фиксировали 4%-ным формалином и просматривали в лаборатории под стереомикроскопами MC-2 и StereoDiscovery-12. Биомассу зоопланктона рассчитывали по формулам связи массы с длиной тела гидробионтов [Балушкина, Винберг, 1979 (Balushkina, Vinberg, 1979); Ruttner-Kolisko, 1977]. Доминантные виды выделяли по относительной численности отдельно в таксономических группах ракообразных и коловраток [Лазарева, 2010 (Lazareva, 2010)]. За нижнюю границу доминирования принимали обилие 10% суммарного.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Уровень наполнения водохранилищ.

Уровень воды в водохранилищах определяется объемом притока речных вод и схемой сезонного регулирования подпора на плотинах ГЭС. Для Рыбинского водохранилища показано, что в многоводные периоды среднегодовой уровень воды на 0.35–0.55 м выше, чем в маловодные [Литвинов, Рошчупко, 2007 (Litvinov, Roshchupko, 2007)]. Выделены квазипериодические колебания водности Верхней Волги с периодом 18–19 лет, за все время наблюдений (с 1890 г.) отмечены четыре маловодных (1890–1901, 1929–1946, 1963–1977 и 1996–2003 гг.) и четыре многоводных фазы (1902–1928, 1947–1962, 1978–1995 и 2004–2014 гг.). Среднемноголетний приток в Рыбинское водохранилище составляет 33 км<sup>3</sup>/год [Литвинов и др., 2015; Законнова, Литвинов, 2016 (Litvinov et al., 2015; Zakonnova, Litvinov, 2016)]. Для Средней Волги ниже ее главных притоков Оки и Камы (створ Жигулевской ГЭС) выделены две фазы водности: маловодная (1957–1977 гг.) и многоводная (1978–2005 гг.), среднемноголетний приток в Куйбышевское водохранилище составляет 254 км<sup>3</sup>/год [Куйбышевское водохранилище..., 2008 (Kuibyshev Reservoir..., 2008)]. Сравнение чередования фаз водности Верхней и Средней Волги показывает, что они сходны по срокам, но на Средней Волге не выделяют маловодную фазу 1996–2003 гг. Для Нижней Волги (пост Верхнелебязье у г. Астрахань) установлены колебания с периодами

Пробы макрозообентоса отбирали модифицированным дночерпателем Экмана-Берджа (ДАК-250) с площадью захвата 1/40 м<sup>2</sup> и ДАК-100 с площадью захвата 1/100 м<sup>2</sup> по 1–2 подъема на каждой станции. Грунт промывали через сито с ячейей 200–220 мкм. Моллюсков выбирали из остатков грунта живыми. Всех особей дрейссенид идентифицировали до вида, определяли их сырую массу и измеряли длину раковины. В дальнейшем рассчитывали численность (экз./м<sup>2</sup>) и биомассу (г/м<sup>2</sup>) моллюсков. Для выявления новых мест обитания и уточнения соотношения между двумя видами дрейссенид проводили качественные сборы моллюсков с помощью драги, а также исследовали твердые субстраты с обрастаниями, попадавшие в донный трал при вылове рыбы. Камеральную и статистическую обработку материала проводили по методике, принятой в Институте биологии внутренних вод РАН [Методика изучения..., 1975 (The method..., 1975)] с некоторыми дополнениями [Щербина, 1993 (Shcherbina, 1993)].

12–13 и 17–19 лет, средний объем стока ее вод 236 км<sup>3</sup>/год [Водный баланс..., 2016 (Water balance..., 2016)]. Маловодными (объем стока <225 км<sup>3</sup>/год) были 1904–1913, 1919–1921, 1930–1940, 1959–1977 и 2006–2015 гг., многоводными (>250 км<sup>3</sup>/год) – 1881–1889, 1914–1918, 1922–1929, 1978–2005 гг., средними (240–250 км<sup>3</sup>/год) – 1890–1903, 1941–1958, 2007 и 2013 гг. [Яготинцев, Поставик, 2013; Каталог стока..., 2017 (Yagotintsev, Postavik, 2013; General Catalogue..., 2017)].

Таким образом, десятилетие (2004–2014 гг.), предшествующее исследованиям авторов, относилось к многоводной фазе гидрологического цикла Верхней Волги, однако на Нижней Волге в этот период наблюдали преимущественно маловодье, что во многом обусловило снижение уровня Каспия [Яготинцев, Поставик, 2013; Второй оценочный..., 2014; Каталог стока..., 2017 (Yagotintsev, Postavik, 2013; The second assessment..., 2014; General Catalogue..., 2017)]. Экстремально маловодными были 2014 и 2015 гг., когда сток Волги у Астрахани составил соответственно 212 и 182 км<sup>3</sup>/год [Каталог стока..., 2017 (General Catalogue..., 2017)]. Аномально низким (17.4 км<sup>3</sup>/год) был приток в Рыбинское водохранилище в 2014 г. [Литвинов, Законнова, 2016 (Litvinov, Zakonnova, 2016)], крайне низким (<100.3 м БС) был уровень воды в течение всего лета, ее недобор сохранился и в 2015 г. (приток 20.2 км<sup>3</sup>/год), тогда как в 2016 г. при-

ток ( $29.6 \text{ км}^3/\text{год}$ ) был близким к норме (данные Верхне-Волжского бассейнового водного управления). В сроки проведения экспедиционных работ 2015–2016 гг. во всех водохранилищах Волго-Камского каскада, за исключением Рыбинского, уровень воды высокий, близкий к нормальному подпорному (табл. 2). Уровень воды в Рыбинском водохранилище в ав-

густе 2015 и 2016 гг. близок к норме для мало-водной фазы стока, которая для этого месяца составляет 100.5 м БС [Литвинов, Рощупко, 2007 (Litvinov, Roshchupko, 2007)]. В начале июня 2016 г. уровень водохранилища превышал норму многоводных лет для этого месяца (101.5 м БС).

**Таблица 2.** Уровень наполнения и температура поверхности воды водохранилищ Волги и Камы

**Table 2.** Level of filling and water surface temperature of the Volga River and Kama River Reservoirs

Водохранилище	Уровень воды, м БС				Температура воды, °С			
	НПУ	VIII.2015	VI. 2016	VIII.2016	Норма VI/VIII	VIII.2015	VI. 2016	VIII.2016
Верхняя Волга								
Иваньковское	124	123.8	123.8	123.9	<u>18.0</u> 19.5	<u>21.7±0.2</u> 20.6–23.0	–	<u>23.9±0.2</u> 23.1–24.6
Угличское	113	112.9	112.8	112.9	<u>17.8</u> 19.7	<u>21.8±0.4</u> 19.5–23.7	–	<u>24.4±0.3</u> 23.3–25.5
Рыбинское	102	100.2	101.7	100.9	<u>15.4</u> 18.7	<u>17.2±0.8</u> 15.3–22.3	<u>18.2±0.2</u> 17.6–19.2	<u>22.7±0.2</u> 21.5–23.9
Средняя Волга								
Горьковское	84	83.7	83.9	83.9	<u>16.2</u> 19.1	<u>18.7±0.4</u> 16.6–22.1	<u>19.3±0.5</u> 17.9–23.8	<u>23.0±0.3</u> 22.1–26.6
Чебоксарское	63	63.2	63.2	63.1	<u>16.8</u> 19.8	<u>18.1±0.2</u> 17.5–18.6	<u>18.6±0.1</u> 18.2–19.7	<u>23.0±0.3</u> 21.5–24.3
Куйбышевское	53	53.1	52.9	52.3	<u>17.4</u> 20.4	<u>18.9±0.3</u> 17.3–21.1	<u>17.6±0.2</u> 16.3–18.4	<u>24.8±0.1</u> 24.3–25.5
Нижняя Волга								
Саратовское	28	28.1	27.9	27.9	<u>16.6</u> 20.6	<u>19.1±0.2</u> 18.6–19.6	<u>18.0±0.5</u> 16.4–19.9	–
Волгоградское	15	14.5	15.0	14.7	<u>16.8</u> 21.7	–	<u>18.9±0.3</u> 17.5–20.5	–
Незарегулированная Волга	–	-24.9	-25.1	-25.2	<u>18.0</u> 22.5	–	<u>19.9±0.5</u> 17.5–22.4	–
Кама								
Камское	109	108.4	108.2	107.1	<u>15.0</u> 18.0	–	–	<u>24.3±0.1</u> 23.8–24.8
Воткинское	89	88.8	88.7	87.8	<u>15.2</u> 18.1	–	–	<u>24.5±0.3</u> 23.4–25.4
Нижнекамское	68	63.3	63.3	63.3	<u>16.6</u> 19.2	–	–	<u>24.5±0.4</u> 23.3–25.8

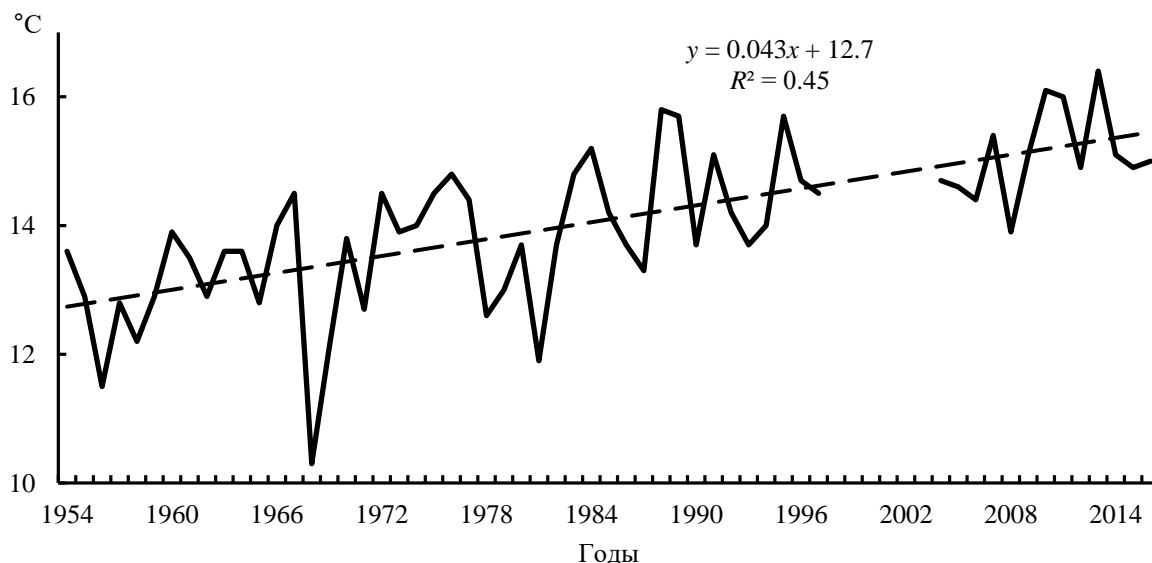
**Примечание.** НПУ – нормальный подпорный уровень по работе [Эдельштейн, 1998 (Edelstein, 1998)], уровень в сроки наблюдений приведен по работам [Изменения, уровней..., 2017 (Changes in..., 2017); Водохранилища, 2018 (A Reservoirs, 2018)], БС – Балтийская система высот; норма VI/VIII – среднемесячная (1957–1986 гг.) температура воды: над чертой – в июне, под чертой – в августе по работам [Литвинов, Рощупко, 1993; Многолетние данные..., 1988 (Litvinov, Roshchupko, 1993; Long-term data..., 1988)], температура воды в сроки наблюдений: над чертой – среднее, под чертой – минимум и максимум, прочерк – данные отсутствуют.

**Термический режим.** В 2015–2016 гг. среднегодовая Т воздуха на Европейской части России и в бассейне Волги превышала норму, 2015 г. стал самым теплым ( $+2.07^\circ\text{C}$ ) за период наблюдений [Доклад..., 2016, 2017 (A Report..., 2016, 2017)]. С 1995 г. в Рыбинском водохранилище зарегистрировано значимое повышение Т воды в поверхностном горизонте летом ( $+0.5^\circ\text{C}$  июль) и осенью ( $+0.7^\circ\text{C}$  октябрь) по сравнению с нормой [Литвинов, Законнова, 2012 (Litvinov, Zakonnova, 2012)], отмечен четкий положительный тренд средней

(май–октябрь) Т воды в пелагиали водохранилища (рис. 2). К 2015 г. средняя скорость ее увеличения для безледного периода составила  $0.76^\circ\text{C}/10$  лет, а максимальная (июль) –  $1^\circ\text{C}/10$  лет, среднемноголетнее значение (норма) для периода потепления (1976–2015 гг.) составило  $14.2^\circ\text{C}$ , ранее норма прогрева воды была ниже на  $0.4^\circ\text{C}$  [Законнова, Литвинов, 2016 (Zakonnova, Litvinov, 2016)]. Аномально жарким летом 2010 г. Т поверхности воды в июле достигала  $29^\circ\text{C}$  в Рыбинском водохранилище,  $29\text{--}33^\circ\text{C}$  в Горьковском и Чебоксарском,

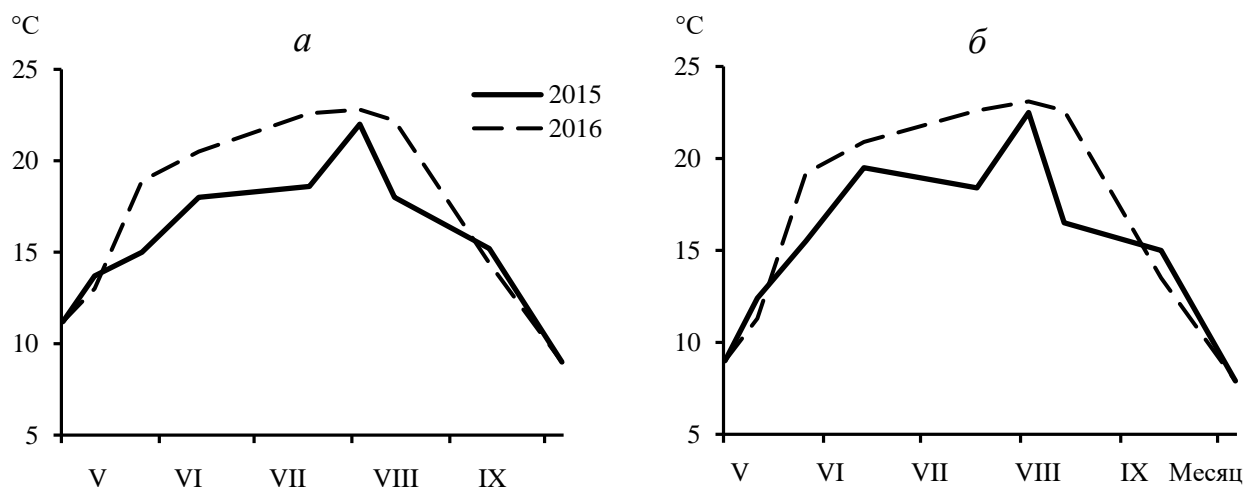
Т воды у дна была высокой (27–28°C) [Лазарева и др., 2012 (Lazareva et al., 2014)], что на 6–8°C выше сезонного максимума, который в этих водоемах для Т воды у поверхности со-

ставляет 23–25°C [Литвинов, Рощупко, 1993; Законнова Литвинов, 2016 (Litvinov, Roshchupko, 1993; Zakonnova, Litvinov, 2016)].



**Рис. 2.** Динамика средней за вегетационный период (V–X) температуры поверхности воды Рыбинского водохранилища в 1954–2016 гг.

**Fig 2.** Long-term dynamics of the average surface water temperature for the vegetative period (V-X) in the Rybinsk Reservoir in 1954–2016



**Рис. 3.** Сезонный ход температуры поверхности воды в Волжском (а) и Главном (б) плесах Рыбинского водохранилища в 2015 и 2016 гг.

**Fig. 3.** The seasonal variation of water surface temperature in the Volzhskii (a) and Glavnyi (Main, b) reaches of the Rybinsk Reservoir in 2015 and 2016

Во второй половине августа 2015 г. в сроки экспедиции максимальную Т поверхности воды регистрировали в Ивановском и Угличском водохранилищах, где ее средние значения (~23°C) превышали норму этого месяца на 2.1–2.2°C (табл. 2). Ниже по Волге от Рыбинского до Саратовского водохранилища наблюдали уже пониженную Т воды (17–19°C), что на 1.5–1.7°C ниже нормы. В августе следующего года Т воды на всех об-

следованных водохранилищах Волги (23–25°C) и Камы (~24°C) была существенно (3.2–6.4°C) выше нормы (табл. 2), наибольшая аномалия (>5°C) прогрева вод отмечена в камских водохранилищах. В первой половине июня 2016 г. также наблюдали заметное превышение (1.4–3.1°C) июньской нормы Т воды по всей Волге от Рыбинского водохранилища до дельты, исключая Куйбышевское водохранилище, в котором прогрев воды был близок к

норме. Наиболее сильно прогревались воды в Горьковском водохранилище ( $>19^{\circ}\text{C}$ ) и незарегулированном участке Нижней Волги ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ). Особенно высокие значения ( $31\text{--}33^{\circ}\text{C}$ ) в оба года отмечали вблизи сброса теплых вод Конаковской государственной тепловой электростанции (ГРЭС) в Мошковичском заливе Ивановского водохранилища (табл. 3). Шлейф повышенной ( $+1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ ) тем-

пературы прослеживался по всей толще воды на 5 км вниз по течению вдоль правого берега Волги (до ст. Корчева). В Горьковском водохранилище вблизи сброса теплых стоков Костромской ГРЭС (ст. Волгореченск) вода на русле Волги прогревалась до  $22\text{--}24^{\circ}\text{C}$ , что на  $3\text{--}5^{\circ}\text{C}$  выше средней для водоема (табл. 2).

**Таблица 3.** Распределение содержания растворенного кислорода ( $\text{O}_2$ ) и температуры воды ( $T$ ) в Ивановском водохранилище в августе 2015–2016 гг.

**Table 3.** Distribution of dissolved oxygen ( $\text{O}_2$ ) and water temperature ( $T$ ) in the Ivankovo Reservoir in August 2015–2016

Станция	h, м	Поверхность					Дно				
		Т, °С	О <sub>2</sub> , по Винклеру		О <sub>2</sub> , по датчику		Т, °С	О <sub>2</sub> , по Винклеру		О <sub>2</sub> , по датчику	
			мг/л	%	мг/л	%		мг/л	%	мг/л	%
2015 г.											
Лисицы*	8	21.6	7.6	87	7.6	87	21.1	6.5	73	6.4	72
Городня*	9	21.2	5.6	64	7.7	87	20.3	1.3	15	2.8	31
оз. Видогощь	18	20.9	7.3	82	7.3	82	6.9	0	0	0.6	5
Выше р. Шоша*	9	21.9	7.6	87	7.9	90	19.9	0.7	7	0.9	10
Шошинский залив	2	21.9	7.4	85	8.9	101	21.9	7.3	84	8.6	97
Свердлово*	12	21.9	6.9	80	7.9	91	19.7	1.3	15	0.7	8
Устье р. Созь	8	22.5	6.9	81	7.3	85	20.3	2.0	22	2.6	29
Мошковичский залив	2	31.0	7.3	97	7.6	102	31.4	6.9	93	7.9	117
Корчева*	14	23.0	8.2	97	8.4	99	20.2	2.0	22	1.5	16
Уходово*	14	21.7	6.8	78	7.7	88	20.0	1.3	22	1.5	17
Липня*	17	21.1	6.9	79	6.8	77	20.0	1.8	20	2.3	26
2016 г.											
Лисицы*	8	23.4	5.6	66	5.5	63	23.1	5.1	60	4.4	59
Городня*	10	23.3	4.7	55	4.6	53	23.1	4.1	48	4.6	53
оз. Видогощь	16	23.1	4.4	51	3.7	43	5.0	0	0	0.6	5
Выше р. Шоша*	9	24.0	5.5	66	5.7	69	20.7	1.1	12	0.6	12
Шошинский залив	5	24.4	11.8	143	11.1	134	22.6	5.3	62	4.6	53
Свердлово*	10	24.5	6.4	77	7.3	87	19.5	0.2	2	0.6	7
Устье р. Созь	10	23.1	5.8	69	5.4	62	19.8	0.6	7	0.4	5
Мошковичский залив	2.5	33.1	6.2	85	6.1	85	32.8	6.3	85	6.0	84
Корчева*	7	24.2	6.5	79	6.7	80	22.0	1.9	22	0.3	4
Уходово*	14	24.5	7.5	90	7.8	93	19.7	0.3	3	0.4	4
Липня*	16	24.6	7.5	91	7.8	91	20.2	0.4	5	0.1	<1

**Примечание.** Здесь и в табл. 4–12.  $h$  – глубина в точке отбора проб,  $\text{O}_2, \%$  – уровень насыщения воды, прочерк – данные отсутствуют, маркировка станций как в табл. 1. Датчики: 2015 г. – YSI ProODO, 2016 г. – YSI-85.

Анализ данных регулярных наблюдений на Рыбинском водохранилище показал, что в 2015 г.  $T$  поверхности воды превышала  $20^{\circ}\text{C}$  только в первой декаде августа, сезонный максимум составил  $22.5^{\circ}\text{C}$ , тогда как в 2016 г. значения  $>20^{\circ}\text{C}$  регистрировали в течение двух месяцев со второй декады июня до третьей декады августа, а максимум  $T$  воды достигал  $23.1^{\circ}\text{C}$  (рис. 3). Сезонный пик прогрева водохранилища в современный период приходится на июль–август [Законнова Литвинов, 2016 (Zakonnova, Litvinov, 2016)]. Сопоставление средней  $T$  воды в эти месяцы показало, что в 2015 г. она была на  $2.5\text{--}3.2^{\circ}\text{C}$  ниже ( $19.1^{\circ}\text{C}$  в Главном плесе и  $19.5^{\circ}\text{C}$  в Волжском) по срав-

нению с таковой в 2016 г. ( $21.6$  и  $22.7^{\circ}\text{C}$  соответственно). Уровень прогрева воды в других водохранилищах Волги отличался от такового в Рыбинском (табл. 2), но сезонный ход температуры в целом близок. Таким образом, прогрев воды водохранилищ Волги летом 2016 г. был намного выше, а близкая к сезонному максимуму температура держалась дольше, чем в предыдущем. Отметим, что в июле–августе 2009 г. на Средней и Нижней Волге зарегистрирована более высокая  $T$  воды, в Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах она составила в среднем  $24.6$  и  $26^{\circ}\text{C}$  соответственно, в Волгоградском водохранилище и низовье Волги превысила  $27^{\circ}\text{C}$ , максимальные

значения достигали 29–30°C [Дебольский и др., 2010 (Debol'skij et al., 2010)].

Разница поверхностной и придонной Т воды возрастала по мере увеличения глубины в точках отбора проб (табл. 3–12). В первой половине июня в фазу летнего подъема Т воды

различия прогрева у поверхности и дна были в основном не велики, максимальная разница (5–8°C) наблюдалась в Главном плесе Рыбинского водохранилища, где на глубине 7–13 м в начале месяца еще сохранялся весенний уровень температуры 10–12°C (табл. 5).

**Таблица 4.** Распределение содержания растворенного кислорода (O<sub>2</sub>) и температуры воды (Т) в Угличском водохранилище в августе 2015–2016 гг.

**Table 4.** Distribution of dissolved oxygen (O<sub>2</sub>) and water temperature (Т) in the Uglich Reservoir in August 2015–2016

Станция	h, м	Поверхность					Дно				
		Т,°С	О <sub>2</sub> , по Винклеру		О <sub>2</sub> , по датчику		Т,°С	О <sub>2</sub> , по Винклеру		О <sub>2</sub> , по датчику	
			мг/л	%	мг/л	%		мг/л	%	мг/л	%
2015 г.											
Ниже г. Дубна*	8	22.1	8.1	93	9.5	110	21.0	7.3	82	5.6	63
В черте г. Кимры*	8	21.9	9.2	106	8.8	102	21.4	4.6	53	7.6	86
Белый городок*	11	21.6	9.9	112	9.4	108	20.1	6.6	73	4.0	44
Устье р. Медведица	8	21.6	8.6	98	9.3	106	20.3	4.6	51	5.5	61
Против устья р. Нерль*	13	21.5	7.9	90	8.4	97	19.0	0.3	4	0.8	8
Кашинка*	8	21.5	9.2	105	9.8	112	21.6	7.9	91	9.6	109
Ниже г. Калязин*	10	19.5	5.9	65	6.4	70	19.4	4.3	47	5.0	54
Прилуки*	17	22.7	13.8	161	13.0	152	19.0	2.6	29	4.1	44
Грехов ручей*	20	23.7	12.5	149	12.6	150	18.8	3.1	10	1.1	11
2016 г.											
Ниже г. Дубна*	7	23.5	3.9	46	3.8	44	23.5	3.9	46	3.8	44
В черте г. Кимры*	7	23.3	4.4	51	3.8	46	23.1	4.4	51	3.0	34
Белый городок*	10	25.1	6.5	80	5.9	72	23.5	3.8	45	2.4	29
Устье р. Медведица	9	24.7	8.7	106	7.6	91	22.5	0.3	4	1.9	23
Против устья р. Нерль*	11	25.0	6.5	80	8.4	104	22.0	3.4	29	0.1	1
Кашинка*	12	24.3	6.8	82	6.3	80	21.3	0.2	3	0.2	3
Ниже г. Калязин*	12	24.7	8.1	98	8.8	104	21.5	0.5	6	1.1	11
Прилуки*	10	23.3	5.9	70	5.9	70	22.1	2.5	29	2.1	20
Грехов ручей*	17	25.5	7.1	87	9.3	101	21.7	1.8	21	1.5	17
Примечание.	Датчики:	2015	г.	–	YSI	ProODO,	2016	г.	–	YSI-85.	

В Горьковском водохранилище средняя Т воды у дна была на ~2°C ниже поверхностной (табл. 13), только в приплотинном участке у г. Чкаловск на глубине 18 м разница достигала 8°C (табл. 6). В Саратовском и Волгоградском водохранилищах разница поверхностной и придонной Т воды составила в среднем <1.5°C, в приплотинных участках у городов Балаково (глубина 25 м) и Волжский (глубина 17 м) она достигала 2–3.5°C (табл. 9–10). На большей части акватории Куйбышевского водохранилища, исключая приплотинный участок у в черте г. Тольятти (глубина 26 м, разница Т воды у поверхности и дна 1.5°C), а также по руслу Волги ниже г. Волгоград наблюдали фактически гомотермию (табл. 8, 11).

Прогрев придонного слоя вод Верхней и Средней Волги в августе 2016 г. был почти повсеместно выше, чем в те же сроки 2015 г., только в Ивановском водохранилище средняя Т воды у дна в эти годы не различалась (табл. 13). В августе по руслу Волги наиболь-

шую разницу между поверхностной и придонной Т воды наблюдали в Ивановском и Угличском водохранилищах. Летом 2016 г. в Ивановском плесе Ивановского водохранилища на глубине 10–16 м она достигала 3–5°C, то же наблюдали в Угличском водохранилище ниже устья р. Нерль на глубине 11–20 м. Большие различия (2.3–2.5°C) по температуре у поверхности и дна отмечены также по руслу Камы в сравнительно глубоководных Камском и Воткинском водохранилищах. В приплотинном участке Камского у городов Пермь и Добрянка на глубине >20 м вода была на 3–7°C холоднее поверхностной, а на участке от г. Воткинск до г. Чайковский в Воткинском водохранилище на глубине 21–22 м – на 3–5°C. В Рыбинском, Горьковском, Куйбышевском и Нижнекамском водохранилищах в оба года различия Т воды у поверхности и дна были в среднем <1°C (табл. 13), в приплотинных участках они достигали 1.5–2.0°C (табл. 5, 6, 8 и 12), на боль-

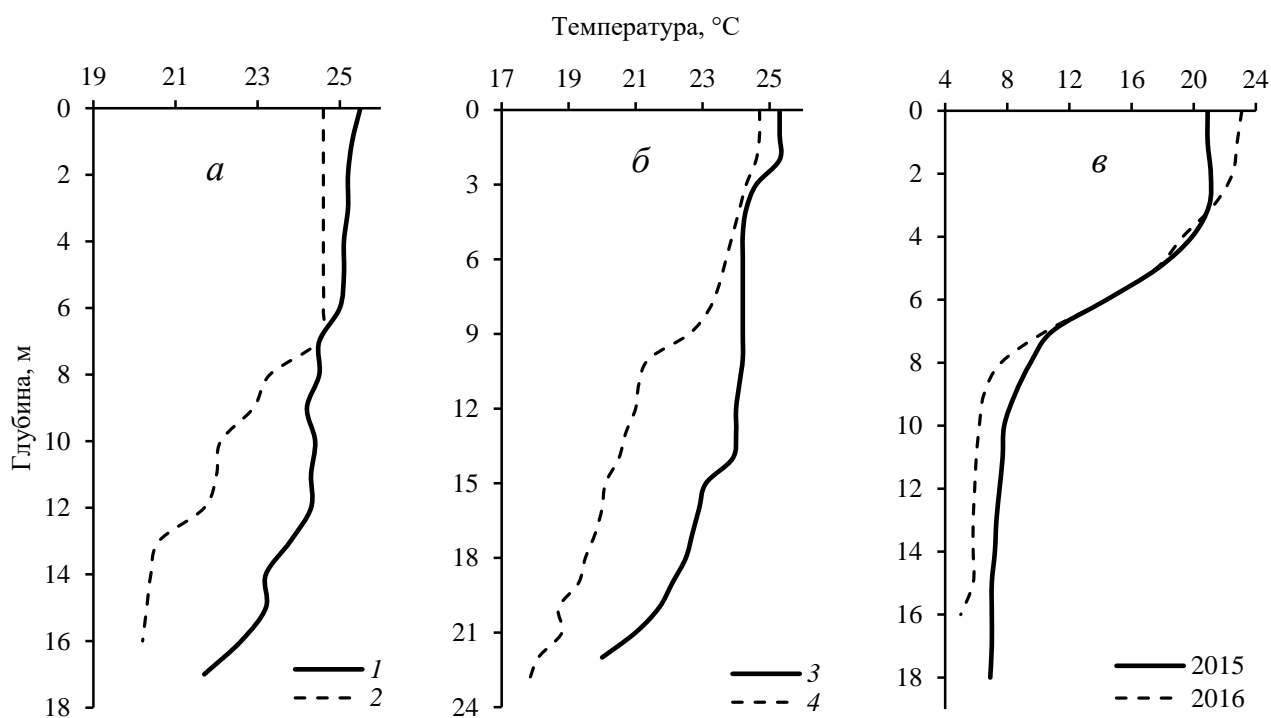
шей части Чебоксарского водохранилища таковых вообще не регистрировали (табл. 7).

Несмотря на большую разницу  $T$  воды у поверхности и дна верхних водохранилищ в каскаде Волги и Камы, термоклин в этих водоемах выражен сравнительно слабо даже в условиях сильного прогрева поверхностного слоя в 2016 г. Скачок  $T$  воды ( $0.5\text{--}1^\circ\text{C}$ ) отмечали на глубине от 7 до 10 м в приплотинных участках Иваньковского и Камского водохранилищ, в Воткинском и Угличском – от 2 до 7 м (рис. 4). В силу слабой стратификации сохранялся обмен вод между эпи- и гипolimнионом, как следствие,  $T$  воды в гипolimнии водохранилищ была сравнительно высокой ( $19\text{--}21^\circ\text{C}$  в 2015 г. и  $18\text{--}24^\circ\text{C}$  в 2016 г.) и понижалась от слоя скачка до дна плавно или в несколько ступеней: дополнительные скачки формировались на глубине 12–14 м. Высокий летний прогрев глубоких слоев воды крупных водохранилищ представляет главную особенность их термической структуры. Еще в начале 1970-х в теплые годы  $T$  придонной воды в Ры-

бинском водохранилище достигала  $20\text{--}22^\circ\text{C}$  [Буторин и др., 1982 (Butorin et al., 1982)].

В стратифицированных озерах металимниальный скачок  $T$  воды более существенно выражен и гипolimнион всегда холодный. Так, в оз. Глубокое (Московская обл.) в 1940–1960-х годах  $T$  воды в гипolimнии составляла  $4\text{--}8^\circ\text{C}$ , а в 2000-х –  $7\text{--}9^\circ\text{C}$  [Щербаков, 1967; Жданова, Лазарева, 2009 (Shcherbakov, 1967; Zhdanova, Lazareva, 2009)]. В небольшом пойменном оз. Видогощь (ст. 3), затопленном водами Иваньковского водохранилища, в течение пяти лет наблюдений слой температурного скачка был одинаково четко выражен, в 2015 и 2016 гг. он располагался на глубине 3–6 м,  $T$  воды в гипolimнии в прохладном августе 2015 г. ( $7\text{--}10^\circ\text{C}$ ) оказалась на  $2^\circ\text{C}$  выше по сравнению с теплым 2016 г. ( $5\text{--}8^\circ\text{C}$ ) (рис. 4 в).

Таким образом, наиболее заметную термическую стратификацию водной толщи на фоне высокого прогрева воды наблюдали в августе 2016 г. в глубоководных участках водохранилищ Верхней Волги (Иваньковское и Угличское) и Камы (Камское и Воткинское).



**Рис. 4.** Вертикальные профили температуры воды в приплотинных участках Иваньковского и Угличского (а), Воткинского и Камского водохранилищ (б) в августе 2016 г., а также пойменного оз. Видогощь (ст. 3, в) в акватории Иваньковского водохранилища в августе 2015 и 2016 гг.. Станции: 1 – 11, 2 – 20, 3 – 125, 4 – 132, нумерация как в табл. 1.

**Fig. 4.** Vertical profiles of water temperature in the damplain sections of the Ivankovo and Uglich (a), Votkinsk and Kama reservoirs (b) in August 2016, as well as the floodplain Lake Vidogoshch (station 3) in the Ivankovo Reservoir aquatorium (c) in August 2015 and 2016. Stations: 1 – 11, 2 – 20, 3 – 125, 4 – 132, numbering as in Table 1.

**Таблица 5.** Распределение содержания растворенного кислорода (O<sub>2</sub>) и температуры воды (T) в Рыбинском водохранилище в августе 2015–2016 и июне 2016 гг.

**Table 5.** Distribution of dissolved oxygen (O<sub>2</sub>) and water temperature (T) in the Rybinsk Reservoir in August 2015–2016 and June 2016

Станция	h, м	Поверхность					Дно				
		Т, °С	О <sub>2</sub> , по Винклеру		О <sub>2</sub> , по датчику		Т, °С	О <sub>2</sub> , по Винклеру		О <sub>2</sub> , по датчику	
			мг/л	%	мг/л	%		мг/л	%	мг/л	%
Август 2015 г.											
В черте г. Мышкин*	7	22.3	8.8	102	9.3	107	20.7	7.8	79	9.0	100
<u>Коприно*</u>	5	17.9	7.9	84	8.0	84	17.9	6.4	68	7.9	83
<u>Молога*</u>	9	16.4	8.4	86	8.4	86	16.3	7.3	75	8.0	82
Каменники*	22	16.8	9.2	96	9.1	94	15.9	6.6	67	7.3	77
<u>Наволоч</u>	8	16.2	7.9	81	8.8	90	16.1	—	—	8.5	86
<u>Измайлово</u>	5	15.3	7.5	75	8.9	89	15.3	7.3	73	8.5	85
<u>Средний Двор</u>	6	17.0	7.3	76	8.2	85	17.0	7.6	79	8.2	85
<u>Брейтово</u>	13	15.9	8.2	83	9.6	96	15.9	8.3	84	8.1	90
Волково	15	15.5	—	—	8.9	90	14.0	—	—	7.4	72
Август 2016 г.											
В черте г. Мышкин*	7	23.9	6.0	71	7.0	80	22.7	3.9	46	3.8	45
Глебово*	14	23.2	7.2	85	7.4	81	20.5	5.9	66	0.7	8
<u>Коприно*</u>	12	22.9	5.9	69	6.2	71	22.3	4.8	55	4.8	55
<u>Молога*</u>	15	23.1	7.8	92	8.6	102	22.6	7.1	83	7.0	80
Каменники*	19	22.2	—	—	9.0	105	21.6	—	—	4.9	56
<u>Наволоч</u>	8	23.4	7.5	88	8.1	97	22.5	6.5	76	6.4	75
<u>Измайлово</u>	6	23.5	7.2	86	7.8	93	22.9	7.0	82	7.1	82
<u>Средний Двор</u>	15	23.6	7.6	91	7.9	95	22.3	7.0	81	4.6	55
<u>Брейтово</u>	12	22.8	8.1	95	8.1	95	22.3	6.5	76	6.1	69
Устье р. Сить	9	23.4	8.1	96	8.1	95	20.0	0	0	0.1	<1
Первомайка	12	22.1	7.8	90	8.0	104	22.0	6.3	72	6.4	72
Центральный мыс	7	21.5	7.4	85	8.0	92	21.4	6.7	76	7.3	82
Всехсвятское	14	21.9	7.5	87	7.8	90	21.8	7.7	88	6.6	75
Против устья р. Ухра	6	21.7	8.7	100	8.5	97	21.7	7.4	85	7.8	91
Ягорба	14	21.9	8.1	93	8.4	97	21.5	7.5	86	7.3	85
Мякса	13	22.4	8.1	94	8.5	98	21.8	7.1	82	6.8	78
Любец	11	22.3	7.8	90	8.1	95	21.6	7.4	85	7.3	84
Ваганиха	6	22.2	7.8	90	7.9	92	22.0	7.1	82	6.4	74
Устье р. Себла	16	22.2	6.1	71	6.3	72	22.0	4.7	54	4.0	46
Противье	11	23.2	7.1	84	7.1	84	23.3	6.8	81	5.8	68
Июнь 2016											
<u>Коприно*</u>	13	18.6	8.8	95	9.5	102	14.9	7.4	74	7.2	69
<u>Молога*</u>	14	18.0	9.4	100	10.0	106	13.1	5.0	48	5.5	50
<u>Наволоч</u>	9	17.8	8.8	113	10.3	109	12.5	7.4	70	7.7	72
<u>Измайлово</u>	7	17.5	9.5	100	11.2	118	10.7	7.9	71	8.1	72
<u>Средний Двор</u>	16	17.6	9.7	102	11.3	119	10.0	5.3	47	6.0	53
<u>Брейтово</u>	13	19.2	9.4	103	10.2	111	11.5	—	—	5.1	47
Каменники*	16	18.6	—	—	10.0	108	14.0	—	—	6.3	61

Примечание. Датчики: 2015 г. – YSI ProODO + YSI-85, 2016 г. – YSI-85.

Прогрев гипolimниона водохранилищ был существенно выше (на 12–14°C), чем это характерно для стратифицированных озер. С учетом того, что насыщение O<sub>2</sub> при высокой T воды ниже, а интенсивность аэробной деградации органического вещества (ОВ) (и потребление O<sub>2</sub>) выше, сильный прогрев гипolimниона указанных водохранилищ способствовал формированию придонного дефицита растворенного O<sub>2</sub>.

**Кислородный режим.** В июне 2016 г. при температуре воды 16–22°C в большинстве обследованных участков волжских водохранилищ кислородный режим был благоприятным для гидробионтов. В поверхностном слое вод Рыбинского водохранилища при вариациях абсолютного содержания O<sub>2</sub> в пелагиали 9.5–11.3 мг/л днем наблюдали перенасыщение воды от 2 до 20% (в среднем 10%), вызванное фотосинтетической активностью диатомовых водорослей (табл. 13). Ниже по Волге содер-

жание растворенного кислорода также было высоким (в среднем 7.2–9.3 мг/л), нередко (>30% станций) отмечали перенасыщение (3–30%) воды (табл. 6–11). В Горьковском и Волгоградском водохранилищах, а также на участке Волги ниже г. Волгоград средняя концентрация O<sub>2</sub> (8.7–9.3) была близка к насыщению (95–102%). В Чебоксарском, Куйбышевском и Саратовском водохранилищах вода у поверхности была недонасыщена O<sub>2</sub> в среднем на 10–22%, локально на 30–55%. Минимальное содержание кислорода у поверхности (5.4 мг/л) зарегистрировано в устьевой области р. Ветлуга (Чебоксарское водохранилище) (табл. 7).

В придонном горизонте вод Волги среднее содержание O<sub>2</sub> в июне варьировало от 5.1 мг/л (47% насыщения) в Рыбинском водохранилище до 9.0 мг/л (100%) в незарегулированном участке Волги (табл. 13). Наибольшую разницу (в среднем ~4 мг/л, максимум >5 мг/л) его концентрации между поверхностным и

придонным слоем вод регистрировали в центральной части Рыбинского водохранилища (табл. 5). Над затопленным руслом р. Молога оксиклин располагался на глубине 7–8 м, над руслом рек Шексна и Волга – на 9–11 м, он не всегда совпадал со скачком T воды. На других водохранилищах Волги содержание O<sub>2</sub> у поверхности и дна различалось в среднем на <2 мг/л, скачок отмечали на глубине 1–2 м над дном. Сравнительно низкое содержание O<sub>2</sub> у дна (4.7–5.6 мг/л, 47–58% насыщения) наблюдали редко и локально (10% обследованных станций) на русле р. Молога у с. Брейтово и в ее устье в Рыбинском водохранилище (табл. 5), в речном участке (ст. Красный Профинтерн) и южной части озерного участка (ст. Пучеж и против г. Чкаловск) Горьковского водохранилища (табл. 6), в устье р. Ветлуга в Чебоксарском водохранилище (табл. 7) и на русле Волги против устья р. Курдюм в Волгоградском водохранилище (табл. 10).

**Таблица 6.** Распределение содержания растворенного кислорода (O<sub>2</sub>) и температуры воды (T) в Горьковском водохранилище в августе 2015 и июне 2016 гг.

**Table 6.** Distribution of dissolved oxygen (O<sub>2</sub>) and water temperature (T) in the Gorky Reservoir in August 2015 and June 2016

Станция	h, м	Поверхность					Дно				
		Т, °С	О <sub>2</sub> , по Винклеру		О <sub>2</sub> , по датчику		Т, °С	О <sub>2</sub> , по Винклеру		О <sub>2</sub> , по датчику	
			мг/л	%	мг/л	%		мг/л	%	мг/л	%
Август 2015 г.											
В черте г. Рыбинск*	5	16.6	7.3	75	7.9	82	16.4	6.6	68	7.8	80
Выше г. Ярославль*	6	17.5	8.0	84	8.0	84	17.4	7.3	76	7.8	83
Ниже г. Ярославль*	4	17.7	7.8	83	8.0	84	17.7	6.9	73	7.8	83
Красный Профинтерн*	6	18.0	7.6	81	7.8	83	18.0	7.3	77	7.6	81
Против р. Сизема*	7	18.7	7.8	85	7.8	85	18.2	8.0	86	7.8	83
Костромское расширение	2	18.8	7.6	82	7.8	84	18.4	7.6	82	7.7	83
Ниже г. Кострома*	9	20.2	7.4	79	7.8	86	18.4	7.4	80	7.4	80
Волгореченск*	13	22.1	8.6	99	8.5	99	18.8	7.6	82	7.6	82
Ниже г. Плес*	16	19.3	7.6	83	8.0	88	18.5	6.1	66	6.6	71
Ниже г. Кинешма*	16	19.2	7.6	83	7.6	83	18.8	6.6	71	6.5	70
Юрьевоц*	14	18.1	7.9	84	8.5	90	17.5	6.6	69	7.4	77
Пучеж*	15	18.3	8.2	88	9.6	103	16.3	6.6	68	6.4	66
Против г. Чкаловск*	8	18.4	9.9	106	9.2	99	18.0	8.4	90	7.7	82
Июнь 2016 г.											
В черте г. Рыбинск*	5	17.9	8.4	89	9.0	95	17.8	6.8	72	8.9	93
Выше г. Ярославль*	5	18.1	8.0	85	7.6	81	18.2	8.0	85	7.9	83
Ниже г. Ярославль*	6	18.7	8.0	86	7.9	85	18.5	6.4	69	7.4	80
Красный Профинтерн*	6	18.4	7.3	79	8.1	89	18.1	7.5	80	5.0	56
Против р. Сизема*	7	18.6	7.5	81	8.4	85	17.6	6.2	66	7.8	62
Костромское расширение	3	20.7	6.8	76	7.9	88	20.5	6.7	75	7.6	85
Ниже г. Кострома*	6	18.4	9.3	98	9.4	98	17.6	8.0	84	8.0	84
Волгореченск*	14	23.8	7.8	93	8.6	101	18.0	7.8	83	8.1	88
Ниже г. Плес*	13	19.1	9.8	105	9.8	105	17.2	6.4	65	6.5	65
Ниже г. Кинешма*	15	17.9	10.2	108	10.6	111	16.2	7.2	74	7.7	79
Юрьевоц*	15	18.7	9.2	99	9.8	103	16.0	6.1	62	7.2	74
Пучеж*	13	20.1	9.5	105	9.0	98	14.6	5.9	58	5.0	49
Против г. Чкаловск*	18	20.5	9.9	111	9.3	105	12.6	5.6	53	5.6	53

Примечание. Датчик: 2015 и 2016 гг. – YSI ProODO.



В большинстве случаев такое сравнительно низкое содержание  $O_2$  зарегистрировано на участках с глубиной  $>10$  м и вызвано поглощением  $O_2$  грунтами, содержащими отложения свежего ОВ, принесенного паводковыми водами. Слой с низким содержанием  $O_2$  как правило не превышал 1–2 м над дном, только в Рыбинском водохранилище (ст. Молога) достигал 3 м.

В августе 2015 г. в диапазоне температуры воды 15–24°C на Верхней Волге и 17–22°C на Средней и Нижней Волге содержание  $O_2$  в поверхностном слое водохранилищ было обычным для этого времени года и составило в среднем 7.4–9.6 мг/л (87–111% насыщения) (табл. 13). Почти во всех водоемах отмечали участки с перенасыщением воды на 2–22% (до 60% в приплотинном участке Угличского водохранилища), вызванного фотосинтетической

активностью фитопланктона. Минимальную концентрацию (5.6–5.9 мг/л, ~65% насыщения) регистрировали локально (10% станций) в Ивановском и Угличском водохранилищах (табл. 3–4), здесь же наблюдали наибольшую разницу ( $>4$  мг/л) содержания  $O_2$  у поверхности и дна (табл. 13). Средняя концентрация  $O_2$  у дна в этих водоемах составила 2–3 мг/л, крайне низкое его содержание ( $<2$  мг/л) регистрировали в слое 1–4 м над дном на 40% станций в Ивановском водохранилище и 20% в Угличском водохранилище (табл. 14). В Волжском плесе Ивановского водохранилища верхняя граница оксиклина располагалась на глубине 7 м, в Ивановском плесе – на 10–14 м, а в устье р. Сошь поднималась до 4 м.

**Таблица 7.** Распределение содержания растворенного кислорода ( $O_2$ ) и температуры воды (Т) в Чебоксарском водохранилище в августе 2015–2016 гг. и июне 2016 г.

**Table 7.** Distribution of dissolved oxygen ( $O_2$ ) and water temperature (Т) in the Cheboksary Reservoir in August 2015–2016 and June 2016

2015 2016 and June 2016

Станция	h, м	Поверхность					Дно				
		Т, °С	О <sub>2</sub> , по Винклеру		О <sub>2</sub> , по датчику		Т, °С	О <sub>2</sub> , по Винклеру		О <sub>2</sub> , по датчику	
			мг/л	%	мг/л	%		мг/л	%	мг/л	%
Август 2015 г.											
Городец*	3	17.5	8.2	87	8.8	92	17.6	8.2	87	8.6	91
В черте г. Н-Новгород*	4	18.2	10.2	122	10.1	108	18.2	9.2	110	9.9	105
Кстово*	10	18.2	9.1	108	9.3	100	18.3	8.8	95	9.0	96
Макарьев*	9	18.0	7.9	84	8.3	88	18.0	8.0	85	7.9	84
Васильсурск*	15	18.4	7.4	80	7.7	82	18.3	6.9	74	7.2	77
Устье р. Ветлуга	5	17.1	7.9	82	8.8	92	17.1	8.0	84	8.6	89
Козьмодемьянск*	14	18.3	6.7	72	7.0	75	18.3	6.7	72	5.4	58
Ильинка*	17	18.3	8.0	86	7.8	83	17.8	7.3	77	7.4	78
Ниже г. Чебоксары*	26	18.6	8.0	87	8.3	89	17.7	7.5	79	7.5	79
Июнь 2016 г.											
Городец*	3	18.5	7.0	75	8.1	81	18.5	7.0	75	7.8	83
В черте г. Н-Новгород*	4	19.7	7.4	81	7.0	76	19.6	7.4	81	7.4	81
Кстово*	5	18.4	7.1	77	7.2	77	18.4	7.1	77	8.0	80
Макарьев*	14	18.5	7.0	75	9.1	98	18.5	7.0	75	8.9	87
Васильсурск*	10	18.5	6.6	71	7.9	83	18.9	6.2	67	6.1	67
Устье р. Ветлуга	7	18.2	6.5	77	5.4	61	18.6	6.5	70	4.7	58
Козьмодемьянск*	6	18.6	6.0	54	7.7	80	18.7	5.6	60	6.8	76
Ильинка*	17	18.5	6.4	69	8.4	91	18.4	6.5	70	7.5	81
Ниже г. Чебоксары*	24	18.2	6.5	78	8.2	88	18.4	6.5	69	7.3	79
Август 2016 г.											
Городец*	3	22.4	—	—	7.5	84	22.4	—	—	7.3	84
В черте г. Н-Новгород*	4	22.2	—	—	10.0	115	22.3	—	—	9.9	113
Юрьевоц на Оке	5	23.1	—	—	10.6	123	23.1	—	—	10.5	122
р. Ока выше Желнино	8	21.5	—	—	9.8	111	21.5	—	—	9.7	110
Кстово*	6	21.5	—	—	9.0	102	21.6	—	—	8.8	100
Макарьев*	13	22.6	—	—	9.3	107	22.3	—	—	8.0	92
Васильсурск*	14	24.2	—	—	8.3	99	23.8	—	—	6.6	78
Устье р. Ветлуга	8	23.9	—	—	9.5	107	23.7	—	—	0.8	9
Козьмодемьянск*	8	24.0	—	—	6.9	82	23.9	—	—	6.5	77
Ильинка*	16	23.7	—	—	8.6	102	23.8	—	—	8.3	98
Ниже г. Чебоксары*	24	24.3	—	—	8.1	97	24.3	—	—	8.0	95

Примечание. Датчики: 2015 и 2016 гг. – YSI ProODO.

Условия, лимитирующие развитие беспозвоночных и рыб ( $O_2 < 5$  мг/л), формировались по руслу Волги в 50% обследованных участков водохранилища, заморным был слой воды 3–5 м над дном по руслу Волги (25 км) в Ивановском плесе. В расположенном ниже по каскаду Угличском водохранилище подоб-

ная ситуация наблюдалась в 56% обследованных станций, заморный слой воды 3–5 м отмечен по руслу Волги от устья р. Хотча (ст. 14) до устья р. Нерль (25 км) и от устья р. Жабня (ниже г. Калязин) до плотины Угличской ГЭС (45 км), верхняя граница окислина располагалась на глубине 7–10 м.

**Таблица 8.** Распределение содержания растворенного кислорода ( $O_2$ ) и температуры воды (Т) в Куйбышевском водохранилище в августе 2015–2016 гг. и июне 2016 г.

**Table 8.** Distribution of dissolved oxygen ( $O_2$ ) and water temperature (Т) in the Kuibyshev Reservoir in August 2015–2016 and June 2016

2015 2016 and June 2016

Станция	h, м	Поверхность						Дно			
		T, °C	O <sub>2</sub> , по Винклеру		O <sub>2</sub> , по датчику		T, °C	O <sub>2</sub> , по Винклеру		O <sub>2</sub> , по датчику	
			мг/л	%	мг/л	%		мг/л	%	мг/л	%
Август 2015 г.											
Ниже г. Новочебоксарск*	9	18.0	7.6	81	7.7	82	17.9	6.9	74	7.9	84
Ниже г. Звенигово*	9	17.9	7.6	81	7.8	82	18.0	7.3	78	8.0	85
Ниже г. Свияжск*	10	21.1	7.6	86	7.9	90	18.4	6.9	74	7.4	80
Шеланга*	16	18.4	8.6	92	8.2	88	17.9	7.9	84	7.7	82
Камское устье*	22	17.9	7.9	84	8.2	87	17.9	7.8	83	7.7	81
Атабаево**	21	17.3	7.6	80	8.2	86	17.1	7.6	79	1.6	17
Тетюши*	24	18.2	7.5	90	8.1	86	17.4	7.3	76	8.0	83
Ундоры*	19	19.0	7.6	82	7.6	82	18.5	6.9	74	7.0	76
Кременки*	22	19.2	7.6	83	8.4	92	18.0	7.9	84	7.9	84
Ниже г. Новоульяновск*	28	18.5	8.2	89	8.2	88	18.5	–	–	7.3	79
Против р. Большой Черемшан*	28	19.0	7.6	83	8.1	88	18.6	–	–	7.1	77
Против р. Уса*	26	20.3	10.2	113	10.9	122	18.8	–	–	7.3	79
В черте г. Тольятти*	28	20.7	9.0	100	9.4	95	19.1	–	–	6.9	75
Июнь 2016 г.											
Ниже г. Новочебоксарск*	9	18.3	6.6	70	8.4	90	18.5	6.3	68	7.6	82
Ниже г. Звенигово*	9	18.5	6.5	70	8.8	96	18.4	6.4	69	8.0	85
Ниже г. Свияжск*	10	18.2	6.8	72	8.5	89	18.3	6.8	73	7.0	75
Шеланга*	15	18.1	6.6	70	8.8	92	18.2	6.5	77	7.7	72
Камское устье*	16	17.6	6.5	69	8.6	88	18.1	6.2	66	7.3	77
Атабаево**	15	17.4	7.8	82	8.4	89	17.6	8.1	85	9.3	98
Тетюши*	28	17.6	8.0	84	9.7	103	17.8	7.4	78	9.1	96
Ундоры*	18	18.1	8.0	85	9.2	97	17.6	7.6	80	8.8	95
Кременки*	11	17.8	7.6	81	9.3	98	17.4	7.5	79	9.2	96
Ниже г. Новоульяновск*	18	17.5	8.1	85	9.8	102	16.7	7.8	81	9.3	97
Против р. Большой Черемшан*	14	16.3	7.9	81	9.9	102	16.4	7.8	79	7.7	79
Против р. Уса*	19	16.4	8.2	84	8.5	87	16.1	8.3	84	7.5	77
В черте г. Тольятти*	26	16.5	9.1	93	9.2	93	15.0	8.5	85	7.4	74
Август 2016 г.											
Ниже г. Новочебоксарск*	9	24.3	–	–	7.8	93	24.4	–	–	7.6	90
Ниже г. Звенигово*	11	24.4	–	–	8.1	97	24.4	–	–	7.8	94
Ниже г. Свияжск*	17	24.4	–	–	9.7	117	24.2	–	–	7.4	88
Шеланга*	14	24.4	–	–	9.0	109	24.5	–	–	8.7	105
Камское устье*	16	24.9	–	–	10.4	125	24.6	–	–	8.3	100
Атабаево**	15	24.8	–	–	10.7	130	24.4	–	–	7.6	91
Балахчино**	14	24.6	–	–	8.8	106	24.4	–	–	5.7	68
Рыбная слобода**	9	25.1	–	–	9.1	110	24.7	–	–	7.2	87
Чистополь**	12	25.5	–	–	10.2	124	25.3	–	–	9.6	117
Грахань**	23	25.0	–	–	9.7	117	25.0	–	–	9.6	116
Ниже г. Елабуга**	11	25.4	–	–	9.2	122	24.9	–	–	8.3	101

Примечание. Датчики: 2015 и 2016 гг. – YSI ProODO.

Недостаток  $O_2$  регистрировали только на глубоководных участках (глубина >8 м) по руслу Волги и в устьевых областях крупных прито-

ков (табл. 3–4), в мелководных (глубина ~2 м) заливах, несмотря на высокую Т воды (от 22 до >31°С вблизи выпуска теплых вод ГРЭС)

содержание  $O_2$  у дна было высоким (7.9–8.6 мг/л) и почти не отличалось от измеренного у поверхности воды (разница <0.5 мг/л).

Ниже по Волге от г. Углич до плотины Саратовской ГЭС (г. Балаково) в конце августа 2015 г. содержание  $O_2$  в придонном горизонте вод чаще всего превышало 6 мг/л (в среднем 7.2–7.9 мг/л, 75–85% насыщения) и не представляло опасности для гидробионтов (табл. 13, 15 и 16). Более низкие значения отмечены единично на границе вода/грунт в Чебоксарском водохранилище на русле Волги у г. Козьмодемьянск) и в Куйбышевском водохранилище на русле Камы вблизи прежнего ее устья напротив с. Атабаево (табл. 7, 8).

В августе 2016 г. более высокая Т воды по сравнению с предыдущим годом (разница до 6°C) способствовала усилению заморных явлений в водохранилищах Верхней Волги,

тогда как в Волге ниже плотины Рыбинской ГЭС дефицит  $O_2$  в придонном слое воды был незначительным (<25% насыщения) либо отсутствовал. Только в устьевой области р. Ветлуга (Чебоксарское водохранилище) отмечали низкое содержание  $O_2$  на границе вода/грунт, значения <5 мг/л регистрировали здесь и в июне этого года.

В Рыбинском водохранилище на 10% станций в слое воды 4–5 м над дном отмечена концентрация  $O_2$  <2 мг/л и на 30% станций – <5 мг/л в слое до 8 м над дном, тогда как в предыдущем году дефицит  $O_2$  в водоеме не регистрировали (табл. 15). Недостаток кислорода для гидробионтов наблюдали преимущественно по руслу Волги в Волжском плесе, где большой участок (>35 км) был заморным от устья р. Юхоть (г. Мышкин) до с. Коприно, а также в устьевой области р. Сить в Главном плесе водохранилища (табл. 5).

**Таблица 9.** Распределение содержания растворенного кислорода ( $O_2$ ) и температуры воды (Т) в Саратовском водохранилище в августе 2015 и июне 2016 гг.

**Table 9.** Distribution of dissolved oxygen ( $O_2$ ) and water temperature (Т) in the Saratov Reservoir in August 2015 and June 2016

Август 2016 г.

Станция	h, м	Поверхность						Дно			
		Т, °С	O <sub>2</sub> , по Винклеру		O <sub>2</sub> , по датчику		Т, °С	O <sub>2</sub> , по Винклеру		O <sub>2</sub> , по датчику	
			мг/л	%	мг/л	%		мг/л	%	мг/л	%
Август 2015 г.											
Нижний бьеф Жигулевской ГЭС*	8	19.2	7.4	81	8.0	87	19.4	7.6	83	8.2	88
Ширяево*	12	19.8	7.3	80	7.8	86	19.7	—	—	8.0	88
Ермаково*	23	19.6	6.8	75	7.4	81	19.8	—	—	7.5	83
Выше г. Сызрань*	15	19.0	7.6	82	7.4	80	19.2	—	—	7.7	83
Разлив у п. Приволжье*	12	18.7	7.9	85	8.0	87	19.0	8.0	87	8.1	88
Выше г. Хвалынск*	20	18.6	8.2	89	8.3	90	18.8	7.6	82	7.7	83
В черте г. Балаково*	23	18.8	7.9	86	8.1	88	18.8	7.9	86	8.2	89
Июнь 2016 г.											
Нижний бьеф Жигулевской ГЭС*	8	16.4	8.3	85	8.1	83	16.0	—	—	8.6	88
Ширяево*	12	16.4	8.6	89	8.2	84	—	—	—	—	—
Ермаково*	14	18.2	8.7	89	9.2	97	16.8	—	—	9.0	89
Ниже г. Сызрань*	12	18.2	8.7	93	8.9	95	17.0	8.2	85	8.3	86
Разлив у п. Приволжье*	17	17.7	7.8	82	8.4	86	17.0	7.8	81	7.5	89
Выше г. Хвалынск*	15	17.4	8.5	88	8.5	88	16.7	8.6	89	8.1	84
Против устья р. Малый Иргиз*	16	19.9	8.1	90	9.6	103	16.4	7.4	77	7.9	80
В черте г. Балаково*	25	19.5	9.0	99	9.3	99	16.5	8.1	84	8.0	82

Примечание. Датчики: 2015 г. и 2016 г. – YSI ProODO.

Верхняя граница оксиклина зафиксирована на глубине 5–7 м, на некоторых участках Волжского плеса (ст. Мышкин, Коприно) вертикальное расслоение толщи воды по содержанию  $O_2$  не отмечено. Его концентрация была сравнительно низкой (6.1–6.7 мг/л) уже в верхнем метровом слое воды и постепенно снижалась с глубиной: на глубине 4 м у г. Мышкин и 10 м у с. Коприно – <5 мг/л.

В августе 2016 г. сильный дефицит  $O_2$  отмечен в Ивановском и Угличском водохранилищах. Здесь встречаемость низких концентраций (<2 мг/л) в придонном слое вод возросла на 15–50% относительно тех же сроков 2015 г. и составила 55–70% станций (табл. 14). Опасное для гидробионтов содержание  $O_2$  (<5 мг/л) зарегистрировано в 90% точек отбора проб в обоих водоемах в слое от 2 до 9 м над

**Таблица 10.** Распределение содержания растворенного кислорода ( $O_2$ ) и температуры воды (Т) в Волгоградском водохранилище в июне 2016 г.

**Table 10.** Distribution of dissolved oxygen ( $O_2$ ) and water temperature (Т) in the Volgograd Reservoir in June 2016

Станция	h, м	Поверхность					Дно				
		Т, °С	$O_2$		$O_2$		Т, °С	$O_2$		$O_2$	
			по Винклеру	по датчику	по Винклеру	по датчику		по Винклеру	по датчику	по Винклеру	по датчику
			мг/л	%	мг/л	%		мг/л	%	мг/л	%
Нижний бьеф Саратовской ГЭС*	17	17.5	8.2	86	8.7	91	17.5	—	—	8.5	93
Против устья р. Большой Иргиз*	14	18.3	8.6	92	8.2	89	17.5	8.7	91	8.5	89
Ниже п. Маркс*	6	17.7	8.6	91	8.6	90	17.6	8.4	88	8.4	88
Против устья р. Курдюм*	10	19.1	8.5	92	8.6	94	18.3	6.7	72	5.4	58
Ниже г. Саратов*	18	18.1	8.3	88	8.2	87	17.7	8.3	88	8.3	88
Ровное*	18	19.1	8.7	95	8.6	93	17.5	7.8	82	7.1	75
Против устья р. Еруслан*	11	20.5	8.7	97	9.6	107	17.8	8.2	87	7.8	84
Выше г. Камышин*	20	20.1	9.0	100	10.6	118	18.0	7.3	78	7.8	83
Горный Балыклей*	15	19.4	8.5	93	9.3	102	17.7	7.9	83	7.8	83
Верхний бьеф Волжской ГЭС*	17	19.8	12.0	132	12.1	132	16.3	8.1	83	7.4	75

Примечание. Датчик – YSI ProODO.

**Таблица 11.** Распределение содержания растворенного кислорода ( $O_2$ ) и температуры воды (Т) в незарегулированном участке Волги от г. Волгоград до г. Астрахань в июне 2016 г.

**Table 11.** Distribution of dissolved oxygen ( $O_2$ ) and water temperature (Т) in the unregulated part of the Volga River from the city of Volgograd to the city of Astrakhan in June 2016

Станция	h, м	Поверхность					Дно				
		Т, °С	$O_2$		$O_2$		Т, °С	$O_2$		$O_2$	
			по Винклеру	по датчику	по Винклеру	по датчику		по Винклеру	по датчику	по Винклеру	по датчику
			мг/л	%	мг/л	%		мг/л	%	мг/л	%
В черте г. Волгоград*	10	17.5	8.1	85	9.4	98	17.2	8.1	85	9.2	95
Светлый Яр*	11	17.7	8.7	92	9.9	104	17.7	—	—	9.9	104
Райгород*	7	17.9	8.4	89	10.2	108	—	—	—	—	—
Каменный Яр*	7	17.8	8.4	89	9.6	101	—	—	—	—	—
Черный Яр*	11	19.0	9.6	105	10.5	114	—	—	—	—	—
Соленое займище*	12	19.3	9.6	104	10.5	115	—	—	—	—	—
Ветлянка*	13	20.7	10.4	117	11.8	125	20.4	—	—	11.2	124
Сероглазка*	9	20.5	9.3	104	9.6	106	20.5	—	—	9.1	103
Замьяны*	7	21.2	9.0	102	9.2	103	21.0	—	—	8.9	91
Вернелебяжье*	15	22.4	8.9	103	8.9	103	21.1	—	—	8.5	95
р. Бузан	9	21.5	—	—	8.9	102	21.1	—	—	9.0	102
Тулугановка*	10	21.1	8.2	93	9.0	102	21.2	—	—	8.9	101
В черте г. Астрахань*	4	21.5	—	—	8.5	98	21.2	—	—	8.6	98
Ниже г. Астрахань*	7	21.6	—	—	8.4	97	21.3	—	—	8.4	95

Примечание. Датчик: – YSI ProODO.

дном. Фактически заморным было все русло Волги (>215 км) от д. Липня (Волжский плес Иваньковского водохранилища) до плотины Угличской ГЭС. Этим летом низкое содержание  $O_2$  (4.0–4.6 мг/л, <55% насыщения) наблюдали не только на глубоководных участках, но и в мелководных заливах (Шошинский плес Иваньковского водохранилища), начиная с глубины 2 м. Разница по уровню  $O_2$  между поверхностью воды и придонным горизонтом варьировала от 0.5 до >7 мг/л, по руслу Волги оксиклин располагался на глубине 3–12 м в Иваньковском водохранилище и 2–6 м в Угличском. Глубина расположения верхней гра-

ницы оксиклина возрастала от верховьев водоемов к плотинам ГЭС, в ряде участков не выявлено четкого вертикального расслоения воды по уровню  $O_2$ , его концентрация плавно снижалась от поверхности ко дну.

В верховье обоих водохранилищ (ст. Гордня, Дубна и Кимры) крайне низкое содержание  $O_2$  в августе 2016 г. отмечено не только в придонном горизонте, но и у поверхности воды (табл. 3–4). Это, вероятно, вызвано поступлением органического загрязнения от населенных пунктов и выносом к поверхности обедненных  $O_2$  глубинных вод при перемешивании, а также сбросом вод с низким содержа-

нием  $O_2$  из Иваньковского водохранилища в Угличское через плотину ГЭС у г. Дубна. Сбросом вод с малым содержанием  $O_2$  из Угличского водохранилища объясняется его низкий уровень (5.9–7.4 мг/л у поверхности) в Волжском плесе Рыбинского водохранилища.

Среднее содержание  $O_2$  в поверхностном слое водохранилищ Верхней Волги варьировало от 6.5 мг/л (~80% насыщения) в Иваньковском и Угличском водохранилищах до 7.7 мг/л (90% насыщения) в Рыбинском водохранилище, что на 1–3 мг/л ниже по сравнению с 2015 г.

**Таблица 12.** Распределение содержания растворенного кислорода ( $O_2$ ) и температуры воды (Т) в водохранилищах Камы в августе 2016 г.

**Table 12.** Distribution of dissolved oxygen ( $O_2$ ) and water temperature (Т) in the Reservoirs of the Kama River in August 2016

Станция	h, м	Поверхность			Дно		
		Т,°С	О <sub>2</sub> , по датчику		Т,°С	О <sub>2</sub> , по датчику	
			мг/л	%		мг/л	%
Камское водохранилище							
Выше г. Березники**	10	24.0	11.1	132	23.4	0.7	<1
Против устья р. Кондас**	16	24.4	10.5	126	23.7	8.1	95
Ниже устья рек Иньва и Косьва**	13	24.3	10.6	125	23.2	2.6	30
Против устья р. Обва**	17	23.8	10.0	118	21.2	0.7	8
Добрянка**	21	24.6	11.5	138	18.8	0.6	6
Выше г. Пермь**	13	24.8	11.1	134	21.8	1.1	22
Воткинское водохранилище							
В черте г. Краснокамск**	8	24.4	8.4	100	23.8	7.5	89
Против устья р. Нытва**	11	23.5	8.6	100	22.8	6.7	88
Ниже г. Оханск**	11	23.4	9.2	108	23.6	8.9	105
Оса**	11	25.4	12.3	138	23.3	6.7	78
Елово**	22	25.2	13.3	161	19.9	0.6	7
Воткинск**	21	24.4	10.5	126	20.8	0.6	7
Выше г. Чайковский**	22	25.3	13.7	166	20.0	1.0	10
Нижнекамское водохранилище							
Ниже устья р. Сива**	4	24.6	10.4	125	24.6	10.3	124
Ниже г. Сарапул**	5	24.6	11.0	132	24.5	11.0	131
Вятское**	9	23.7	8.2	97	23.5	7.9	93
Против устья р. Белая**	11	23.3	8.2	96	23.4	7.9	93
Икское устье**	17	25.8	13.8	170	24.4	7.4	88
В черте г. Набережные Челны**	17	25.2	9.2	112	24.8	8.7	105

Примечание. Датчик: – YSI ProODO, расположение станций приведено вниз по течению реки.

**Таблица 13.** Содержание растворенного кислорода ( $O_2$ ), температура (Т) и pH воды в водохранилищах Волги и Камы в 2015–2016 гг.

**Table 13.** Dissolved oxygen ( $O_2$ ), water temperature (Т) and pH in the Volga and Kama River Reservoirs in 2015–2016

Водохранилище	Сроки	pH	Поверхность			Дно		
			Т, °С	О <sub>2</sub> ,		Т, °С	О <sub>2</sub> ,	
				мг/л	%		мг/л	%
Иваньковское	Август 2015	–	22.6±0.9	7.4±0.2	87±3	20.2±2.0	3.0±0.9	37±10
			21.9–31.0	5.6–8.9	64–102	19.7–31.4	0–8.6	0–117
	Август 2016	8.1±0.1 7.6–8.9	23.9±0.2	6.5±0.6	79±8	20.8±2.0	2.2±0.7	27±9
Угличское	Август 2015	–	23.1–24.6	4.7–11.8	43–143	19.5–32.8	0–6.3	0–85
			21.8±0.4	9.6±0.8	111±10	20.1±0.4	4.7±0.9	53±11
	Август 2016	8.2±0.1 7.8–8.7	19.5–23.7	5.9–13.8	65–161	18.8–21.6	0.3–9.6	4–109
Рыбинское	Август 2015	–	24.4±0.3	6.5±0.7	79±8	22.4±0.3	2.1±0.5	23±6
			23.3–25.5	3.8–9.3	44–106	21.3–23.5	0.1–4.4	1–51
	Август 2016	8.2±0.1 7.7–8.6	17.0±0.7	8.5±0.2	88±3	16.6±0.6	7.7±0.3	80±3
Горьковское	Август 2015	–	15.3–22.3	7.3–9.6	75–107	14.0–20.7	6.4–9.0	67–100
			22.6±0.2	7.7±0.2	90±2	21.9±0.2	5.9±0.5	69±5
	Июнь 2016	–	21.5–23.9	5.9–9.0	69–105	20.0–23.3	0–7.8	0–91
	Август 2015	7.9±0.1 7.6–8.1	18.2±0.2	10.4±0.2	110±2	12.4±0.7	6.6±0.4	61±4
			17.5–19.2	9.5–11.3	102–119	10.0–14.9	5.1–8.1	47–72
	Август 2016	–	18.6±0.4	8.1±0.2	87±2	17.9±0.2	7.3±0.2	78±2
	Август 2015	–	16.6–22.1	7.3–9.9	75–106	16.3–18.8	6.1–8.4	66–90
			17.9±0.2	8.1±0.2	87±2	17.9±0.2	7.3±0.2	78±2
	Август 2016	–	16.6–22.1	7.3–9.9	75–106	16.3–18.8	6.1–8.4	66–90

Чебоксарское	Июнь 2016	<u>8.0±0.2</u> 7.5–8.8	<u>19.3±0.5</u> 17.9–23.8	<u>8.7±0.3</u> 6.8–9.6	<u>95±3</u> 76–111	<u>17.1±0.5</u> 12.6–20.5	<u>7.0±0.3</u> 5.0–8.9	<u>72±4</u> 49–93
	Август 2015	–	<u>18.0±0.2</u> 17.1–18.6	<u>8.3±0.3</u> 6.7–10.2	<u>90±5</u> 72–122	<u>17.9±0.1</u> 17.1–18.3	<u>7.9±0.4</u> 5.4–9.9	<u>85±4</u> 58–110
	Август 2016	<u>8.1±0.1</u> 7.7–8.6	<u>23.0±0.3</u> 21.5–24.3	<u>8.9±0.3</u> 6.9–9.6	<u>103±4</u> 82–123	<u>23.0±0.3</u> 21.5–24.3	<u>7.7±0.8</u> 0.8–10.5	<u>89±9</u> 9–122
Куйбышевское	Июнь 2016	<u>7.9±0.1</u> 7.5–8.2	<u>18.6±0.1</u> 18.2–19.7	<u>7.2±0.4</u> 5.4–9.1	<u>78±3</u> 54–98	<u>18.7±0.1</u> 18.4–19.6	<u>6.9±0.4</u> 4.7–8.9	<u>75±3</u> 58–87
	Август 2015	–	<u>18.9±0.3</u> 17.3–21.1	<u>8.2±0.2</u> 7.5–10.9	<u>89±3</u> 80–122	<u>18.2±0.2</u> 17.1–19.1	<u>7.2±0.5</u> 1.6–8.0	<u>77±5</u> 17–85
	Август 2016	<u>8.3±0.2</u> 8.0–8.6	<u>24.8±0.1</u> 24.3–25.5	<u>9.3±0.3</u> 7.8–10.7	<u>114±4</u> 93–130	<u>24.6±0.1</u> 24.2–25.3	<u>8.0±0.3</u> 5.7–9.6	<u>96±4</u> 68–117
Саратовское	Июнь 2016	<u>8.1±0.2</u> 7.8–8.4	<u>17.6±0.2</u> 16.3–18.5	<u>8.3±0.2</u> 6.5–9.9	<u>87±2</u> 69–103	<u>17.4±0.3</u> 15.0–18.5	<u>7.7±0.2</u> 6.2–9.3	<u>81±3</u> 66–98
	Август 2015	–	<u>19.1±0.2</u> 18.6–19.8	<u>7.7±0.2</u> 6.8–8.3	<u>85±2</u> 75–90	<u>19.2±0.2</u> 18.8–19.8	<u>7.8±0.1</u> 7.5–8.2	<u>85±1</u> 82–89
	Июнь 2016	<u>8.2±0.1</u> 8.0–8.3	<u>18.0±0.5</u> 16.4–19.9	<u>8.6±0.2</u> 7.8–9.6	<u>90±3</u> 82–103	<u>16.6±0.1</u> 16.0–17.0	<u>8.1±0.2</u> 7.4–9.0	<u>84±2</u> 77–89
Волгоградское	Июнь 2016	<u>8.2±0.2</u> 8.0–9.0	<u>19.0±0.3</u> 17.5–20.5	<u>9.1±0.4</u> 8.2–12.1	<u>99±5</u> 86–132	<u>17.6±0.2</u> 16.3–18.3	<u>7.8±0.3</u> 5.4–8.7	<u>83±3</u> 58–93
	Июнь 2016	<u>8.3±0.1</u> 8.1–8.6	<u>20.0±0.5</u> 17.5–22.4	<u>9.3±0.2</u> 8.1–10.8	<u>102±3</u> 85–125	<u>20.3±0.5</u> 17.2–21.3	<u>9.0±0.3</u> 8.1–11.2	<u>100±3</u> 85–124
Незарегулированная Волга	Июнь 2016	<u>8.3±0.1</u> 8.1–8.6	<u>20.0±0.5</u> 17.5–22.4	<u>9.3±0.2</u> 8.1–10.8	<u>102±3</u> 85–125	<u>20.3±0.5</u> 17.2–21.3	<u>9.0±0.3</u> 8.1–11.2	<u>100±3</u> 85–124
Камское	Август 2016	<u>8.3±0.2</u> 7.9–8.7	<u>24.3±0.2</u> 23.8–24.8	<u>10.8±0.2</u> 10.0–11.5	<u>129±3</u> 118–138	<u>22.0±0.8</u> 18.8–23.7	<u>2.3±1.0</u> 0.6–8.1	<u>32±16</u> 6–95
Воткинское	Август 2016	<u>8.2±0.1</u> 7.8–8.5	<u>24.5±0.3</u> 23.4–25.4	<u>10.9±0.8</u> 8.4–13.7	<u>128±10</u> 100–166	<u>22.0±0.7</u> 19.9–23.8	<u>4.6±1.3</u> 0.6–8.9	<u>55±17</u> 7–105
Нижнекамское	Август 2016	<u>8.2±0.1</u> 7.6–8.6	<u>24.5±0.4</u> 23.3–25.8	<u>10.1±0.9</u> 8.2–13.8	<u>122±11</u> 96–170	<u>24.2±0.2</u> 23.4–24.8	<u>8.9±0.6</u> 7.4–11.0	<u>106±7</u> 88–131

Примечание. Над чертой – среднее с его ошибкой, под чертой минимум и максимум.

**Таблица 14.** Встречаемость дефицита  $O_2$ , мощность слоя над дном с его дефицитом и термическая структура вод в Ивановском и Угличском водохранилищах в августе 2012–2016 гг.

**Table 14.** The occurrence of  $O_2$  deficiency, the thickness of the layer above the bottom with its deficit and thermal water structure in the Ivankovo and Uglich Reservoirs in August 2012–2016

Показатель	Годы	Водохранилище								
		Иваньковское					Угличское			
		2012	2013	2014	2015	2016	2012	2013	2014	2015
$O_2 < 5$ мг/л, % станций		40	90	35	50	90	45	80	80	56
$O_2 < 2$ мг/л, % станций		40	30	0	40	55	20	0	30	20
Слой над дном с $O_2 < 5$ мг/л, м		2–6	1–11	1–8	1–5	2–9	2–3	1–9	1–11	3–5
Слой над дном с $O_2 < 2$ мг/л, м		1–4	1–5	нет	1–4	1–8	1–2	нет	1–2	1–4
Средняя Т воды у поверхности, °С		23.3	23.5	21.4	22.6	23.9	23.0	22.5	21.4	21.8
Средняя Т воды у дна, °С		21.9	19.9	20.6	20.2	20.8	21.8	21.3	20.4	20.1
Сроки наблюдения, декада VIII		1	2	3	2	1	1	2	3	2

**Таблица 15.** Встречаемость дефицита  $O_2$ , мощность слоя над дном с его дефицитом и термическая структура вод в Рыбинском водохранилище в августе 2007–2016 гг.

**Table 15.** The occurrence of  $O_2$  deficiency, the thickness of the layer above the bottom with its deficit and thermal water structure in the Rybinsk Reservoir in August 2007–2016

Показатель	Годы							
	2007	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
$O_2 < 5$ мг/л, % станций	25	70	6	60	10	0	30	
$O_2 < 2$ мг/л, % станций	0	65	0	10	0	0	10	
Слой над дном с $O_2 < 5$ мг/л, м	~1	1–2	2	1–7	~1	нет	1–8	
Слой над дном с $O_2 < 2$ мг/л, м	нет	~1	нет	1–2	нет	нет	4–5	
Средняя Т воды у поверхности*, °С	23.2	21.6	21.0	20.6	20.2	17.0	22.6	
Средняя Т воды у дна*, °С	21.1	20.6	20.8	19.3	18.5	16.6	21.9	
Средняя Т воды VII–VIII**, °С	21.1	22.1	20.4	20.7	20.5	19.1	21.6	
Сроки наблюдения, декада и месяц	2 VIII	1 VIII	2 VII	2 VIII	1 VII	2 VIII	1 VIII	

Примечание. \* – температура в сроки наблюдений, \*\* – температура поверхности воды в период наибольшего прогрева по данным регулярных наблюдений на стандартных станциях в Главном плесе водохранилища.

Недонасыщение  $O_2$  поверхностного слоя вод в дневное время достигало 30% в Рыбинском и 55% в Ивановском и Угличском водохранилищах, несмотря на интенсивное “цветение” воды цианобактериями. Перенасыщение воды  $O_2$  (106–143%) в двух последних водоемах отмечали только в мелководных заливах и устьевой области крупных притоков (8–30% станций) (табл. 3–4), в Рыбинском водохранилище – в нижней части Волжского и западной части Главного плесов (15% станций) (табл. 5).

В водохранилищах Средней Волги в августе 2016 г. уровень  $O_2$  у поверхности воды был высоким: он варьировал в пределах 6.9–10.7 мг/л (в среднем ~9 мг/л, ~108% насыщения), что немного ниже (на <1 мг/л) по сравнению с предыдущим годом и близко к содержанию в июне (табл. 13). Значения <7 мг/л (~80% насыщения) зарегистрированы единично в озерной части Чебоксарского водохранилища (табл. 7). В большинстве участков Чебоксарского (>60% станций) и Куйбышевского (>80% станций) водохранилищ в дневное время наблюдали перенасыщение  $O_2$  поверхностного слоя вод на 6–30%, вызванное интенсивным фотосинтезом при массовом развитии фитопланктона (преимущественно цианобактерий) (табл. 7–8).

Высокое содержание  $O_2$  наблюдали в поверхностном слое вод Камских водохранилищ (табл. 13). Перенасыщение воды  $O_2$

**Таблица 16.** Встречаемость дефицита  $O_2$  и мощность слоя над дном (м) с его дефицитом в водохранилищах Средней и Нижней Волги в августе 2015–2016 гг.

**Table 16.** The occurrence of  $O_2$  deficiency and the thickness of the layer above the bottom with its deficit in the Middle and Lower Volga River Reservoirs in August 2015–2016

Показатель	Водохранилище						
	2015 г.				2016 г.		
	Г	Ч	К	С	Г	Ч	К
$O_2 < 5$ мг/л, % станций	0	0	8	0	–	0	0
$O_2 < 2$ мг/л, % станций	0	0	8	0	–	0	0
Слой над дном с $O_2 < 5$ мг/л, м	нет	нет	~1	нет	–	нет	нет
Слой над дном с $O_2 < 2$ мг/л, м	нет	нет	~1	нет	–	нет	нет

Примечание. Водохранилища: Г – Горьковское, Ч – Чебоксарское, К – Куйбышевское, С – Саратовское, прочерк – данные отсутствуют.

Во время экспедиции в обоих водохранилищах визуально наблюдали массовую гибель молоди и взрослых рыб (в основном судака), а также донных ракообразных (амфипод). В прибойной полосе количество мертвых особей судака достигало 500 экз. на погонный метр, а амфипод – 9 тыс. экз./м<sup>2</sup>. Это указывает на недавнее возникновение заморов или их редкость в многолетнем аспекте, иначе чувствительные к недостатку кислорода ракообразные в этих водоемах исчезли бы.

Вертикальное распределение  $O_2$  в приплотинных участках водохранилищ с глуби-

регистрировали по всей пелагиали Камского водохранилища, на >70% станций в Воткинском и в Нижнекамском водохранилищах (табл. 12). В придонном слое Нижнекамского водохранилища содержание  $O_2$  (в среднем 8.9 мг/л) было близко к таковому в водоемах Средней Волги, участков с концентрацией  $O_2 < 5$  мг/л не обнаружено (табл. 17). Два глубоководных водохранилища (глубина по руслу Камы 10–22 м), расположенных выше по каскаду, отличались большим дефицитом кислорода, средняя его концентрация у дна составила 2.3 мг/л в Камском и 4.6 мг/л в Воткинском водохранилищах, что сравнимо с водоемами Верхней Волги. Верхнюю границу оксиклина отмечали на глубине 4–8 м в приплотинном участке Камского водохранилища и на 10–14 м в нижнем участке Воткинского. Уровень  $O_2 < 2$  мг/л наблюдали в слое 1–5 м на 30% станций в Воткинском водохранилище и в слое 2–15 м на 70% станций в Камском, <5 мг/л – в слое 2–18 м на 40 и 80% станций соответственно (табл. 17). Фактически заморным было все русло Камы (~200 км) от г. Березники до плотины Камской ГЭС (г. Пермь), исключая участок в устье р. Кондас. также заморной была устьевая область р. Чусовая. Заморы отмечены и в значительной части (>70 км) русла Камы в пределах Воткинского водохранилища от с. Елово до плотины Воткинской ГЭС (г. Чайковский).

нами от 16 до 24 м существенно различалось от водоема к водоему и от года к году (рис. 5). Ближе всего к поверхности (глубина 7 м) оксиклин располагался в Угличском водохранилище (ст. 20) летом 2016 г., гипolimнион на этом участке был полностью анаэробным (рис. 5 б). Годом ранее здесь снижение концентрации  $O_2 < 5$  мг/л отмечали только в придонном слое (глубина 18 м) (рис. 5 а). Вблизи плотины ГЭС в Ивановском водохранилище (ст. 11) верхняя граница оксиклина в оба года находилась почти на одинаковой глубине 12–13 м, но слой скачка был сильнее выражен в 2015 г. В

августе 2016 г. вертикальный профиль  $O_2$  в Воткинском водохранилище (ст. 125) был сходен с таковым в Ивановском, но слой скачка был заглублен до 15 м (рис. 5 в). На русле Камы в Камском водохранилище (ст. 132) быстрое снижение содержания  $O_2$  ( $<5$  мг/л на глубине 7 м) наблюдалось выше термоклина в эпилимнионе, четко выраженный слой скачка располагался на глубине 10 м, весь гипolimнион был анаэробным, как и в Угличском водохранилище.

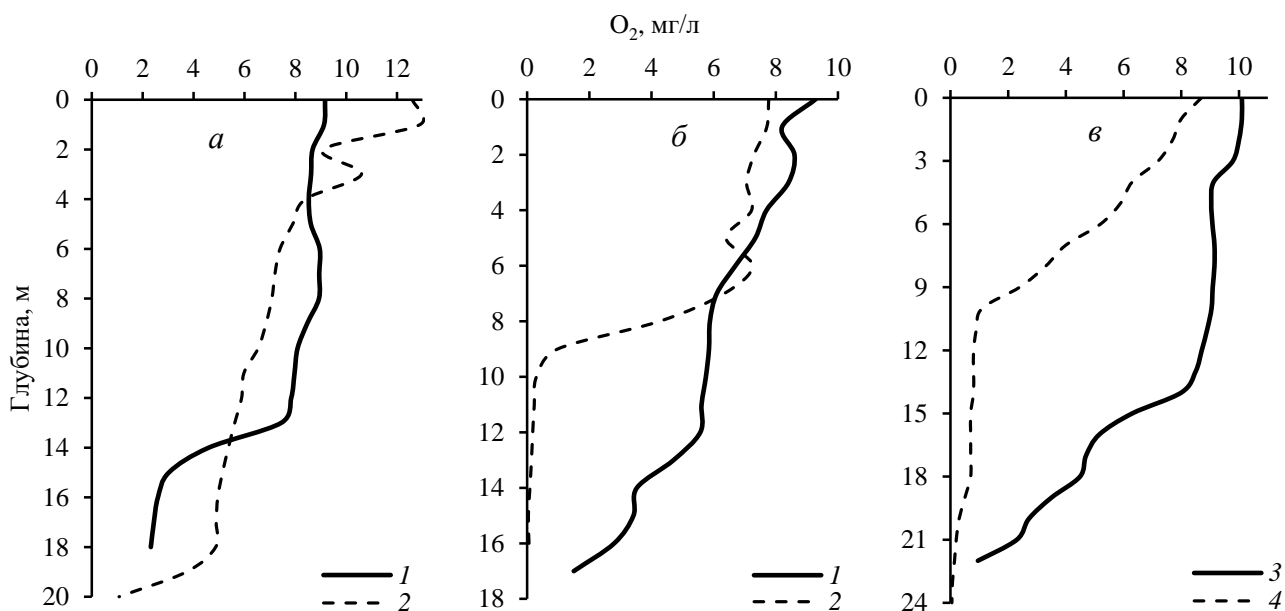
Многолетние (2007–2016 гг.) наблюдения на водоемах Верхней Волги свидетельствуют о том, что придонный недостаток растворенного  $O_2$  наблюдается ежегодно на значительной части акватории Ивановского и Угличского водохранилищ, а также sporadически в Рыбинском. Максимум встречаемости сильного дефицита  $O_2$  и наибольший слой с его низким содержанием ( $<5$  мг/л) в Ивановском

водохранилище наблюдался в 2013 и 2016 гг., в Угличском – в 2013–2014 и 2016 гг., а в Рыбинском в 2011, 2013 и 2016 гг. (табл. 14–15). Чаще всего максимальный дефицит  $O_2$  отмечали при наибольшем прогреве поверхности воды и разнице температуры между поверхностью и дном 1–3°C в сроки наблюдений. Например, во всех трех водоемах подобную ситуацию наблюдали в первой декаде августа 2016 г. и второй декаде этого месяца в 2013 г. В конце третьей декады августа 2014 г. отмечено “сползание” зоны с наибольшим дефицитом  $O_2$  из Ивановского водохранилища в лежащее ниже по каскаду Угличское при фактически одинаково умеренном прогреве водоемов. Можно предположить, что в начале месяца недостаток  $O_2$  был сильным в обоих водоемах, этот год отличался сравнительно высокой  $T$  воды в среднем за май–октябрь (рис. 2), сравнимой с таковой в 2016 г.

**Table 17.** The occurrence of  $O_2$  deficiency and the thickness of the layer above the bottom with its deficit in the Kama River Reservoirs in August 2016

Показатель	Водохранилище		
	Н	В	Ка
$O_2 < 5$ мг/л, % станций	0	40	80
$O_2 < 2$ мг/л, % станций	0	30	70
Слой над дном с $O_2 < 5$ мг/л, м	нет	3–10	2–18
Слой над дном с $O_2 < 2$ мг/л, м	нет	1–5	2–15

Примечание. Водохранилища: Н – Нижнекамское, В – Воткинское, Ка – Камское.



**Рис. 5.** Вертикальные профили растворенного  $O_2$  в приплотинных участках Ивановского и Угличского водохранилищ в августе 2015 (а) и 2016 гг. (б), а также Воткинского и Камского водохранилищ в августе 2016 г. (в). Станции: 1 – 11, 2 – 20, 3 – 125, 4 – 132, нумерация как в табл. 1.

**Fig. 5.** Vertical profiles of dissolved  $O_2$  in the damplain sections of the Ivankovo and Uglich reservoirs in August 2015 (a) and 2016 (b), as well as Votkinsk and Kama reservoirs (c) in August 2016. Stations: 1 – 11, 2 – 20, 3 – 125, 4 – 132, numbering as in Table 1.



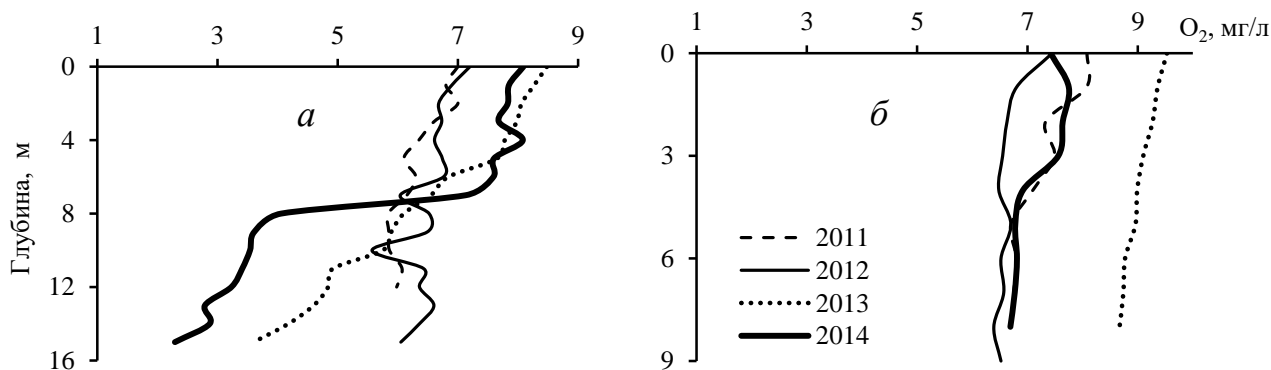
Напротив, в первой декаде августа 2012 г. дефицит  $O_2$  в этих водохранилищах был выражен сравнительно слабо, несмотря на высокий прогрев воды. В среднем за вегетационный период данного года  $T$  воды была низкой, близкой к таковой в 2015 г. (рис. 2). Вероятно, в начале августа процесс формирования дефицита  $O_2$  еще не достиг максимума.

Длительные (с 2007 г.) наблюдения формирования и встречаемости дефицита  $O_2$  на Рыбинском водохранилище показали, что летом до 2010 г. заметного ухудшения кислородного режима здесь не отмечалось. Так, даже при интенсивном прогреве воды во второй декаде августа теплого 2007 г. содержание  $O_2$  в придонном слое воды снижалось до 4.5 мг/л (<50% насыщения) только на трех участках водохранилища из 12-ти обследованных (25% проб), значения <4 мг/л не регистрировали (табл. 15). Впервые тотальное ухудшение кислородного режима в открытом водохранилище выявлено в аномально жаркое лето 2010 г., когда  $T$  воды у поверхности достигала 29°C, у дна – 26°C [Лазарева и др., 2012 (Lazareva et al., 2014)]. В устьевой области его малых притоков летний дефицит кислорода (<4 мг/л) отмечают систематически с 2006 г. в июле–августе в слое от 1–2 до 6–7 м над дном при температуре придонной воды 19–20°C [Гидроэкология устьевых..., 2015 (Hydroecology..., 2015)]. В последующие шесть лет процесс развивался по пути расширения количества станций и увеличения слоя воды, периодически охватываемых недостатком  $O_2$ .

В течение вегетационного периода снижение концентрации  $O_2$  <5 мг/л в слое 1–2 м над дном на отдельных глубоководных участках (6–10% обследованных станций) впервые регистрировали, как правило, в первой или

второй декадах июля при обычной в эти сроки  $T$  воды (табл. 15). Аноксию (<1 мг/л) в центре водохранилища на русле р. Шексна (ст. 28) в слое 2 м над дном наблюдали редко весной (третья декада мая 2013 г.) в начале прогрева вод ( $T$  воды у поверхности 11°C, у дна ~5°C), вероятно, локальный очаг дефицита  $O_2$  сохранился здесь с зимы. Наибольшее количество (30–70% станций) участков акватории водохранилища с низким содержанием  $O_2$  у дна (1–4.5 мг/л) отмечали в первой–второй декадах августа как при повышенной  $T$  воды, так и при обычной для этого времени, близкой к средней для июля–августа. При этом, в 2011 г. аноксию регистрировали на 65% станций в центре водохранилища на границе вода–дно, в 2013 г. слой с  $O_2$  <2 мг/л достигал 1–2 м над дном на 10% станций, а в 2016 г. с той же встречаемостью регистрировали мощность этого слоя до 5 м над дном. Последние проявления недостатка  $O_2$  (<5 мг/л) отмечали в придонном горизонте вод водохранилища в третьей декаде августа на единичных станциях по руслу р. Молога (ст. 29) в слое до 3 м над дном. Наиболее мощный слой (1–8 м над дном) с  $O_2$  1–4 мг/л регулярно регистрировали в июле–августе в озеровидной части Рыбинского водохранилища пятнами вдоль затопленного русла рек Волги, Мологи и Шексны в пределах Волжского, Моложского и Главного плесов водохранилища на участках с глубинами 12–15 м, изредка  $O_2$  <5 мг/л отмечали по руслу р. Шексна в Шекснинском плесе (ст. 38). На затопленной пойме этих рек в период открытой воды содержание кислорода у дна почти не отличалось от такового у поверхности, что благоприятно для гидробионтов (рис. 6).

В большинстве случаев период с недостатком  $O_2$  не превышал 2 нед (интервал между двумя стандартными рейсами).



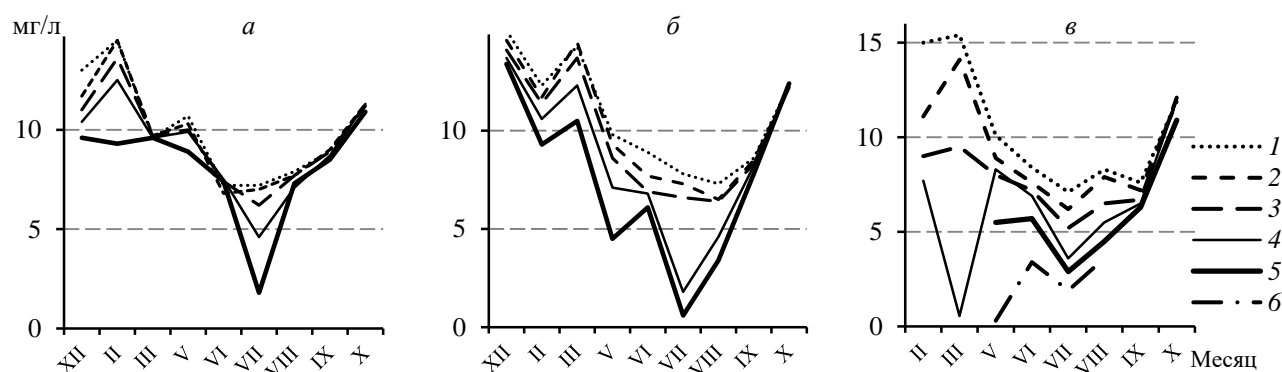
**Рис. 6.** Вертикальные профили распределения растворенного кислорода в Рыбинском водохранилище в июле–августе 2011–2014 гг.: *a* – затопленное русло р. Шексна (ст. 28), *б* – затопленная пойма (ст. 26).

**Fig 6.** Vertical distribution profiles of dissolved oxygen in the Rybinsk Reservoir in July–August 2011–2014: *a* – flooded riverbed of Sheksna River (station 28), *b* – flooded floodplain, (station 26).

Однако на отдельных участках он продолжался до одного месяца и более. В 2013 г. в Волжском плесе у с. Коприно (ст. 23) содержание  $O_2$  в придонной воде держалось на уровне 1.4–4.2 мг/л в течение месяца (9 июля – 4 августа). Тем же летом на русле Шексны (ст. 28) в центре водохранилища дефицит кислорода ( $O_2$  0.3–4.5 мг/л) регистрировали большую часть вегетационного периода (три месяца) с конца мая до конца августа. В Волжском плесе (ст. 21–23) низкое содержание  $O_2$  (<6 мг/л) регулярно отмечали у поверхности воды, как и в предшествующих исследованиях [Рыбинское водохранилище..., 1972 (The Rybinsk Reservoir..., 1972)].

Важно отметить, что в 2010-х годах недостаток  $O_2$  в придонном горизонте вод водо-

хранилища наблюдали преимущественно летом (рис. 7) в период активной жизнедеятельности гидробионтов. Зимой его отмечали крайне редко (4% проб) в конце марта в слое до 2 м над дном (ст. 28), в основном концентрация  $O_2$  подо льдом составляла 8–13 мг/л. Благоприятный кислородный режим в период ледостава в настоящее время связан с мягкими зимами и регулярным поступлением под лед свежей воды во время оттепелей. Для сравнения, в 1950-х годах шесть зим из десяти отличались недостатком  $O_2$  в воде и заморными явлениями, исключительно сильный замор отмечали в 1950 г. [Рыбинское водохранилище..., 1972 (The Rybinsk Reservoir..., 1972)].



**Рис. 7.** Годовая динамика вертикального распределения растворенного кислорода на глубоководных участках Рыбинского водохранилища в 2013–2014 гг. (среднее для каждого трехметрового слоя воды).

*a* – русло Волги в Волжском плесе (ст. 24), *б* – русло р. Молога в Главном плесе (ст. 29), *в* – русло р. Шексна в Главном плесе (ст. 28); Слой: 1 – 0...2 м, 2 – 3...5 м, 3 – 6...8 м, 4 – 9...11 м, 5 – 12...14 м, 6 – 15...16 м.

**Fig. 7.** Annual dynamics of the vertical distribution of dissolved oxygen in the deep water areas of the Rybinsk Reservoir in 2013–2014. (average for each three-meter layer of water).

*a* – the channel of the Volga in the Volga reaches (station 24), *b* – the riverbed of the Mologa River in the Glavnyi (Main) Reach (station 29), the riverbed of the Sheksna River in the Glavnyi (Main) Reach (station 28); The layer: 1 – 0...2 m, 2 – 3...5 m, 3 – 6...8 m, 4 – 9...11 m, 5 – 12...14 m, 6 – 15...16 m.

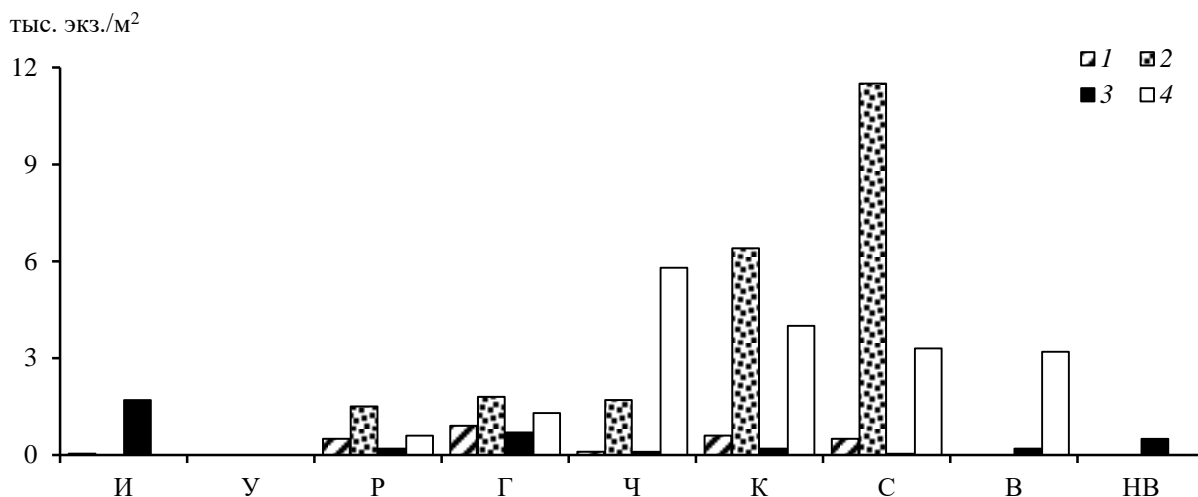
**Влияние придонного дефицита  $O_2$  на зообентос.** От дефицита растворенного  $O_2$  сильнее всего страдают оксифильные донные организмы, в особенности связанные с субстратом и не способные быстро передвигаться (моллюски и ракообразные). Аномально жарким летом 2010 г. в водохранилищах Верхней и Средней Волги донные ветвистоусые рачки (*Cladocera*) встречались в 2–5 раз реже, чем в предыдущие годы. Не были найдены крупные (до 2 мм) рачки рода *Sida*, которых ранее отмечали в 10–50% проб [Лазарева и др., 2013 (Lazareva et al., 2013)]. Выявлено резкое снижение интенсивности размножения моллюсков сем. *Dreissenidae*, а численность их личинок (велигеров) уменьшилась в 3–10 раз [Лазарева и др., 2015 (Lazareva et al., 2016)]. В последующие годы снизилось количество взрослых

моллюсков в центральной части водохранилищ. Так, в августе 2013 г. в глубоководной части водохранилищ Верхней Волги живые моллюски обнаружены в 17–20% обследованных станций. В 2015 г. в Ивановском и Угличском, а в 2016 г. в Воткинском и Камском водохранилищах из-за заморных явлений на глубоководных участках по руслу Волги и Камы моллюски в зообентосе отсутствовали. По каскаду Волги выявлено замещение полиморфной дрейссены менее оксифильной бугской (рис. 8). В 2015–2016 гг. только в мелководных заливах Ивановского водохранилища и Волге ниже г. Волгоград бугская дрейссена не обнаружена, оба вида отсутствовали в Угличском водохранилище. В оба года бугская дрейссена доминировала (~70% численности двух видов) в Волжском плесе Рыбинского и

Горьковском водохранилищах. До 2004 г. в Рыбинском и до 2009 г. в Горьковском водохранилищах преобладала полиморфная дрейсена (>90% суммарной численности двух видов) [Пряничникова и др., 2011; Пряничникова, 2015 (Pryanichnikova et al., 2011; Pryanichnikova, 2016)].

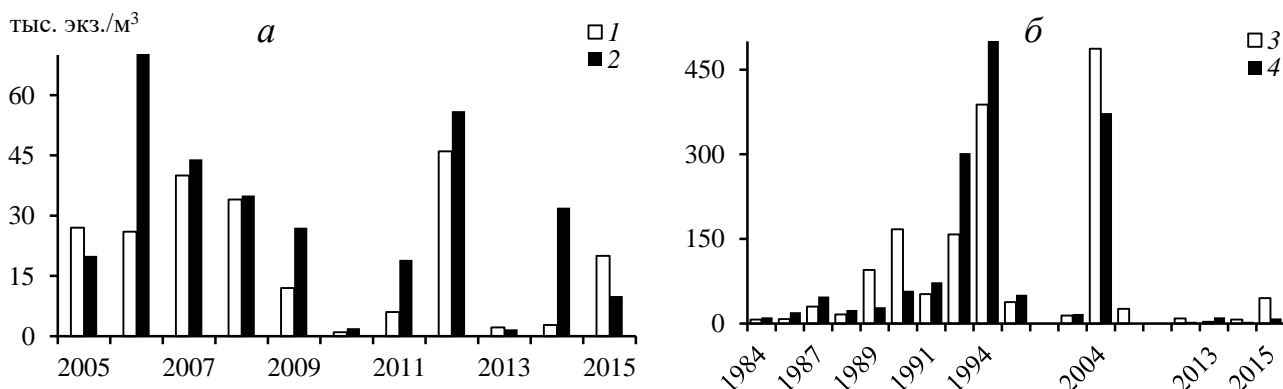
На примере водохранилищ Верхней Волги выявлены большие колебания год от года пиковой численности велигеров, характеризующей темп размножения дрейссенид. Максимум размножения этих моллюсков наблюдается в июле–августе [Столбунова,

2013; Соколова, 2015; Лазарева и др., 2015 (Stolbunova, 2013; Sokolova, 2015; Lazareva et al., 2016)], который приходится именно на период, когда содержание  $O_2$  у дна водохранилищ минимально. В Рыбинском водохранилище вариации (до 30–45 раз) обилия велигеров отмечены с 2010 г. (рис. 9 а), наименьшую их численность регистрировали в Волжском плесе в годы (2010–2011 и 2013–2014 гг.) с наиболее выраженным дефицитом  $O_2$  как в самом этом плесе, так и в лежащем выше по каскаду Угличском водохранилище, вода из которого поступает в Волжский плес Рыбинского.



**Рис. 8.** Численность моллюсков Dreissenidae в водохранилищах Волги в 2015–2016 гг. Водохранилища: И – Ивановское, У – Угличское, Р – Волжский плес Рыбинского, Г – Горьковское, Ч – Чебоксарское, К – Куйбышевское, С – Саратовское, В – Волгоградское, НВ – незарегулированная Волга. 1 и 3 – *Dreissena polymorpha*, 2 и 4 – *D. bugensis*; 1 и 2 – 2015 г., 3 и 4 – 2016 г.

**Fig 8.** The density of molluscs Dreissenidae in the Volga reservoirs in 2015–2016. Reservoirs: И – Ivankovo, У – Uglich, Р – Volga reaches of Rybinsk Reservoir, Г – Gorky, Ч – Cheboksary, К – Kuibyshev, С – Saratov, В – Volgograd, НВ – unregulated Volga. 1 and 3 – *Dreissena polymorpha*, 2 and 4 – *D. bugensis*; 1 and 2 – 2015, 3 and 4 – 2016



**Рис. 9.** Многолетние колебания пиковой численности велигеров дрейссенид в Рыбинском (а), Ивановском и Угличском (б) водохранилищах. 1 – Волжский плес и 2 – Главный плес Рыбинского водохранилища, 3 – Ивановское и 4 – Угличское водохранилища.

**Fig. 9.** Long-term fluctuations in the peak abundance of the Dreissenid Veligers in Rybinsk (а), Ivankovo and Uglich (б) reservoirs. 1 – Volga reach and 2 – Glavnyi (Main) reach of the Rybinsk Reservoir, 3 – Ivankovo and 4 – Uglich reservoirs.

В Ивановском и Угличском водохранилищах подобные колебания обилия велигеров зарегистрированы с середины 1990-х годов (рис. 9 б), с того времени, как в одном из них выявлен значительный летний дефицит  $O_2$  [Бреховских и др., 2006; Кременецкая, 2007 (Brekhovskih et al., 2006; Kremenetskaya, 2007)]. В последние годы интенсивность размножения дрейссенид в обоих водоемах крайне низка, пиковая численность велигеров ( $<50$  тыс. экз./м<sup>3</sup>) в 4–6 раз ниже по сравнению с таковой в начале 1990-х годов, что подтверждает низкую численность материнской популяции моллюсков по всей акватории водохранилища (рис. 8).

Для водохранилищ Верхней Волги получена достоверная зависимость ( $r = 0.4$ ,  $p < 0.05$ ) между концентрацией растворенного  $O_2$  и количеством макробентоса (численность и биомасса). В бентосе всех трех водохранилищ доминировали личинки хирономид *Chironomus* f.l. *plumosus* и олигохеты рода *Limnodrilus*, они в большом количестве развивались на участках

с содержанием  $O_2$  у дна  $<1$  мг/л. Эти гидробионты способны обитать при низкой ( $<2$  мг/л) концентрации  $O_2$ , а зимой до трех месяцев выживать в бескислородной среде [Каширская и др., 1983; Воробьев и др., 2008 (Kashirskaya et al., 1983; Vorobiev et al., 2008)]. На участках водохранилищ Верхней Волги, где в придонном слое зарегистрирован дефицит  $O_2$ , отмечено изменение соотношения двух основных групп макрозообентоса. При низкой концентрации  $O_2$  происходило увеличение доли олигохет и сокращение таковой хирономид (табл. 18). Кроме того, анализ видового богатства макробентоса семи водохранилищ каскада Волги, обследованных в 2015 г., показал, что с уровнем придонного  $O_2$  положительно коррелировало число видов моллюсков и амфипод ( $r = 0.4$ ,  $p < 0.05$ ), а также их доля в общей численности и биомассе зообентоса. Ракообразные отр. Amphipoda весьма чувствительны к содержанию кислорода [Тимофеев, 2010 (Timofeev, 2010)].

**Таблица 18.** Соотношение численности ( $N$ ) основных групп зообентоса при разной концентрации растворенного кислорода ( $O_2$ ) у дна в Ивановском и Угличском водохранилищах

**Table 18.** The ratio of the main groups density ( $N$ ) of zoobenthos at different concentrations of dissolved oxygen ( $O_2$ ) at the bottom in the Ivankovo and Uglich reservoirs

$O_2$ , мг/л	$N$ , тыс. экз./м <sup>2</sup>	Вклад в общую численность, % $N$		
		Chironomidae larvae	Oligochaeta	Mollusca*
$<1$	$2.2 \pm 2.5$	$37 \pm 13$	$63 \pm 14$	0
$1.5 \pm 0.4$	$4.2 \pm 1.8$	$27 \pm 4$	$57 \pm 15$	$<5$
$4.3 \pm 0.1$	$2.1 \pm 1.2$	$47 \pm 9$	$44 \pm 13$	$8 \pm 4$
$5.8 \pm 0.2$	$1.4 \pm 0.7$	$45 \pm 21$	$25 \pm 11$	$30 \pm 23$
$>8$	$2.0 \pm 1.1$	$51 \pm 14$	$50 \pm 13$	0

Примечание. \* – брюхоногие моллюски сем. Euglesidae, Lithoglyphidae и Valvatidae.

#### Влияние дефицита $O_2$ на зоопланктон.

Организмы зоопланктона не связаны с субстратом и могут мигрировать в толще воды, выбирая горизонт с оптимальными условиями обитания. Среди четырех крупных таксонов (Rotifera, Cyclopoida, Calanoida, Cladocera), составляющих пресноводный зоопланктон, наиболее чувствительны к недостатку  $O_2$  каляноидные копеподы и ветвистоусые ракообразные, те и другие избегают горизонта вод с его содержанием  $<1$  мг/л [Маловицкая, 1961 (Malovitskaya, 1961); Dodson, Frey, 1991]. На примере озер Глубокое и Плещеево с мощной (5–15 м над дном) зоной аноксии в гипolimнионе в летний период показано, что общее количество зоопланктона, особенно ракообразных, резко снижается при концентрации  $O_2 < 4$  мг/л, основное их количество держится в эпилимнионе выше верхней границы оксиклина [Щербаков, 1967; Столбунова, 2006 (Shcherbakov, 1967; Stolbunova, 2006)]. Однако влияние длительного летнего дефицита  $O_2$  на

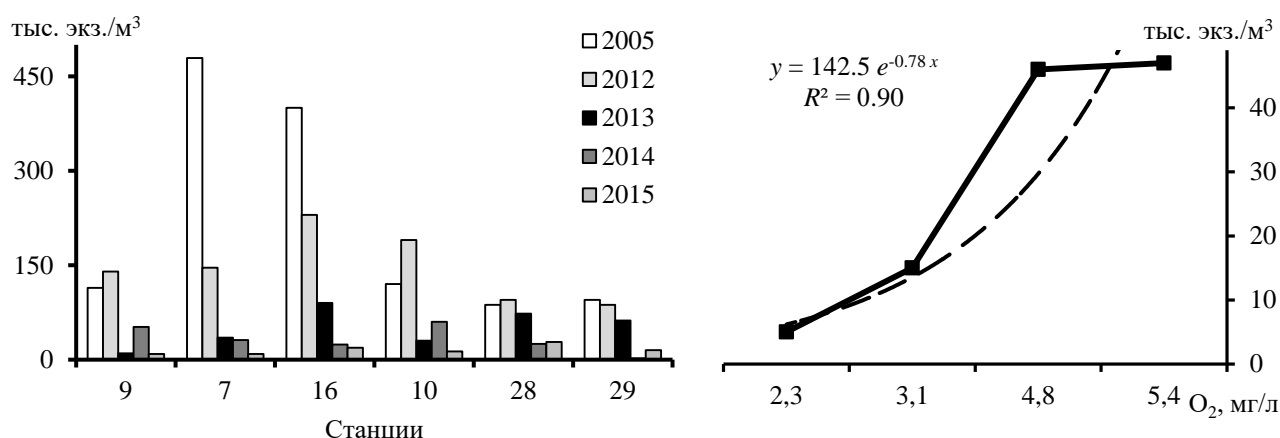
структуру сообщества и смены доминантов в пелагиали крупных водохранилищ фактически не исследовано.

В течение 10 лет (2005–2015 гг.) в трех водохранилищах Верхней Волги зарегистрировано снижение количества ракообразных фильтраторов (Cladocera, Calanoida) в 1 м<sup>3</sup> (в интегральных пробах) и под 1 м<sup>2</sup> на участках, где регулярно обнаруживали низкое ( $<4$  мг/л) содержание  $O_2$  у дна (рис. 10 а), что вызвано уменьшением слоя воды, пригодного для их обитания. Так, летом 2013 г. по руслу Волги в Ивановском и Угличском водохранилищах на глубине  $>7$  м при  $O_2$  1–3 мг/л, количество рачков снижалось в 3–11 раз относительно их концентрации в верхнем горизонте 0–7 м. В Рыбинском водохранилище до 2013 г. на глубине  $>7$  м ( $O_2$  4–6 мг/л) концентрация ракообразных была вдвое меньше, чем в слое 0–7 м. С 2014 г. отмечено резкое уменьшение (до 10 раз) численности рачков под 1 м<sup>2</sup> на станциях с дефицитом  $O_2$ , их количество наиболее

заметно снижалось на участках с массовым развитием цианобактерий. Зависимость численности ракообразных от среднего содержания  $O_2$  в гипolimнии в диапазоне 2–5.5 мг/л может быть с высокой степенью достоверности ( $R^2$  90%) описана экспоненциальным уравнением (рис. 10б).

На численность ракообразных в столбе воды под 1 м<sup>2</sup> и биомассу сообщества существенно влияла мощность слоя воды с недостатком  $O_2$ . Так, если слой с концентрацией  $O_2$  <5 мг/л занимал >50% толщи воды, то численность рачков уменьшалась в 6 раз, а общая биомасса зоопланктона – почти в 7 раз (табл. 19). Кроме того, в условиях дефицита  $O_2$  изменялась структура сообщества в сторону уменьшения абсолютной и относительной

численности ракообразных фильтраторов, особенно родов *Daphnia*, *Diaphanosoma* и *Eudiaptomus* (табл. 19). При толщине слоя воды с  $O_2$  <5 мг/л свыше 50% столба воды фильтраторы отсутствовали среди доминантов зоопланктона, в сообществе преобладали циклопоидные копеподы (табл. 19). В 2016 г. в затопленном пойменном оз. Видогошь (ст. 3, акватория Иваньковского водохранилища) отмечали выход верхней границы оксиклина фактически под поверхность (на глубине 1–2 м), концентрация  $O_2$  у поверхности воды <4 мг/л. В этом случае в эпилимнии озера все ракообразные были крайне редки и малочисленны, в сообществе доминировали коловратки (>90% численности).



**Рис. 10.** Многолетняя (2005–2015 гг.) динамика летней (август) численности ракообразных фильтраторов на участках с регулярно регистрируемым дефицитом  $O_2$  в водохранилищах Верхней Волги (а) и зависимость их количества в гипolimнии от средней концентрации  $O_2$  (б). Станции: 7, 9–10 – Иваньковское водохранилище; 16 – Угличское водохранилище; 28–29 – Рыбинское водохранилище; нумерация соответствует указанной в табл. 1. Пунктир – линия тренда.

**Fig 10.** Long-term (2005–2015) dynamics of the summer (August) abundance of crustacean filter feeders in areas with a regularly recorded  $O_2$  deficiency in the reservoirs of the Upper Volga (a) and the dependence of their quantity in the hypolimnion on the average concentration of  $O_2$  (b). Stations: 7, 9–10 – Ivankovo Reservoir; 16 – Uglich Reservoir; 28–29 – Rybinsk Reservoir; the numbering corresponds to the one indicated in Table. 1. Dotted is the trend line.

**Таблица 19.** Изменение структуры и обилия планктонных ракообразных водохранилищ Верхней Волги в зависимости от мощности слоя с дефицитом  $O_2$  (<5 мг/л) над дном летом 2012–2015 гг.

**Table 19.** Changes in the structure and abundance of planktonic crustaceans in the Upper Volga reservoirs, depending on the thickness of the layer with an  $O_2$  deficiency (<5 mg/l) above the bottom in the summer of 2012–2015

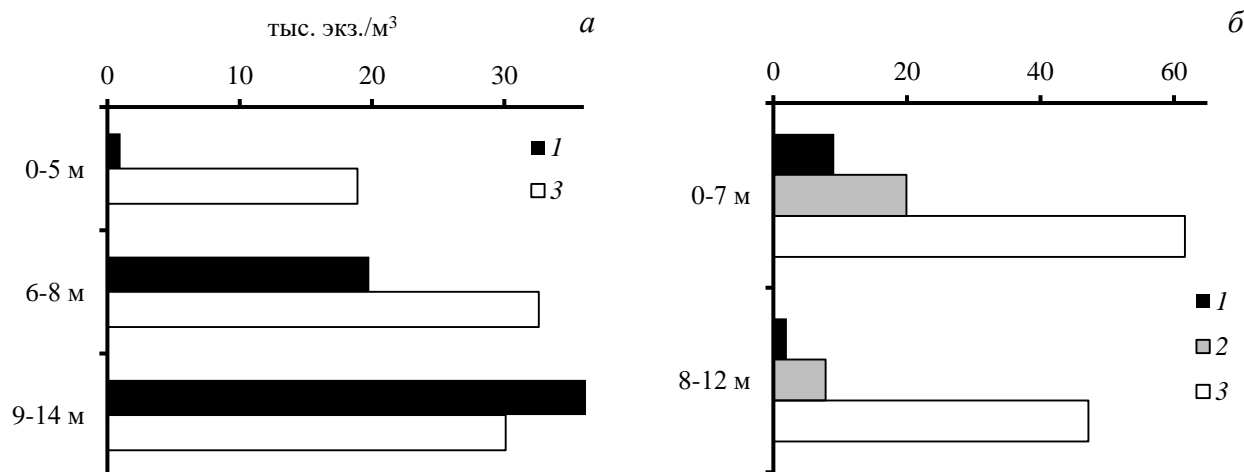
Слой, % глубины	$N_{cr}$ , тыс. экз./м <sup>2</sup>	$B_{общ}$ , г/м <sup>2</sup>	Иваньковское водохранилище		Угличское водохранилище	
			Доминанты	% $N_{cr}$	Доминанты	% $N_{cr}$
0 (норма)	4150±1000	80±25	<i>Mesocyclops leuckarti</i> <i>Thermocyclops crassus</i> <i>Chydorus sphaericus</i>	34 22 19	<i>Thermocyclops crassus</i> <i>Daphnia cucullata</i> <i>Diaphanosoma brachyurum</i>	31 23 18
30–45	1640±200	17±5	<i>Mesocyclops leuckarti</i> <i>Thermocyclops crassus</i> <i>Daphnia cucullata</i>	26 26 10	<i>Mesocyclops leuckarti</i> <i>Thermocyclops crassus</i> <i>Daphnia cucullata</i>	34 19 8
50–60	690±400	12±6	<i>Mesocyclops leuckarti</i> <i>Thermocyclops crassus</i>	37 19	<i>Mesocyclops leuckarti</i> <i>Thermocyclops crassus</i>	31 10

Примечание. Слой – мощность слоя с дефицитом  $O_2$  ( $O_2$  <5 мг/л) над дном в процентах глубины столба воды на станциях,  $N_{cr}$  – численность ракообразных,  $B_{общ}$  – общая биомасса зоопланктона.

Важнейшее следствие летнего дефицита  $O_2$  для зоопланктона водохранилищ – изменение его вертикального распределения. При благоприятном режиме  $O_2$  в пелагиали ракообразные фильтраторы обычно концентрируются под слоем водорослей (глубже 5 м) и у дна (рис. 11а). В условиях дефицита  $O_2$  отмечено смещение скоплений ракообразных, особенно кладоцер, в верхний (0–7 м) слой воды (рис. 13б). Во второй половине лета этот слой малопригоден для обитания фильтраторов из-за высокой концентрации в нем крупных колоний цианобактерий (роды *Aphanisomenon*, *Microcystis*), которых рачки не могут использовать в пищу и которые забивают их фильтрационный аппарат. Вынужденное перемещение фильтраторов в верхний горизонт пелагиали водохранилищ при сильном дефиците  $O_2$  в значительной части столба воды, по-видимому, служит основной причиной снижения их количества и замещения циклопоидны-

ми копеподами. Представители пелагических Cyclozoidea на копепоидных стадиях развития по типу питания относятся к хватателям [Мо-наков, 1998 (Monakov, 1998)], которым не мешает скопление водорослей у поверхности воды.

Вклад ракообразных планктона в общую фильтрацию вод водохранилищ составляет ~60%, моллюсков дрейссенид ~40% [Лазарева и др., 2013 (Lazareva et al., 2013)]. Снижение обилия фильтраторов сказывается на самоочищающей способности их экосистем, в июле–августе она может составить лишь 25% нормы. В настоящее время наиболее тяжелая ситуация для донных и планктонных фильтраторов сложилась в Ивановском, Угличском, Камском и Воткинском водохранилищах, сравнительно благоприятные условия – в Волге ниже Рыбинской ГЭС и Каме в пределах Нижнекамского водохранилища.



**Рис. 11.** Вертикальное распределение численности (тыс. экз./м³) доминантных видов зоопланктона в пелагиали Рыбинского водохранилища в норме (а) и в условиях придонного дефицита растворенного  $O_2$  (б). 1 – *Daphnia galeata*, 2 – *Eudiaptomus gracilis et graciloides*, 3 – *Mesocyclops leuckarti*.

**Fig. 11.** Vertical distribution of abundance (thous. ind./m³) of dominant zooplankton species in the pelagic of the Rybinsk Reservoir in norm (a) and under conditions of bottom-level deficiency of dissolved  $O_2$  (b). 1 – *Daphnia galeata*, 2 – *Eudiaptomus gracilis et graciloides*, 3 – *Mesocyclops leuckarti*.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Температура представляет основной структурирующий фактор, определяющий сезонную смену видов, их пространственное распределение в водных экосистемах, обилие и продуктивность сообществ. С 1960-х годов в северном полушарии отмечают повышение  $T$  воздуха и воды водоемов, в России начало потепления датируют 1976 г., причем темп потепления в России выше, чем в Западной Европе [Второй оценочный..., 2014 (The second..., 2014)]. Увеличение градиента прогрева вод по вертикали приводит к изменению схемы термической стратификации, мощности

эпи-, мета- и гипolimниона, глубины залегания термоклина [Wilhelm, Adrian, 2008; Adrian et al., 2009]. Значительное усиление термической стратификации при потеплении сопровождается формированием дефицита  $O_2$  в гипolimнионе озер в летний период [Adrian et al., 2009]. Летний дефицит  $O_2$  регистрируют даже в мелководных эвтрофных озерах [Wilhelm, Adrian, 2008; Adrian et al., 2009]. В оз. Мюггельзее (Германия) летом низкое содержание кислорода в придонном слое воды кратковременно (0.5–2 сут), максимум до 9 сут, однако вызванные им всплески выноса фосфа-

тов из грунтов увеличивают внутреннюю биогенную нагрузку и стимулируют развитие водорослей [Wilhelm, Adrian, 2008]. То же, вероятно, происходит в Ивановском водохранилище, в котором дефицит кислорода у дна наблюдают с 1960-х годов, а зона аноксии ( $O_2 < 2$  мг/л) в нем летом достигает 30% объема вод [Иваньковское водохранилище..., 1978; Кременецкая, 2007 (The Ivankovo Reservoir..., 1978; Kremenetskaya, 2007)].

В крупных водохранилищах изменение режима термической стратификации и содержания  $O_2$  в толще воды в связи с потеплением фактически не исследовано. Долгое время считалось, что летом вертикальное плотностное расслоение вод в этих водоемах кратковременно, а режим  $O_2$  в целом благоприятен для гидробионтов [Рыбинское водохранилище..., 1972; Волга и ее жизнь, 1978; Буторин и др., 1982 (The Rybinsk Reservoir..., 1972; The River Volga..., 1979; Butorin et al., 1982)]. Исключения (Иваньковское водохранилище) объясняли подпиткой обедненными  $O_2$  грунтовыми водами и загрязнением [Иваньковское водохранилище..., 1978 (The Ivankovo Reservoir..., 1978)]. По данным авторов в 2010-х годах произошло заметное увеличение распространения и встречаемости дефицита  $O_2$  в центральной глубоководной части водохранилищ Верхней Волги, а также рост мощности слоя вод с низким ( $< 5$  мг/л) содержанием  $O_2$ . В 2016 г. заморные явления в июле–августе зарегистрированы в пяти из 11-ти обследованных водохранилищ Волго-Камского каскада, слой с  $O_2 < 5$  мг/л локально занимал до 60% столба воды. В годы с наиболее высоким прогревом поверхности вод (например, в 2016 г.) отмечено формирование анаэробных условий в гипolimнионе самых глубоких участков водохранилищ вблизи плотин ГЭС. В верховье некоторых водохранилищ (Иваньковское и Угличское) низкое содержание  $O_2$  наблюдалось во всем столбе воды, протяженные участки от 35 до  $> 200$  км затопленного русла Волги и Камы оказались заморными. Гибель беспозвоночных и рыбы в Камских водохранилищах наблюдали визуально во время экспедиционных работ.

Понятие “благоприятный кислородный режим” предполагает, что концентрация  $O_2$  в воде достаточна для обеспечения дыхания гидробионтов и окисления органического вещества, в том числе ОБ отмерших организмов. Режим  $O_2$  в водоемах определяется многими факторами и их сочетанием, среди них наиболее значимы площадь зоны контакта воды с атмосферой, продолжительность ледостава

зимой, уровень прогрева воды летом, сроки и длительность термической стратификации, мощность гипolimниона, уровень развития фитопланктона, а также соотношение фотосинтеза и интенсивности аэробных процессов минерализации ОБ [Рыбинское водохранилище..., 1972; Драчев и др., 1974; Бреховских, 1988 (The Rybinsk Reservoir..., 1972; Drachev et al., 1974; Brekhovskih, 1988)]. В общем, растворимость  $O_2$  в воде снижается с ростом температуры, его концентрация зависит от длительности и интенсивности вертикального плотностного расслоения вод, а также трофического статуса водоема. На эвтрофных Можайском (р. Москва) и Ивановском (р. Волга) водохранилищах показано, что наиболее сильно ( $170\text{--}205$  мг/(м<sup>2</sup> · сут)) потребляют  $O_2$  донные отложения, содержащие много ОБ (серый ил, песчанистый ил), в глубоководных (10–12 м) участках этих водохранилищ уже в первой декаде июля формируется дефицит  $O_2$  (концентрация  $O_2 < 3$  мг/л) в слое до 5 м над дном (~50% столба воды), зона аноксии может составить 30–40% объема водохранилищ, а скорость ее формирования в эвтрофных условиях достигает 3 км<sup>3</sup>/сут [Бреховских и др., 2006; Кременецкая, 2007; Перекальский, Кременецкая, 2007; Кременецкая и др., 2009 (Brekhovskih et al., 2006; Kremenetskaya, 2007; Perekal'skiy, Kremenetskaya, 2007; Kremenetskaya et al., 2009)]. В поверхностном насыщенном  $O_2$  слое воды его потребление существенно выше и достигает 0.11–0.89 мг/(л · ч) [Кременецкая, 2007 (Kremenetskaya, 2007)], что составляет 2.6–21.4 г/(м<sup>3</sup> · сут) (пересчет авторов). Однако до сих пор не выяснен вопрос о том, в каком биотопе (в толще воды или в донных отложениях) валовое потребление  $O_2$  максимально, поскольку интенсивность его поглощения сильно варьирует в зависимости от многих факторов, в том числе резко снижается при низком содержании  $O_2$  в воде [Бреховских, 1988 (Brekhovskih, 1988)]. Тот факт, что в ряде водохранилищ Волги и Камы снижение концентрации  $O_2 < 60\%$  в дневное время наблюдалось в слое термоклина, а иногда даже в эпилимнионе (рис. 5), указывает на высокое его потребление в толще воды, в том числе на дыхание водорослей. Это является предпосылкой ночного дефицита  $O_2$ , который чаще всего регистрируют в неглубоких эвтрофных водоемах [Wilhelm, Adrian, 2008].

Характерной особенностью термической структуры крупных водохранилищ в период летней стагнации является высокий прогрев глубоких слоев воды. Так, еще до начала по-

тепления в начале 1970-х годов Т придонной воды центральной части Рыбинского водохранилища в конце июля составляла 18–19°C, а в теплые годы достигала 20–22°C [Буторин и др., 1982 (Butorin et al., 1982)], в Куйбышевском водохранилище в 1960–1970-х годах она варьировала от 18 до 21°C [Куйбышевское водохранилище..., 1983 (The Kuibyshev Reservoir..., 1983)]. Летом сильную стратификацию вод с разницей температуры между поверхностью воды и дном 7–9°C и продолжительностью 9–10 мес. отмечают только в сравнительно глубоководном Ивановском плесе Ивановского водохранилища, причиной этого считают влияние сброса теплых вод Конаковской ГРЭС и небольшие попуски воды через плотину ГЭС [Ивановское водохранилище..., 1978 (The Ivankovo Reservoir..., 1978)]. В современный период прогрев толщи воды водохранилищ во второй половине лета превышает норму (табл. 2). Тем не менее слой скачка Т воды во всех водоемах выражен слабо (разница температуры эпи- и металимниона <1°C), поэтому сохраняется обмен вод между эпи- и гипolimнионом. Т воды в гипolimнионе часто превышает 20°C (максимум 24°C), что существенно выше (на 2–6°C) по сравнению с периодом до потепления [Ивановское водохранилище..., 1978; Буторин и др., 1982; Куйбышевское водохранилище..., 1983 (The Ivankovo Reservoir..., 1978; Butorin et al., 1982; The Kuibyshev Reservoir..., 1983)] и что еще более (на 12–14°C) превышает прогрев гипolimниона в стратифицированных озерах средней полосы Европейской России [Щербаков, 1967; Столбунова, 2006; Жданова, Лазарева, 2009 (Shcherbakov, 1967; Stolbunova, 2006; Zhdanova, Lazareva, 2009)].

Насыщение воды O<sub>2</sub> при высокой температуре ниже, а интенсивность аэробной деградации ОВ (и потребление O<sub>2</sub>) выше. Как результат, сильный прогрев глубоких слоев воды водохранилищ в условиях массового развития фитопланктона приводит к истощению запаса растворенного O<sub>2</sub> и формированию его дефицита. Особенно четко этот процесс выражен в водоемах верховьев каскада Волги и Камы. Здесь в летнюю межень попуски воды через плотины ГЭС сравнительно не велики [Изменения, уровней..., 2017; Changes in..., 2017], как и вызванное ими перемешивание, а термическая стратификация формируется чаще и держится дольше, чем в водохранилищах ниже по каскаду. Анализ встречаемости придонного дефицита O<sub>2</sub> в годы с разным прогревом воды в водохранилищах Верхней Волги также свидетельствует о сильном влиянии Т

воды на его развитие и распространение по акватории. В 2016 г. при высоком прогреве вод встречаемость низкого содержания O<sub>2</sub> выше на 30–40% по сравнению с предыдущим годом при умеренном прогреве (табл. 14, 15). На оз. Весиярви (Vesijärvi, Финляндия) экспериментально показано, что закачивание теплой насыщенной O<sub>2</sub> воды из эпилимниона в гипolimнион с целью аэрации последнего не приводит к желаемому результату: увеличение температуры в глубоких слоях воды только усиливает дефицит O<sub>2</sub> [Horpilla et al., 2015].

Эволюционно устойчивость к недостатку O<sub>2</sub> выше у донных животных по сравнению с пелагическими, которые реже с ним сталкиваются [Одум, 1975 (Odum, 1975)]. Например, бентосные личинки хирономид рода *Chironomus* и олигохеты рода *Limnodrilus* обитают при низкой (<2 мг/л) концентрации O<sub>2</sub>, а зимой до трех месяцев выживают в бескислородной среде [Каширская и др., 1983; Воробьев и др., 2008 (Kashirskaya et al., 1983; Vorobiev et al., 2008)]. Планктонные коловратки без кислорода в лаборатории способны жить от нескольких часов до нескольких дней (до 10 сут), в водоемах при аноксии некоторые полисапробные виды (например, род *Brachionus*) выживают более продолжительное время [Кутикова, 1970 (Kutikova, 1970)]. Полученные в экспериментах летальные значения содержания O<sub>2</sub> для пелагических ракообразных (Calanoida, Cladocera) тоже очень низкие (от <1 до 1.5 мг/л) [Маловицкая, 1961 (Malovitskaya, 1961); Dodson, Frey, 1991]. Однако в гипolimнионе озер численность зоопланктона резко снижается при O<sub>2</sub> <4 мг/л [Столбунова, 2006 (Stolbunova, 2006)]. Наши данные указывают на то, что в водохранилищах изменения структуры сообщества и снижение численности ракообразных фильтраторов наблюдаются уже при O<sub>2</sub> <5 мг/л и прямо зависят от мощности слоя с его дефицитом (табл. 19). Кроме того, в условиях сильного недостатка O<sub>2</sub> меняется вертикальное распределение зоопланктона водохранилищ, скопления фильтраторов (роды *Daphnia*, *Eudiaptomus*) смещаются из придонного и среднего горизонтов к поверхности воды, тогда как циклопоидные копеподы населяют всю ее толщу (рис. 11). Концентрация коловраток и копепод рода *Thermocyclops* отмечена в июле у дна (глубина 4–6 м) р. Ильдь (приток Рыбинского водохранилища) при O<sub>2</sub> <3 мг/л [Крылов и др., 2009 (Krylov et al., 2009)].

Вместе с тем, в мета- и гипolimнионе озер летом часто наблюдают скопления пелагических фильтраторов при низком содержании O<sub>2</sub>. Например, в оз. Глубокое в июне–



августе *Daphnia cristata* Sars держится на глубине 4–20 м при  $O_2$  1–4 мг/л [Щербаков, 1967 (Shcherbakov, 1967)], в оз. Плещеево в июле тот же вид полностью сосредоточен на глубине 12–18 м в гипolimнионе с  $O_2$  <5 мг/л [Столбунова, 2006 (Stolbunova, 2006)]. Различия вертикального распределения фильтраторов в озерах и водохранилищах, возможно, связаны не только с низким содержанием  $O_2$ , но и с наличием/отсутствием в воде ядовитых газов ( $H_2S$ ,  $NH_3$ ) при различном уровне прогрева гипolimниона и pH воды. Скорость анаэробной деструкции ОВ, при которой происходит выделение этих соединений возрастает с ростом Т воды, выделение сероводорода на загрязненных антропогенным ОВ илах при концентрации  $O_2$  <2 мг/л в летне-осенний период достигает 0.05–2.9 г  $H_2S/(m^2 \cdot \text{сут})$ , в акваториях водоемов вблизи крупных промышленных центров локально формируются токсичные зоны [Дзюбан, 2006 (Dzyuban, 2006)]. Во время летних экспедиционных работ 2015–2016 гг. присутствие сероводорода в придонной воде и илах на русле Волги и Камы органолептически не обнаруживали. В воде исследованных водохранилищ в августе средний уровень pH составляет 7.9–8.3, максимум 8.9 (табл. 13), близкие значения приведены в работе [Дебольский и др., 2010 (Debol'skij et al., 2010)]. Появление в воде свободного  $H_2S$  в принципе маловероятно при сдвиге pH в щелочную сторону [Никаноров, 2001 (Nikanorov, 2001)], его присутствие в верхнем слое илов летом отмечали только в оз. Видогощь (ст. 3) при pH <7.5 и Т воды 5–7°C.

Более вероятно отравление гидробионтов растворенным аммиаком, доля которого в общем количестве аммонийного азота резко возрастает при Т воды >20°C и pH >8.5 [Никаноров, 2001 (Nikanorov, 2001)]. Летом в воде

Волги содержание аммонийного азота достаточно велико, максимальные значения для водохранилищ Верхней Волги составляют 0.2–0.8 мг/л, для Средней и Нижней Волги 0.1–1.5 мг/л, [Иваньковское водохранилище, 1978; Волга и ее жизнь, 1978; Дебольский и др., 2010 (The Ivankovo Reservoir..., 1978; The River Volga..., 1979; Debol'skij et al., 2010)]. В Рыбинском водохранилище в современный период (2001–2011 гг.) отмечена очень низкая (в среднем <0.1, максимум 0.2 мг/л) летняя концентрация  $NH_4^+$  [Степанова, Бикбулатова, 2015 (Stepanova, Bikbulatova, 2016)], ранее указывали 0.2–0.6 мг/л [Рыбинское водохранилище..., 1972; Экологические проблемы..., 2001 (The Rybinsk Reservoir..., 1972; Ecological problems..., 2001)]. В Камских водохранилищах летом количество аммонийного азота также очень мало (0.03–0.05 мг/л) [Краснова, 2010 (Krasnova, 2010)]. При значениях pH 8.5–8.9 и Т воды 22–25°C в сроки экспедиций (табл. 13) в водохранилищах Верхней Волги локально содержание растворенного аммиака могло составить 0.04–0.2 мг/л (до 4 ПДК), а в придонном горизонте в условиях аноксии возможно его накопление и до более высоких значений. ПДК для аммиака в воде рыбохозяйственных водоемов 0.05 мг/л, летальная концентрация для животных планктона 0.2 мг/л, бентоса >2 мг/л, для обычных в Волге рыб (окунь, плотва) 0.4–1.4 мг/л [Сельскохозяйственная электронная..., 2017 (Agricultural Knowledge..., 2017)]. В этих условиях наиболее вероятен отклик на интоксикацию аммиаком со стороны зоопланктона. Однако летом 2016 г. в Воткинском и Камском водохранилищах мертвая рыба также имела внешние признаки отравления аммиаком: широко раскрытый рот, расправленные плавники и жабрные крышки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследования термической структуры и кислородного режима 11-ти водохранилищ Волго-Камского каскада летом 2015–2016 гг. показали, что прогрев поверхности воды чаще всего превышал среднемноголетние значения на 1.5–6°C, только в конце августа 2015 г. Т воды в Средней и Нижней Волге была ниже нормы. Во всех водохранилищах максимальный прогрев воды отмечен летом 2016 г. В июне кислородный режим был благоприятным для гидробионтов во всех водохранилищах, а в августе – в водоемах Средней и Нижней Волги, а также Камы ниже плотины Воткинской ГЭС. Его недостаток регистрировали только на границе вода/грунт в

единичных участках Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ. Опасно низкое для животных содержание  $O_2$  (<5 мг/л) зарегистрировано в августе 2015 г. в двух (Иваньковское и Угличское), а в августе 2016 г. – в пяти (Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Камское и Воткинское) из 11-ти обследованных водохранилищ каскада, встречаемость дефицита  $O_2$  варьировала от 30% станций в Рыбинском до 90% в Иваньковском и Угличском. Слой с  $O_2$  от <1 до 5 мг/л локально занимал 10–60% столба воды. При наиболее высоком прогреве вод (август 2016 г.) выявлено формирование анаэробных условий в гипolimнионе самых глубоких участков водохранилищ вбли-

зи плотин ГЭС, а в верховье некоторых водоемов (Иваньковское и Угличское) низкое содержание  $O_2$  наблюдалось во всем столбе воды, протяженные участки от 35 до >200 км русла Волги и Камы оказались заморными. Гибель беспозвоночных и рыбы в Камских водохранилищах наблюдали визуально во время экспедиционных работ.

Многолетние наблюдения на водохранилищах Верхней Волги показали, что с 2007 г. многократно возросла частота встреч летнего (июль–август) придонного дефицита растворенного  $O_2$  в Рыбинском водохранилище. В 2011–2016 гг. низкое содержание  $O_2$  у дна регулярно наблюдается в глубоководных участках всех четырех его плесов, за пять лет слой над дном с недостатком  $O_2$  вдоль затопленного русла рек Волги, Мологи и Шексны увеличился с ~1 м до 2–7 м, а период, когда его регистрируют, возрос от единичных наблюдений в отдельные сроки до почти ежегодных длительностью от 2 нед до 3 мес. В двух других водохранилищах Верхней Волги сильный дефицит  $O_2$  отмечен ежегодно в августе (2012–2016 гг.) на 35–90% станций по руслу Волги, а в отдельные годы и в мелководных заливах. Ранее (с 1960-х годов) его регистрировали только в Иваньковском водохранилище. В Угличском и Рыбинском водохранилищах подобная ситуация выявлена впервые, также впервые в августе 2016 г. отмечены заморы в Камском и Воткинском водохранилищах. Установлено, что повышенная летняя  $T$  воды и продолжительный период высокого прогрева существенно усиливают проявления дефицита  $O_2$  и его распространение по акватории водохранилищ.

Выявлено, что в условиях придонного дефицита  $O_2$  снижается видовое богатство и обилие донных ракообразных (*Cladocera*, *Amphipoda*), нарушается процесс размножения двустворчатых моллюсков сем. *Dreissenidae*, что также приводит к уменьшению их численности вплоть до полного отсутствия, в сообществе

остаются только брюхоногие моллюски. Кроме того, происходит изменение состава доминантов и структуры макрозообентоса в сторону увеличения доли таксонов, устойчивых к низкому содержанию  $O_2$  (*Oligochaeta*, особенно род *Limnodrilus*). Сильные колебания год от года пиковой численности велигеров дрейссенид могут служить индикатором заморных явлений в середине лета.

На примере водохранилищ Верхней Волги зарегистрировано многократное снижение численности ракообразных и общей биомассы зоопланктона с ростом мощности слоя воды с недостатком  $O_2$ . Выявлено изменение их вертикального распределения, а также структуры сообщества в направлении уменьшения численности фильтраторов. Фильтраторы исчезают из состава доминантов при толщине слоя с  $O_2 < 5$  мг/л в >50% столба воды, среди ракообразных в таких биотопах преобладают циклопоидные копеподы. При содержании  $O_2 < 4$  мг/л во всем столбе воды ракообразные фактически отсутствуют, в планктоне доминируют коловратки. Регулярное повторение дефицита  $O_2$  во второй половине лета приводит к устойчивой тенденции снижения (до 10 раз) летней численности фильтраторов год от года на участках водохранилищ, где чаще всего наблюдается низкое (<4 мг/л) содержание  $O_2$ . В условиях прогрева глубоких слоев воды >20°C, ее поверхности до 25–26°C и уровне pH >8.5 дополнительным угнетающим фактором, сопутствующим дефициту  $O_2$ , может быть интоксикация растворенным аммиаком. Снижение обилия донных и планктонных фильтраторов сказывается на самоочищающей способности экосистем водохранилищ Волги, в настоящее время наиболее напряженная ситуация сложилась в Иваньковском, Угличском, Камском и Воткинском водохранилищах, сравнительно благоприятные условия – в Волге ниже Рыбинской ГЭС и Каме в пределах Нижнекамского водохранилища.

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № АААА-А18-118012690106-7).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аничкова Н.И. Некоторые черты гидрохимического режима северной части Рыбинского водохранилища // Тр. Дарвинского гос. заповедника. 1959. Вып. 5. С. 191–209.
- Балушкина Е.В., Винберг Г.Г. Зависимость между длиной и массой тела планктонных ракообразных // Экспериментальные и полевые исследования биологических основ продуктивности озер. Л.: Зоол. ин-т АН СССР, 1979. С. 58–72.
- Бреховских В.Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. М.: Наука, 1988. 168 с.
- Бреховских В.Ф., Вишневская Г.Н., Кременецкая Е.Р. и др. Об оценке потребления кислорода разными типами грунтов долинных водохранилищ в летний период // Метеорология и гидрология. 2006. № 10. С. 82–91.
- Буторин Н.В., Курдина Т.Н., Бакастов С.С. Температура воды и грунтов Рыбинского водохранилища. Л.: Наука, 1982. 221 с.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М.: Триада, 2016. 378 с.

- Водохранилища // Росводресурсы. URL: <http://voda.mnr.gov.ru/reservoirs/detail.php?ID=7338> (обращение февраль 2018 г.).
- Волга и ее жизнь. Л.: Наука, 1978. 348 с.
- Воробьев Д.С., Франк Ю.А., Залозный Н.А. и др. К вопросу устойчивости *Limnodrilus hoffmeisteri* (Oligochaeta, Tubificidae) к нефтяному загрязнению // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2008. № 2. С. 83–88.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 61 с.
- Гидроэкология устьевых областей притоков равнинного водохранилища. Ярославль: Филигрань, 2015. 466 с.
- Дзюбан А. Н. Микробиологическая характеристика донных отложений Верхней Волги в условиях антропогенного воздействия // Биология внутр. вод. 2006. № 1. С. 16–23.
- Дебольский В.К., Григорьева И.Л., Комиссаров А.В. и др. Современная гидрохимическая характеристика реки Волга и ее водохранилищ // Вода: химия и экология. 2010. № 11. С. 2–12.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2015 г. М.: Росгидромет, 2016. 68 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 г. М.: Росгидромет, 2017. 70 с.
- Драчев С.М., Буторин Н.В., Былинкина А.А. Факторы, определяющие качество воды в водохранилищах // Факторы формирования водных масс и районирование внутренних водоемов. Л.: Наука, 1974. С. 3–15.
- Жданова С.М., Лазарева В.И. Видовой состав и пространственное распределение летнего (июль) зоопланктона озера Глубокого // Тр. Гидроб. ст. на Глубоком озере. Т. 10. М.: Т-во научн. изданий КМК, 2009. С. 51–66.
- Законнова А.В., Литвинов А.С. Многолетние изменения гидроклиматического режима Рыбинского водохранилища // Гидролого-гидрохимические исследования водоемов бассейна Волги. Ярославль: Филигрань, 2016. С. 16–22.
- Иваньковское водохранилище и его жизнь. Л.: Наука, 1978. 304 с.
- Изменения уровней водохранилищ ГЭС РусГидро. Электронный ресурс. URL: <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/> (обращение июнь 2017 г.).
- Каталог стока воды в Каспийское море. Река Волга. // Координационный комитет по гидрометеорологии Каспийского моря. Электронный ресурс. URL: <http://www.caspcom.com/index.php?lang=1&proj=6> (обращение август 2017 г.).
- Каширская Е.В., Тодераш И.П., Панкратова В.Я. Биохимия и физиология // Мотыль: систематика, морфология, экология, продукция. М.: Наука, 1983. С. 127–147.
- Корнева Л.Г. Фитопланктон Рыбинского водохранилища: состав, особенности распределения, последствия эвтрофирования // Современное состояние экосистемы Рыбинского водохранилища. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. С. 50–113.
- Краснова Е.С. Пространственное распределение гетеротрофных бактерий в водной толще Камских водохранилищ // Научное наследие В.И. Вернадского и современные проблемы науки. Матер. 1-ой Всерос. научно-практ. конф. Чебоксары:Новое время, 2010. С. 105–108.
- Кременецкая Е.Р. Оценка скорости потребления кислорода в толще воды Можайского и Иваньковского водохранилищ // Вод. ресурсы. 2007. Т. 34. № 3. С. 310–317.
- Кременецкая Е.Р., Перекальский В.М., Бреховских В.Ф., Ломова Д.В. О роли гидрометеорологических факторов в формировании аноксидной зоны в водохранилище долинного типа // Метеорология и гидрология. 2009. № 10. С. 69–78.
- Крылов А.В., Цветков А.И., Малин М.И. Вертикальное распределение зоопланктона малой реки // Поволжский экологический журнал. 2009. № 1. С. 47–53.
- Кутикова Л.А. Коловратки фауны СССР. Л.: Наука, 1970. 744 с.
- Куйбышевское водохранилище. Л.: Наука, 1983. 214 с.
- Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник). Тольятти: Ин-т экологии Волжского бассейна РАН, 2008. 123 с.
- Лазарева В.И. Структура и динамика зоопланктона Рыбинского водохранилища. М.: Т-во научн. изданий КМК, 2010. 181 с.
- Лазарева В.И. Потепление климата и его влияние на зоопланктон водохранилищ Волги // Экологический мониторинг. Часть VIII. Современные проблемы мониторинга пресноводных экосистем: учебное пособие. Н-Новгород: Нижегородский ун-т, 2014. С. 182–208.
- Лазарева В.И., Минеева Н.М. Жданова С.М. Пространственное распределение планктона в водохранилищах Верхней и Средней Волги в годы с различными термическими условиями // Поволжский экологический журнал. 2012. № 4. С. 394–407.
- Лазарева В.И., Копылов А.И., Соколова Е.А. и др. Велигеры дрейссенид в трофической сети планктона водохранилищ Волги // Дрейссениды: эволюция, систематика, экология. Лекции и матер. докл. 2-ой Международной школы-конф. Ин-т биологии внутр. вод РАН, 11–15 ноября 2013 г. Ярославль: Канцлер, 2013. С. 18–35.
- Лазарева В.И., Копылов А.И., Соколова Е.А. и др. Велигеры дрейссенид в трофической сети планктона Рыбинского водохранилища // Поволжский экологический журнал. 2015. № 1. С. 42–54.
- Литвинов А.С., Законнова А.В. Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении // Метеорология и гидрология. 2012. № 9. С. 91–96.

- Литвинов А.С., Законнова А.В. Многолетние изменения воднобалансовых характеристик Рыбинского водохранилища // Гидролого-гидрохимические исследования водоемов бассейна Волги. Ярославль: Филигрань, 2016. С. 23–29.
- Литвинов А.С., Кучай Л.А., Соколова Е.Н. Анализ динамики годового притока в Рыбинское водохранилище и его моделирование // Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 174–180.
- Литвинов А.С., Рощупко В.Ф. Термическая характеристика водохранилищ Волжского каскада // Формирование и динамика полей гидрологических и гидрохимических характеристик во внутренних водоемах и их моделирование. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 3–24.
- Литвинов А.С., Рощупко В.Ф. Многолетние и сезонные колебания уровня Рыбинского водохранилища и их роль в функционировании его экосистемы // Вод. ресурсы. 2007. Т. 34. №. 1. С. 33–40.
- Маловицкая Л.М. Летальные значения активной реакции среды (pH) и концентрации кислорода для *Eudiaptomus graciloides* (Lill.) и *E. gracilis* Sars (Copepoda, Calanoida) // Бюл. Ин-та биологии водохранилищ. 1961. № 11. С. 13–16.
- Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 254 с.
- Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Бассейн реки Камы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. Т. 1. Вып. 25. 707 с.
- Монаков А.В. Питание пресноводных беспозвоночных. М.: Ин-т проблем экологии и эволюции, 1998. 321 с.
- Никаноров А.М. Гидрохимия: Учебник, 2-е изд. перераб. и доп. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 444 с.
- Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.
- Перекальский В.М., Кременецкая Е.Р. Математическое моделирование термогидродинамического и кислородного режимов водоема // Метеорология и гидрология. 2007. № 6. С. 60–71.
- Пряничникова Е.Г., Тютин А.В., Щербина Г.Х. Сравнительный анализ поселений двух видов дрейссен (*Mollusca*, *Dreissenidae*) и фауны их эндосимбионтов в верхневолжских водохранилищах // Биология внутр. вод. 2011. № 2. С. 57–64.
- Пряничникова Е.Г. Дрейссены (*Mollusca*, *Dreissenidae*) верхнее-волжских водохранилищ // Поволжский экологический журнал. 2015. № 1. С. 64–71.
- Рыбинское водохранилище и его жизнь. Л.: Наука, 1972. 364 с.
- Сельскохозяйственная электронная библиотека знаний. Аммиак и соли аммония // Энциклопедии, словари, справочники. URL: <http://www.cnshe.ru/AKDiL/0033a/base/k0100001.shtml> (обращение сентябрь 2017 г.).
- Семенов А.Д. Практическое руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 540 с.
- Соколова Е.А. Влияние аномально высокой температуры на численность велигеров дрейссен (*Bivalvia*, *Dreissenidae*) в планктоне Рыбинского водохранилища // Поволж. экол. журн. 2015. № 1. С. 90–96.
- 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.
- Столбунова В. Н. Зоопланктон озера Плещеево. М.: Наука, 2006. 152 с.
- Столбунова В. Н. Велигеры дрейссены в верхневолжских водохранилищах: многолетняя и сезонная динамика численности, распределение // Поволжский экологический журнал. 2013. № 1. С. 71–80.
- Тимофеев М.А. Экологические и физиологические аспекты адаптации к абиотическим факторам среды эндемичных байкальских и палеарктических амфипод. Дис. ... д-р. биол. наук. Томск: Томский гос. ун-т, 2010. 384 с.
- Щербаков А.П. Озеро Глубокое. М.: Наука, 1967. 379 с.
- Щербина Г.Х. Годовая динамика макрозообентоса открытого мелководья Волжского плеса Рыбинского водохранилища // Зооценозы водоемов бассейна Верхней Волги в условиях антропогенного воздействия. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 108–144.
- Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения // М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
- Экологические проблемы Верхней Волги. Ярославль: Изд-во Ярославского гос. техн. ун-та, 2001. 427 с.
- Яготинцев В.Н., Поставик П.В. Уровень Каспийского моря в прошлом и настоящем // Тр. Географического общества Республики Дагестан. 2013. Вып. 41. С. 26–40.
- Adrian R., O'Reilly C.M., Zagareze H. et al. Lakes as sentinels of climate change // *Limnol. Oceanogr.* 2009. Vol. 54. № 6 (part 2). P. 2283–2297.
- Dodson S.I., Frey D.G. Cladocera and other Branchiopoda // *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*. New York: Academic Press Limited, 1991. P. 733–786.
- Horppila J., Kõngäs P., Niemistö J. et al. Oxygen flux and penetration depth in the sediments of aerated and non-aerated lake basins // *Int. Rev. Hydrobiol.* 2015. Vol. 100. P. 106–115.
- Ruttner-Kolisko A. Suggestion for biomass calculation of planktonic rotifers // *Arch. Hydrobiol. Ergebn. Limnol.* 1977. Bd.8. P. 71–78.
- Wilhelm S., Adrian R. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton // *Freshwater Biol.* 2008. Vol. 53. P. 226–237.

## REFERENCES

- Adrian R., O'Reilly C.M., Zagareze H. et al. 2009. Lakes as sentinels of climate change // *Limnol. Oceanogr.* Vol. 54. № 6 (part 2). P. 2283–2297.

- Anichkova N.I. 1959. Nekotoryye cherty gidrokhimicheskogo rezhima severnoy chasti Rybinskogo vodokhranilishcha [Some features of the hydrochemical regime of the northern part of the Rybinsk Reservoir] // Trudy Darvinskogo gosudarstvennogo zapovednika. № 5. P. 191–209. [In Russian]
- Balushkina E.V., Vinberg G.G. 1979. Zavisimost' mezhdu dlinoy i massoy tela planktonnykh rakoobraznykh [The relationship between the length and body mass planktonic crustaceans] // Eksperimental'nyye i polevyye issledovaniya biologicheskikh osnov produktivnosti ozer. Leningrad: Zoologicheskii Institut AN SSSR. P. 58–72. [In Russian]
- Brekhovskiy V.F. 1988. Gidrofizicheskiye faktory formirovaniya kislorodnogo rezhima vodoyemov [Hydrophysical Factors Forming the Oxygen Regime in Reservoirs]. Moscow: Nauka, 168 p. [In Russian].
- Brekhovskiy V.F., Vishnevskaya G.N., Kremenetskaya E.R. et al. 2006. Ob otsenke potrebleniya kisloroda raznymi tipami gruntov dolinnykh vodokhranilishch v letniy period [On the assessment of oxygen consumption by different types of soils in the valley reservoirs in summer] // Meteorologiya i Gidrologiya. № 10. P. 82–91. [In Russian]
- Butorin N.V. & Ekzertsev V.A. (ed.): 1978. Ivan'kovskoye vodokhranilishche i yego zhizn'. [The Ivankovo Reservoir and its life]. Leningrad: Nauka, 304 p. [In Russian]
- Butorin N.V., Kurdina T.N., Bakastov S.S. 1982. Temperatura vody i gruntov Rybinskogo vodokhranilishcha [The water and soils temperature of the Rybinsk Reservoir]. Leningrad: Nauka, 221 p. [In Russian]
- Debol'skiy V.K., Grigorjeva I.L., Komissarov A.V. et al. 2010. Sovremennaya gidrokhimicheskaya kharakteristika reki Volga i yeye vodokhranilishch [Current hydrochemical description of Volga River and its reservoirs] // Voda: khimiya i ekologiya. № 11. P. 2–12. [In Russian]
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2015 g. [A Report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2015]. 2016. Moscow: Rosgidromet, 68 p. [In Russian]
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2016 g. [A Report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2016]. 2017. Moscow: Rosgidromet, 70 p. [In Russian]
- Dodson S.I., Frey D.G. 1991. Cladocera and other Branchiopoda // Thorp J.H. and Covich A.P. (eds.) Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates. New York: Academic Press Limited, 1991. P. 733–786.
- Dratshev S.M., Butorin N.V., Bylinkina A.A. 1974. Faktory, opredelyayushchiye kachestvo vody v vodokhranilishchakh [Factors determining the quality of water in reservoirs] // Butorin N.V. (ed.) Faktory formirovaniya vodnykh mass i rayonirovaniye vnutrennikh vodoyemov. Leningrad: Nauka, P. 3–15. [In Russian]
- Dzyuban A.N. 2006. Mikrobiologicheskaya kharakteristika donnykh otlozheniy Verkhney Volgi v usloviyakh antropogennogo vozdeystviya [The microbial characteristics of bottom sediments in the Upper Volga under anthropogenic effect] // Biologiya vnutrennikh vod. № 1. P. 16–23. [In Russian]
- Edelstein K.K. 1998. Vodokhranilishcha Rossii: ekologicheskiye problemy, puti ikh resheniya [Reservoirs of Russia: ecological problems and ways of their solution]. Moscow: GEOS, 277 p. [In Russian]
- Ekologicheskiye problemy Verkhney Volgi [Ecological problems of the Upper Volga]. Yaroslavl: Izdatel'stvo Yaroslavskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2001. 427 p. [In Russian]
- Gidroekologiya ust'evykh oblastey pritokov ravninnogo vodokhranilishcha [Hydroecology of lowland water reservoir tributaries mouth]. Yaroslavl: Filigran, 2015. 466 p. [In Russian]
- Horppila J., Köngäs P., Niemistö J. et al. 2015. Oxygen flux and penetration depth in the sediments of aerated and non-aerated lake basins // Int. Rev. Hydrobiol. Vol. 100. P. 106–115.
- Izmeneniya urovney vodokhranilishch gidroelektrostantsiy (GES) RusGidro [Changes in the water levels of the reservoirs of the RusHydro HPP.] URL: <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/> (appeal to Juny 2017). [In Russian]
- Kashirskaya E.V., Toderash I.P., Pankratova V.Ya. 1983. Biokhimiya i fiziologiya [Biochemistry and Physiology] // Motyl *Chironomus plumosus* L.: sistematika, morfologiya, ekologiya, produktsiya. Moscow: Nauka, P. 127–147. [In Russian]
- Katalog stoka vody v Kaspiyskoye more. Reka Volga [General Catalogue of Caspian surface runoff. Volga River] // Koordinatsionnyy komitet po gidrometeorologii Kaspiyskogo morya. URL: <http://www.caspc.com/index.php?lang=1&proj=6> (appeal to August 2017). [In Russian]
- Krasnova E.S. 2010. Prostranstvennoye raspredeleniye geterotrofnnykh bakteriy v vodnoy tolshche Kamskikh vodokhranilishch [Spatial distribution of heterotrophic bacteria in the water column of Kamsky water reservoirs] // Nauchnoye nasledie V.I. Vernadskogo i sovremennyye problemy nauki. Mater. 1-oy Vseros. nauchno-prakt. konf. Cheboksary:Novoye vremya, 2010. P. 105–108. [In Russian]
- Kremenetskaya E.R. 2007. Assessment of the Oxygen Consumption Rate in the Water Column for the Mozhaisk and Ivankovo Reservoirs // Water Resources. Vol. 34. № 3. P. 287–294.
- Kremenetskaya E.R., Perekal'skiy V.M., Brekhovskiy V.F. et al. 2009. On the role of hydrometeorological factors in formation of the valley-type reservoir anoxic zone // Russ. Meteorol. Hydrol. Vol. 34. № 10. P. 680–686.
- Krylov A.V., Tsvetkov A.I., Malin M.I. 2009. Vertikal'noye raspredeleniye zooplanktona maloy reki [Vertical distribution of zooplankton in a small river] // Povolzh. Ekol. Zh. № 1. P. 47–53. [In Russian]
- Kutikova L.A. 1970. Kolovratki fauny SSSR [Rotifers of the USSR fauna]. Leningrad: Nauka, 744 p. [In Russian]
- Kuibyshevskoye vodokhranilishche (nauchno-informatsionnyy spravochnik) [Kuibyshev Reservoir (scientific and information guide)] / Tol'yatti: In-t ekologii Volzhskogo basseyna RAN, 2008. 123 p. [In Russian]
- Kuibyshevskoye vodokhranilishche [The Kuibyshev Reservoir]. Leningrad: Nauka, 1983. 214 p. [In Russian]
- Lazareva V.I. 2010. Struktura i dinamika zooplanktona Rybinskogo vodokhranilishcha [Zooplankton structure and dynamics in the Rybinsk Reservoir] Moscow: Tovarischestvo nauchnykh izdaniy KMK, 181 p. [In Russian]



- Lazareva V.I. 2014. Potepleniye klimata i yego vliyaniye na zooplankton vodokhranilishch Volgi [Climate warming and its impact on the zooplankton of the Volga Reservoirs] // *Ekologicheskiy monitoring. Chast' VIII. Sovremennyye problemy monitoringa presnovodnykh ekosistem: uchebnoye posobiye*. Nizhny Novgorod: Nizhegorodskiy universitet, P. 182–208. [In Russian]
- Lazareva V. I., Kopylov A. I., Sokolova E. A. et al. 2013. Veligery dreyssevid v troficheskoy seti planktona vodokhranilishch Volgi [Veliger of dreissenids in the trophic plankton net of Volga River reservoirs] // *Dreyssevidy: evolyutsiya, sistematika, ekologiya. Lektsii i materialy 2-oi Mezhdunarodnoi Shkoly-Konferentsii*. Institut biologii vnutrennikh vod RAN, Borok. Yaroslavl: Kantsler, 2013. P. 18–35. [In Russian]
- Lazareva V. I., Kopylov A. I., Sokolova E. A. et al. 2016. Veliger Larvae of Dreissenids (Bivalvia, Dreissenidae) in the Plankton Foodweb of Rybinsk Reservoir // *Biol. Bull.* Vol. 43. № 10. P. 1313–1321.
- Lazareva V. I., Mineeva N. M., Zhdanova S. M. 2014. Spatial Distribution of Plankton from the Upper and Middle Volga Reservoirs in Years with Different Thermal Conditions // *Biol. Bull.* Vol. 41. № 10. P. 869–878.
- Litvinov A.S., Kuchay L.A., Sokolova E.N. 2015. Analiz dinamiki godovogo pritoka v Rybinskoye vodokhranilishche i yego modelirovaniye [Analysis of the dynamics of the annual influx into the Rybinsk Reservoir and its modeling] // *Nauchnoye obespecheniye realizatsii Vodnoy strategii Rossiyskoy federatsii na period do 2020 goda*. Petrozavodsk: Karelskiy nauchnyy tsentr RAN, P. 174–180. [In Russian]
- Litvinov A.S., Roshchupko V.F. 1993. Termicheskaya kharakteristika vodokhranilishch Volzhskogo kaskada [Thermal characteristics of the Volga cascade reservoirs] // *Formirovaniye i dinamika poley gidrologicheskikh i gidrokhimicheskikh kharakteristik vo vnutrennikh vodoyemakh i ikh modelirovaniye*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, P. 3–24. [In Russian]
- Litvinov A.S., Roshchupko V.F. 2007. Long-Term and Seasonal Water Level Fluctuations of the Rybinsk Reservoir and Their Role in the Functioning of Its Ecosystem // *Water Resources*. Vol. 34. № 1. P. 27–34.
- Litvinov A.S., Zakonnova A.V. 2012. Thermal regime in the Rybinsk Reservoir under global warming // *Russ. Meteorol. Hydrol.* Vol. 37. № 9. P. 640–644.
- Litvinov A.S., Zakonnova A.V. 2016. Mnogoletniye izmeneniya vodnobilansovykh kharakteristik Rybinskogo vodokhranilishcha. [Long-term changes in water balance characteristics of the Rybinsk Reservoir] // *Gidrologo-gidrokhimicheskiye issledovaniya vodoyemov basseyna Volgi*. Yaroslavl: Filigran, P. 23–29. [In Russian]
- Malovitskaya L.M. 1961. Letal'nyye znacheniya aktivnoy reaktsii sredy (pH) i kontsentratsii kisloroda dlya *Eudiaptomus graciloides* (Lill.) i *E. gracilis* Sars (Copepoda, Calanoida) [Lethal values of the active reaction (pH) and oxygen concentration for *Eudiaptomus graciloides* (Lill.) and *E. gracilis* Sars (Copepoda, Calanoida)] // *Byulleten Instituta biologii vodokhranilishch*. № 11. P. 13–16. [In Russian]
- Metodika izucheniya biogeotsenozov vnutrennikh vodoyemov [The method of biogeocenose studying of inland waterbodies]. Moscow: Nauka, 1975. 254 p. [In Russian]
- Mnogoletniye dannyye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sush. Basseyn reki Kamy [Long-term data on the regime and resources of surface waters of the land. The Kama river basin]. 1988. Leningrad: Gidrometeoizdat, T. 1. Issue 25. 707 p. [In Russian]
- Monakov A.V. 1998. Pitaniye presnovodnykh bespozvonochnykh [Feeding of freshwater Invertebrates]. Moscow: Institut problem ekologii i evolutsii, 321 p. [In Russian]
- Nikanorov A.M. 2001. Gidrokhiya: Uchebnik, 2-ye izd. pererabotannoye i dopolnennoye. [Hydrochemistry: A Textbook, 2nd ed. recycled and additional]. St-Petersburg: Gidrometeoizdat, 444 p. [In Russian]
- Odum E.P. 1971. Fundamentals of Ecology. Philadelphia: Saunders Company, 740 p.
- Perekal'skiy V.M., Kremenetskaya E.R. 2007. Mathematical modeling of thermodynamic and oxygen regimes in a reservoir // *Russ. Meteorol. Hydrol.* Vol. 32. № 6. P. 388–396.
- Pryanichnikova E.G 2016. Dreissenid species (Mollusca, Dreissenidae) in the Upper Volga reservoirs // *Biol. Bull.* Vol. 43. № 10. P. 1322–1326.
- Pryanichnikova E. G., Tyutin A. V., Shcherbina G. K. 2011. Comparative analysis of the structure and fauna of endosymbionts of communities of two dreissenid species (Mollusca, Dreissenidae) in the Upper Volga reservoirs // *Inland Water Biology*. T. 4. № 2. C. 203–210.
- Ruttner-Kolisko A. 1977. Suggestion for biomass calculation of planktonic rotifers // *Arch. Hydrobiol. Ergebn. Limnol.* Bd.8. P. 71–78.
- Rybinskoye vodokhranilishche i yego zhizn' [The Rybinsk Reservoir and its life]. Leningrad: Nauka, 1972. 364 p. [In Russian]
- Sel'skokhozyaystvennaya elektronnyaya biblioteka znaniy. Ammiak i soli ammoniya [Agricultural Knowledge Electronic Library. Ammonia and ammonium salts] // Encyclopedias, reference books. URL: <http://www.cnsnb.ru/AKDIL/0033a/base/k0100001.shtm> (appeal to September 2017). [In Russian]
- Semenov A.D. 1977. Prakticheskoye rukovodstvo po khimicheskoye analizu vod sush [Practical guidance on the chemical analysis of land waters]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 540 p. [In Russian]
- Sokolova E. A. 2015. Vliyaniye anomal'no vysokoy temperatury na chislennost' veligerov dreyssevid (Bivalvia, Dreissenidae) v planktone Rybinskogo vodokhranilishcha [Effect of anomalously high temperatures on the abundance of dreissenid veligers (Bivalvia, Dreissenidae) in plankton of the Rybinsk reservoir] // *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal*. № 1. C. 90–96. [In Russian]
- Stepanova I.E., Bikbulatova E.M.. 2016. Importance of the forms of nutrients for assessment of the modern state of Rybinsk reservoir // *Biol. Bull.* Vol. 43. № 10. P. 1401–1406.

- Stolbunova V. N. 2006. Zooplankton озера Pleshcheyevo [Zooplankton of Lake Pleshcheyevo]. Moscow: Nauka, 152 p. [In Russian]
- Stolbunova V.N. 2013. Veligery dreyssey v verkhnevolzhskikh vodokhranilishchakh: mnogoletnyaya i sezonnaya dinamika chislennosti, raspredeleniye [Dreissena veligers in the upper Volga reservoirs: long-term and seasonal abundance dynamics and distribution] // Povolzhskii ekologicheskii zhurnal. № 1. С. 71–80. [In Russian]
- Shcherbakov A.P. 1967. Ozero Glubokoe [Lake Glubokoe]. Moscow: Nauka, 379 p. [In Russian]
- Shcherbina G.Kh. 1993. Godovaya dinamika makrozoobentosa otkrytogo melkovod'ya Volzhskogo plesa Rybinskogo vodokhranilishcha [Annual dynamics of macrozoobenthos in open shallows of the Volga reaches of the Rybinsk reservoir] / Zootsenozy vodoyemov basseyna Verkhney Volgi v usloviyakh antropogennogo vozdeystviya. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, P. 108–144. [In Russian]
- The River Volga and its Life. The Hague: Junk Publishers, 1979. 473 p.
- Timofeev M.A. 2010. Ekologicheskiye i fiziologicheskiye aspekty adaptatsii k abioticheskim faktoram sredy endemichnykh baykal'skikh i palearkticheskikh amfipod [Ecological and physiological aspects of adaptation to abiotic environmental conditions of Baikalian endemic and Palearctic amphipods]. Dissertatsiya ... doktora biologicheskikh nauk. Tomsk: Tomskiy gosudarstvennyy universitet, 384 p. [In Russian]
- Vodnyy balans i kolebaniya urovnya Kaspiyskogo morya. Modelirovaniye i prognoz [Water balance and level fluctuations of the Caspian Sea. Modeling and prediction]. Moscow: Triada, 2016. 378 p. [In Russian]
- Vodokhranilishcha [A Reservoirs] // Rosvodresursy. URL: <http://voda.mnr.gov.ru/reservoirs/detail.php?ID=7338> (appeal to Februar 2018).
- Vorobiev D.S., Frank Yu.A., Zaliznyy N.A. et al. 2008. K voprosu ustoychivosti *Limnodrilus hoffmeisteri* (Oligochaeta, Tubificidae) k neftyanomu zagryazneniyu [Stability of *Limnodrilus hoffmeisteri* (Oligochaeta, Tubificidae) to oil pollution] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. № 2. P. 83–88. [In Russian]
- Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshcheye rezyume [The second assessment report of Roshydromet on climate change and their consequences on the territory of the Russian Federation. General summary]. 2014. Moscow: Rosgidromet, 61 p. [In Russian]
- Wilhelm S., Adrian R. 2008. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton // Freshwater Biol. Vol. 53. P. 226–237.
- Zakonova A.V., Litvinov A.S. 2016. Mnogoletniye izmeneniya gidroklimaticheskogo rezhima Rybinskogo vodokhranilishcha [Long-term changes in the hydroclimatic regime of the Rybinsk Reservoir] // Gidrologo-gidrokhimicheskiye issledovaniya vodoyemov basseyna Volgi. Yaroslavl: Filigran, P. 16–22. [In Russian]
- Zhdanova S.M., Lazareva V.I. 2009. Vidovoy sostav i prostranstvennoye raspredeleniye letnego (iyul') zooplanktona озера Glubokogo [Species composition and spatial distribution of zooplankton of Lake Glubokoe in July 2008] // Trudy Gidrobiologicheskoy stantsii na Glubokom озере. Moscow: Tovarischestvo nauchnykh izdaniy KMK, Vol. 10. P. 51–66. [In Russian]

## THE OXYGEN REGIME IN THE VOLGA AND KAMA RESERVOIRS DURING THE PERIOD OF CLIMATE WARMING: IMPACT ON ZOOPLANKTON AND ZOOBENTHOS

V. I. Lazareva, I. E. Stepanova, A. I. Tsvetkov, E. G. Pryanichnikova, S. N. Perova

*Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences,*

*Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, 152742 Russia,*

*e-mail: [lazareva\\_v57@mail.ru](mailto:lazareva_v57@mail.ru)*

In summer 2015–2016, the thermal structure and oxygen regime were studied in 11 reservoirs of the Volga-Kama cascade. Changes in the composition and structure of zooplankton and zoobenthos have been analyzed under conditions of dissolved oxygen deficiency. It has been found that water heating more often exceeded the norm by 1.5–6°C; in all reservoirs warming up of water was especially strong in summer 2016. In June, the oxygen regime was favorable for all hydrobionts over the entire Volga, and in August it was favorable in the Middle and Lower Volga and in the Kama River downstream the dam of the Votkinsk hydroelectric power station. Concentrations of oxygen (<5 mg/L) critical for animals were recorded near the bottom layers in two reservoirs (Ivankovo and Uglich) in August 2015 and in five reservoirs (Ivankovo, Uglich, Rybinsk, Kama, and Votkinsk) in August 2016. The layer with O<sub>2</sub> from <1 to 5 mg/L occupied locally 10–60% of the water column; oxygen deficiency varied from 30% at stations in the Rybinsk Reservoir to 90% in the Ivankovo and Uglich reservoirs. Anaerobic conditions were formed in the hypolimnion in the deepest parts of reservoirs near dams of hydroelectric power stations at water heating up to 23–25°; in the upper reaches of some of them (Ivankovo and Uglich) the low O<sub>2</sub> content was recorded in the entire water column, and lack of oxygen was observed in extended parts from 35 to >200 km in the Volga and Kama channels. Mortality of invertebrates and fish was registered visually during field surveys. Long-term (from 2011) studies in waterbodies of the Upper Volga indicate the increase in the frequency of summer (July–August) oxygen deficiency occurrence in the near-bottom layer, the period of its duration and the thickness of the above-bottom oxygen-deficient layer. It is found that strong water warming (>20°C) causes the formation of oxygen deficiency in deep water layers. The conditions of oxygen deficiency cause the decrease in the species richness and abundance of benthos and plankton crustaceans (Cladocera, Cal-

anoida, Amphipoda), disruption of the reproduction process, decrease in the abundance of bivalve mollusks of the family Dreissenidae, changes in the vertical distribution of zooplankton, and decrease in the portion of filterers in plankton and benthos. Zooplankton filterers disappear from the composition of dominant species at the thickness of the layer with  $O_2 < 5$  mg/L more than 50% of the water column; all crustaceans are absent in the entire water column at the content of  $O_2 < 4$  mg/L and rotifers dominate in plankton. The toxic effect of ammonia and hydrogen sulphide as additional factors deteriorating the state of hydrobionts under conditions of high water temperature and the lack of dissolved oxygen is discussed.

*Keywords:* climate warming, Volga River, Kama River, reservoirs, water temperature, dissolved oxygen deficiency, zooplankton, zoobenthos, vertical distribution, structure, abundance



## COMPOSITION AND CONTENT OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS IN PLANKTON OF THE VOLGA RIVER RESERVOIRS (2015–2016)

N. M. Mineeva

*Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences,  
Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, 152742 Russia, e-mail: mineeva@ibiw.yaroslavl.ru*

Data on the composition and content of photosynthetic pigments in plankton of the Volga River reservoirs in the summer period of 2015 and 2016 are under consideration. Chlorophyll content determined by standard spectrophotometric and fluorescent methods correlate with each other ( $R^2 = 0.78$ ). The average concentration of chlorophylls (Chl  $a+b+c$ ) in June in the Kuibyshev, Saratov, and Volgograd reservoirs was 4.0–5.5  $\mu\text{g/L}$ , in Gorky and Cheboksary reservoirs 10.0–14.7  $\mu\text{g/L}$ , in unregulated part of the Lower Volga 22.5  $\mu\text{g/L}$ . Chl  $a+b+c$  content in August was 20.5–34.4  $\mu\text{g/L}$  in five upper reservoirs of the cascade, 6.3 and 6.7  $\mu\text{g/L}$  in Kuibyshev and Saratov reservoirs (2015), 10.9  $\mu\text{g/L}$  in Gorky reservoir, and 16.3–26.4  $\mu\text{g/L}$  in others (2016). Chl  $a$  prevails in the fund of the green pigments (71–85% in June, 67–93% in August), the share of Chl  $c$  is 6–29%, the share of Chl  $b$  is 1–9%. Pheopigments content is equal to 26–78%, the plant carotenoids and chlorophyll content is commensurable. The contribution of blue-green algae (an average of 36–56% in June and 60–90% in August) and diatoms (40–60% and 9–40%) to the total amount of Chl  $a$  corresponds to the taxonomic composition of the Volga phytoplankton. The trophic status of the reservoirs of the Middle Volga in the early summer is characterized as mesotrophic and only Cheboksary reservoir is moderate eutrophic. At the height of the summer, Ivankovo, Uglich, and Cheboksary reservoirs are considered eutrophic category. The status of the Rybinsk reservoir during the study period varies from moderate eutrophic to eutrophic, Gorky reservoir from mesotrophic to eutrophic, Kuibyshev reservoir from mesotrophic to moderately eutrophic. Reservoirs of the Lower Volga are characterized as mesotrophic.

**Keywords:** photosynthetic pigments, Volga River reservoirs, trophic state

DOI 10.24411/0320-3557-2018-1-0006

### INTRODUCTION

The study of the autotrophic component of aquatic ecosystems is a crucial element of ecological research. In the process of photosynthesis, planktonic algae produce the main stock of organic matter in large lakes and reservoirs, creating an energy base for organisms of higher trophic levels. Among the indicators of the abundance and functioning of phytoplankton, a special place is given to photosynthetic pigments, which have been used extensively throughout the last decade to obtain operative information on the development and state of algocoenoses. Chlorophyll  $a$  (Chl  $a$ ) that is the main pigment of green plants characterizes the production capabilities of algae, serves as a marker of their biomass, constitutes the basis of trophic classification of water bodies and is among the indicators of water quality [Vinberg, 1960, Kitaev, 2007].

There are numerous, but scattered data on the content and composition of photosynthetic pigments in the plankton of the Volga. Most of the research was carried out at individual reser-

voirs, with only a few covering several reservoirs [Pyrina, 1966; Kovalevskaya, Karabanovich, 1975; Mineeva, 2006; Mineeva et al., 2008] and single studies describing the cascade as a whole [Mineeva, 1995, 2004]. However, it is the latter data that are of interest for a comparative assessment of the development and status of phytoplankton in the cascade of water reservoirs located in different geographic zones. This is the data necessary for carrying out environmental monitoring, analysis and forecasting of changes that occur in the water ecosystem under anthropogenic impact and require constant control over the state of the aquatic environment.

The purpose of this work is to study the composition and content of photosynthetic pigments in the water of the Volga River reservoirs at the present stage, to estimate the distribution of phytoplankton and its major large taxa (divisions), to analyze the trends of long-term changes in the productivity of the Volga phytoplankton.

### MATERIAL AND METHODS

The pigment content was determined by standard spectrophotometric method [SCOR-UNESCO, 1966; Lorenzen, Jeffrey, 1980] and fluorescent method [Gold et al., 1986; Gaevsky et al., 1993] at the river bed stations of the Volga reservoirs in August 2015 (64 stations), June and August 2016 (73 and 71 stations). Integral sam-

ples obtained by mixing equal volumes of water taken from each meter of the water column from the surface to the bottom with an Elgmork plastic water sampler were used for the analysis. For spectrophotometry, algae were precipitated onto Vladisart membrane filters (pore diameter 3–5  $\mu\text{m}$ ) covered with a layer of calcium carbonate

and silicon dioxide. Filters were stored in a refrigerator prior to analysis. The pigments were identified in 90% acetone extract on spectrophotometer Lambda25 (PerkinElmer), concentrations of chlorophylls (Chl *a*, Chl *b*, Chl *c*), their degradation products – phaeopigments and plant carotenoids were calculated by the respective formulas [Parsons, Strickland, 1963; Lorenzen, 1967; Jeffrey, Humphrey, 1975]. To assess the state of phytoplankton, the pigment index  $E_{480}/E_{664}$ , the ratio of optical densities at the maxima of absorption of carotenoids and chlorophyll, was used [Watson, Osborn, 1979].

Fluorescence of chlorophyll was measured on board of the research vessel in natural water on a stationary fluorimeter PFL-3004 (Krasnoyarsk University). Modification of the method is based on the specifics of light-harvesting pigment-protein complexes of the diatoms (containing Chl *a*, *c* and fucoxanthin), blue-green (Chl *a* and phycobilins), and green (Chl *a* and Chl *b*) algae. The fluorescence intensity  $F_{\lambda}^0$  was measured in the red region of the spectrum ( $\sim 680$  nm) when excited by light with wavelengths ( $\lambda$ ) of 410, 490 and 540 nm. The measurement was repeated after the addition of ETC inhibitor simazine (at a concentration of  $10^{-5}$  M) to the cuvette, thereby increasing the fluorescence yield to a maximum level of  $F_{\lambda}^{max}$ . To introduce a correction for the presence of colored organic matter, at the same wavelengths, fluorescence of water ( $F_{\lambda}^f$ ) filtered through a membrane filter with a pore diameter of  $\sim 0.5$   $\mu\text{m}$ , i.e., devoid of algae, was measured. For calculations, a system of linear equations including a "pure" fluorescence signal ( $F_{\lambda}^{max} - F_{\lambda}^f$  and  $F_{\lambda}^0 - F_{\lambda}^f$ ) was used for the three indicated wave-

lengths [Gold et al., 1986; Gaevsky et al., 1993]. Total Chl *a* content was calculated as the sum of its concentration in diatom, blue-green and green algae (respectively, Bacillariophyta – Chl<sub>Bac</sub>, Cyanophyta – Chl<sub>Cyan</sub>, Chlorophyta – Chl<sub>Chlor</sub>).

For calculations, statistical processing of data and plotting charts, standard programs for a personal computer were used.

Trophic status of reservoirs was evaluated by the average content of Chl *a*, considering values of 3–10, 10–15 and 15–30  $\mu\text{g/L}$  respectively, as boundary for mesotrophic, moderate eutrophic and eutrophic waters [Mineeva, 2000b]. Distribution of phytoplankton over the water area in reservoirs was assessed using a coefficient of variation ( $C_V$ ) in the average concentrations of Chl *a*.

Volga River cascade spans for over 2500 km from north to south and consists of eight large (surface area from 249 to 6150  $\text{km}^2$ ) relative shallow (average depth 3.4–10 m) water reservoirs, differing in morphometry, drainage area, intensity of water exchange, as well as a number of hydrological and hydrochemical characteristics. From the Upper Volga to the Lower Volga, the transparency of water and the total sum of ions (electrical conductivity) increase, and the color of water decreases. The high content of nutrients throughout the cascade does not limit the development of phytoplankton [The River Volga ..., 1979; Rivers of Europe, 2009]. During the study periods, the average water temperature in the reservoirs was 16.9–18.7°C in June, and with the maximum warming of the water column in August, 18.0–20.9°C in 2015 and 21.9–24.7°C in 2016.

## RESULTS AND DISCUSSION

The study of the summer phytoplankton is of considerable interest, as negative trends caused by eutrophication or climate changes become apparent in the ecosystem of the reservoir during this season. Observations carried out in June refer to the seasonal change of plankton communities – the end of the spring forms vegetation and the beginning of summer forms development. During this period, the abundance of phytoplankton usually decreases. The data obtained in August are confined to the period of maximum warming of the water and, as a rule, capture the summer maximum of phytoplankton, which is indicative of the state of the reservoir.

Spectrophotometric method allows obtaining a set of characteristics, the attributes of the state and degree of community development. The green pigment pool is formed by the total content of chlorophylls *a*, *b*, *c* (Chl *a+b+c*). In June 2016 it fluctuated having values typical for early sum-

mer: the minimum was 1.5–5.7  $\mu\text{g/L}$ , the maximum – from 9.0 to 37.8  $\mu\text{g/L}$ , in reservoirs of the Middle and Lower Volga. Maximum values for individual reservoirs differed by a factor of 4–9. The average concentration of Chl *a+b+c* varied from 4.0–5.5  $\mu\text{g/L}$  in Kuibyshev, Saratov, and Volgograd reservoirs to 10.0–14.7  $\mu\text{g/L}$  in Gorky and Cheboksary reservoirs and was maximum (22.5  $\mu\text{g/L}$ ) in the unregulated Lower Volga area from Volgograd to Astrakhan (Table 1).

In August, the content of Chl *a+b+c* was typical for the summer peak of phytoplankton. In 2015, the minimum values for water bodies varied from 2.4 to 18.4  $\mu\text{g/L}$ , maximum – from 9.9 to 96  $\mu\text{g/L}$ , mean – from 20.5 to 34.4  $\mu\text{g/L}$  in the five upper reservoirs and decreased to  $\sim 6$   $\mu\text{g/L}$  in Kuibyshev and Saratov reservoirs.

**Table 1.** Phytoplankton pigment composition in the Volga River reservoirs based on spectrophotometric method

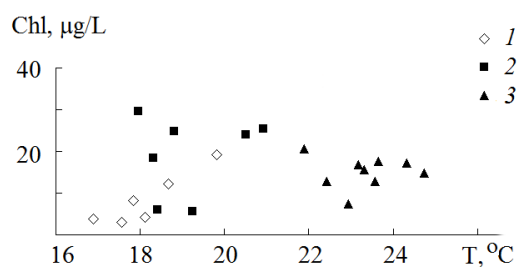
Water reservoir	Year, month	Chl <i>a+b+c</i> , μg/L	Chl <i>a</i> , %	Chl <i>b</i> , %	Chl <i>c</i> , %	Phaeo-pigments, %	Carotenoids, μSPU/L	E <sub>480</sub> /E <sub>664</sub> , Rel. units
Ivankovo	2015, VIII	<u>14.1–67.4</u> 27.3±4.4	<u>78–92</u> 89±1.3	<u>2.0–9.7</u> 6.0±0.7	<u>5.2–12</u> 7.1±0.6	<u>31–72</u> 49±4.5	<u>9.0–39.7</u> 16.1±2.7	<u>0.73–1.11</u> 0.87±0.04
	2016, VIII	<u>13–59</u> 26.4±5.0	<u>52–91</u> 77±4.6	<u>2.1–13</u> 7.0±1.1	<u>6.9–35</u> 16±3.9	<u>23–66</u> 43±4.4	<u>8.6–51.4</u> 18.9±4.1	<u>0.85–2.41</u> 1.29±0.16
	2015, VIII	<u>17.2–41.7</u> 28.7±3.2	<u>87–92</u> 89±0.5	<u>3.0–5.8</u> 4.3±0.3	<u>5.3–7.8</u> 6.8±0.3	<u>31–48</u> 40±1.8	<u>10.3–22.1</u> 16.1±2.0	<u>0.73–0.85</u> 0.78±0.01
Uglich	2016, VIII	<u>16.5–38.1</u> 22.9±2.5	<u>82–91</u> 86±1.0	<u>2.6–7.6</u> 4.7±0.7	<u>6.3–12</u> 8.9±0.6	<u>25–65</u> 36±5.7	<u>10.8–26.3</u> 15.6±1.9	<u>0.85–1.06</u> 1.00±0.03
	2015, VIII	<u>18.4–47.4</u> 30.6±2.4	<u>89–96</u> 93±0.5	<u>0.0–2.7</u> 1.1±0.2	<u>5.6–8.7</u> 7.0±0.2	<u>20–48</u> 37±2.6	<u>18.5–35.5</u> 25.8±1.2	<u>0.79–1.28</u> 1.07±0.04
	2016, VIII	<u>11.0–39.5</u> 18.1±2.1	<u>54–94</u> 71±3.7	<u>0.6–9.3</u> 4.5±0.5	<u>4.3–36</u> 24±3.4	<u>15–46</u> 30±2.1	<u>7.3–36.6</u> 16.1±2.1	<u>0.93–2.34</u> 1.54±0.12
Rybinsk	2015, VIII	<u>12.6–25.7</u> 20.5±1.2	<u>86–94</u> 90±0.7	<u>0.3–5.1</u> 2.7±0.4	<u>5.4–9.9</u> 7.6±0.4	<u>26–48</u> 36±2.1	<u>8.4–22.6</u> 14.3±1.2	<u>0.76–1.24</u> 0.99±0.04
	2016, VI	<u>3.6–17.9</u> 10.0±1.3	<u>67–88</u> 80±1.5	<u>2.7–12</u> 6.3±0.8	<u>8.3–21</u> 13±0.9	<u>39–74</u> 54±3.1	<u>2.3–11.7</u> 7.0±0.8	<u>0.83–1.53</u> 1.17±0.05
	2016, VIII	<u>5.4–24.5</u> 10.9±1.5	<u>57–90</u> 67±3.6	<u>1.5–7.2</u> 4.2±0.5	<u>6.7–36</u> 29±3.5	<u>41–68</u> 48±2.6	<u>6.1–28.9</u> 10.8±1.6	<u>0.90–2.40</u> 1.93±0.17
Cheboksary	2015, VIII	<u>6.0–96.1</u> 34.4±10.7	<u>83–94</u> 90±1.2	<u>1.3–7.4</u> 3.8±0.7	<u>4.7–9.5</u> 6.7±0.5	<u>30–69</u> 45±4.2	<u>2.6–48.5</u> 18.2±5.0	<u>0.67–1.09</u> 0.83±0.06
	2016, VI	<u>4.0–37.8</u> 14.7±3.5	<u>68–89</u> 80±2.4	<u>2.9–14</u> 7.7±1.1	<u>8.3–19</u> 12±1.3	<u>59–91</u> 70±3.5	<u>2.1–24.8</u> 9.7±2.4	<u>0.92–1.35</u> 1.10±0.05
	2016, VIII	<u>6.5–67.4</u> 18.9±7.1	<u>78–95</u> 87±2.3	<u>0.5–6.8</u> 3.7±0.9	<u>3.8–15</u> 9.0±1.6	<u>18–50</u> 35.4±4.1	<u>5.7–43.7</u> 12.7±4.2	<u>0.84–1.46</u> 1.03±0.07
Kuibyshev	2015, VIII	<u>2.4–11.3</u> 6.8±0.8	<u>81–95</u> 89±1.4	<u>0.1–7.4</u> 2.9±0.7	<u>4.6–14</u> 8.1±0.8	<u>11–49</u> 26±3.1	<u>1.6–8.0</u> 4.2±0.6	<u>0.79–1.15</u> 0.95±0.03
	2016, VI	<u>2.0–9.3</u> 4.0±0.6	<u>54–86</u> 71±2.7	<u>3.1–14</u> 8.2±1.0	<u>11–32</u> 20±2.0	<u>46–95</u> 78±5.5	<u>0.9–5.4</u> 2.6±0.3	<u>0.81–1.69</u> 1.30±0.07
	2016, VIII	<u>6.8–36.6</u> 16.3±3.2	<u>86–95</u> 91±1.0	<u>0.5–7.9</u> 3.1±0.9	<u>4.6–8.2</u> 6.1±0.5	<u>16–41</u> 28±3.0	<u>5.0–21.5</u> 11.4±1.9	<u>0.81–1.11</u> 0.97±0.03
Saratov	2015, VIII	<u>3.5–9.9</u> 6.3±1.0	<u>87–95</u> 91±1.4	<u>0.4–3.3</u> 1.7±0.5	<u>4.2–10</u> 7.1±0.9	<u>24–40</u> 30±2.3	<u>2.3–7.1</u> 4.1±0.9	<u>0.85–1.00</u> 0.89±0.02
	2016, VI	<u>1.5–9.0</u> 4.6±1.0	<u>61–89</u> 79±3.8	<u>0.8–11</u> 4.7±1.4	<u>10–28</u> 16±2.4	<u>44–82</u> 61±5.1	<u>1.0–5.1</u> 2.9±0.6	<u>0.86–1.58</u> 1.08±0.09
	2016, VI	<u>2.5–18.6</u> 5.5±1.6	<u>65–84</u> 75±2.1	<u>6.8–13</u> 8.9±0.7	<u>8.8–24.0</u> 15±1.6	<u>33–68</u> 46±3.7	<u>1.2–10.6</u> 3.0±0.9	<u>0.82–1.26</u> 1.06±0.05
Unregulated Low Volga	2016, VI	<u>5.7–35.8</u> 22.5±2.5	<u>78–87</u> 85±0.6	<u>3.6–8.7</u> 5.0±0.3	<u>7.5–13</u> 10±0.3	<u>30–71</u> 51±3.2	<u>3.4–25.9</u> 14.4±1.7	<u>0.84–1.08</u> 0.92±0.02

**Note.** Here and in Table 2 top – limits, bottom – average values with standard error. SPU – Specific Pigment Unit – unit close to 1 mg used to measure carotenoids.

In 2016, the minimum concentrations of Chl *a+b+c* were 5.4–16.5 μg/L, the maximum concentrations – 24.5–67.4 μg/L, the average concentrations – from 10.9 μg/L in the Gorky reservoir to 16.3–26.4 μg/L in all other. Maximum values differed by a factor of 2–5 for each reservoir, i.e., to a lesser extent than those seen in June, and only in the Cheboksary reservoir they differed by an order of magnitude. In August 2015, in most reservoirs, the concentrations of Chl *a+b+c* were higher than in August 2016, despite the less intense warming of the water column. Only in the Kuibyshev reservoir higher values were obtained in 2016. Inter-annual differences in Chl *a+b+c* were 1.4–1.9

times in Uglich, Rybinsk, Gorky, and Cheboksary reservoirs, but were absent in Ivankovo reservoir (Table 1).

The results of the correlation analysis showed that at the height of summer the chlorophyll content did not depend on the water temperature ( $R^2 < 0.05$  in August both years). This is consistent with the previously assessed complex effect of abiotic factors on the development of Volga phytoplankton [Litvinov, Mineeva 1997]. At the same time, the correlation was close in June ( $R^2 = 0.85$ ) during the warming of the water column (Fig. 1).



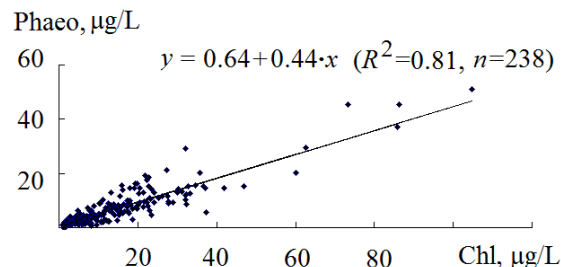
**Fig. 1.** Dependence of chlorophyll content on water temperature (reservoir mean values). 1 – June 2016, 2 – August 2015, 3 – August 2016.

The basis of the green pigment pool of freshwater phytoplankton is Chl *a*, which is contained in all plant cells. As before [Mineeva 2000a], the content of Chl *a* and the total amount of chlorophylls closely correlate with each other ( $R^2 = 0.98$ ). The relative amount of Chl *a* in the Chl *a+b+c* pool varied within 54–89% in June, being 71–85% of this pool on average in reservoirs. In August, the share of Chl *a* increased as compared to June: the limiting values up to 78–96% in 2015 and 52–95% in 2016, the average for reservoirs – respectively up to 87–93% and 67–91% (Table 1).

High (> 90%) relative content of Chl *a* indicates a prevalence of blue-green algae that do not contain additional Chl *b* and Chl *c*. At the height of summer in 2015 and 2016 such values were noted at 27 and 18 stations, respectively. The mean concentration of Chl *a* for these stations made  $27.5 \pm 3.3$  µg/L and was close to the 30 µg/L that is the boundary value for the water bloom [Sirenko, Gavrilenko, 1978]. (We should point out that the lower proportion of Chl *a* corresponded to its lower concentration: at a fraction <70%, it was  $8.0 \pm 2.5$  µg/L, at 70–90% it was  $17.3 \pm 1.5$  µg/L). In general, the percentage of Chl *a* became higher in total amount of chlorophylls compared with the early 1990s when the mean values for reservoirs were 46–70% in June and 60–85% in August [Mineeva, 1995, 2004].

The relative amount of Chl *c* contained in the cells of the diatoms ranged from 7.5 to 28% in June; from 4 to 14% in August in 2015 and up to 38% in 2016. The average for reservoirs was 10–20% in June, 7–8% and 6–29% in August of two years. The proportion of Chl *b*, a component of the pigment complex of green algae, was less variable and varied from <1 to 10–13% in all observation periods, with an average of 5–9% in June and 1–7% in August (Table 1). The contribution of additional chlorophylls to the green pigment pool at the height of summer did not decrease as much as early in the summer, as was noted in 1990s. [Mineeva, 1995, 2004].

Phaeopigments, the products of chlorophyll decomposition formed with the dying out of algae and their consumption by zooplankton, remain in the seston and sediments for a long time, and always present in the waterbody. The concentration of phaeopigments is closely related to the concentration of chlorophyll (Fig. 2).



**Fig. 2.** Relationship between chlorophyll *a* (Chl) and phaeopigments (Phaeo) in the Volga River reservoirs.

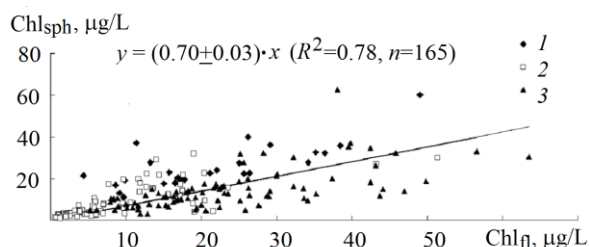
The regression coefficient in the equation makes it possible to estimate the average percentage of chlorophyll derivatives, and the free term is explained by the constant presence of phaeopigments in the water column. The relative amount of phaeopigments in the Volga reservoirs is represented as typical values for fresh waters, as a rule, maximum in early summer and late autumn and lower in the height of summer [Mineeva, 1995]. The limits are 30–95% in June and 11–72% in August of both years, and the averages are 46–78% and 26–49%, respectively (Table 1).

The content of plant carotenoids that carry out light-harvesting and protective functions of excessive insolation in the cell, is commensurate with the content of chlorophyll. At different observation periods, it varied from a minimum of 1–18 µSPU/L to a maximum of 5–51 µSPU/L at a mean of 2.6–25.8 µSPU/L (Table 1). The dynamics of carotenoids repeats the dynamics both of Chl *a* ( $R^2 = 0.96$ ) and the total content of green pigments ( $R^2 = 0.98$ ). On the basis of this relationship, the yellow pigments are considered as a marker of phytoplankton biomass [Foy, 1987]. However, the quantitative ratio of yellow and green pigments, the indicator of the physiological state of the algocoenoses, is more widespread, and the excess of carotenoid content over chlorophyll is a sign of the algae unfavorable state [Paerl et al., 1983]. The lowest values of  $E_{480}/E_{664}$  index (marginal 0.67–1.28, average 0.78–1.07) were observed in August 2015 – the period of the summer peak of phytoplankton in most reservoirs. In 2016, higher values of  $E_{480}/E_{664}$  (limiting 0.81–2.40, average 0.93–1.93) were obtained, with the highest values in June coinciding with low Chl *a* content during seasonal change of communities (Table 1). At present, the  $E_{480}/E_{664}$  values have increased in comparison with 1989–1991. Plant

carotenoids dominated in the early summer, along with the decline in the development of algae, and the values of the pigment index  $E_{480}/E_{664} > 1$ . At the height of summer, the ratio  $E_{480}/E_{664}$  (as well as the percentage of phaeopigments) decreased and, with a few exceptions, fluctuated around 1.0 [Mineeva, 1995]. The dynamics of pigment ratio  $E_{480}/E_{664}$ , as well as dynamics of phaeopigments, corresponds to the degree of development of algocoenoses. During the periods of seasonal highs, viable active cells are present in the waterbody, the sign of the physiological well being of which is the predominance of green pigments over yellow ( $E_{480}/E_{664}$  below or slightly above 1), and the predominance of the active form of chlorophyll (low relative content of phaeopigments). Both indicators increase along with the decline in the development of algocoenoses.

The source of additional information on the development of phytoplankton is the data of the fluorescent method, which makes it possible to estimate the chlorophyll content of the three algae divisions typical for freshwater waterbodies. With differences in the specific content of chlorophyll in algae of large taxonomic groups [Mineeva 2011; Mineeva, Schur, 2012], these data do not quantify the biomass of divisions, but are of interest for a comparative analysis of their dynamics.

Results of fluorescent and spectrophotometric determination of chlorophyll are closely correlated with each other (Fig. 3).



**Fig. 3.** Ratio of chlorophyll concentrations obtained by spectrophotometric ( $Chl_{sph}$ ) and fluorescent ( $Chl_{fl}$ ) methods. 1 – August 2015, 2 – June 2016, 3 – August 2016.

Regression equation shows that the differences are 30% on average. Higher chlorophyll concentrations are obtained by measuring fluorescence in natural water where there are small-celled algae with a delicate membrane. These forms can be lost during filtration needed to prepare samples for spectrophotometry. The difference between two methods is almost lacking in June at relatively low chlorophyll concentrations and increases in August.

According to the data obtained by fluorescent method, chlorophyll content for each of the three algae divisions in Volga reservoirs fluctuat-

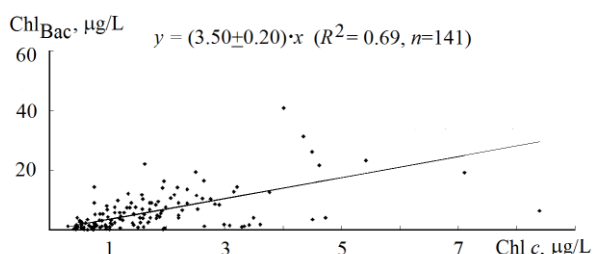
ed within a broad range. All minimal values were  $< 1 \mu\text{g/L}$ . Maximal chlorophyll content of green algae ( $Chl_{Chlor}$ ) did not exceed  $1\text{--}4 \mu\text{g/L}$ , with average usually being  $< 1 \mu\text{g/L}$ . The contribution of  $Chl_{Chlor}$  into the sum  $Chl\ a$  varied very little both within the cascade as well as during the observation periods, with average being  $1.3\text{--}6.8\%$  in August and  $3.5\text{--}5.2\%$  in June (Table 2).

Chlorophyll content of blue-green algae ( $Chl_{Cyan}$ ) in June was  $2.1\text{--}12.5 \mu\text{g/L}$ , average of  $0.9\text{--}5.5 \mu\text{g/L}$ . Despite the low concentration, the contribution of  $Chl_{Cyan}$  in total  $Chl\ a$  was appreciable and reached  $54\text{--}87\%$  (average  $36\text{--}56\%$ ). In August of both years, the absolute and relative amount of  $Chl_{Cyan}$  increased: the maximum up to  $8.7\text{--}49.1 \mu\text{g/L}$  (2015) and  $84\text{--}98\%$  (2016), the average up to  $9.5\text{--}20.7 \mu\text{g/L}$  and  $60\%\text{--}90\%$ . The highest percentage of  $Chl_{Cyan}$  was recorded in the Gorky and Saratov reservoirs (Table 2).

With the continuous presence of the diatoms in phytoplankton, the concentrations of  $Chl_{Bac}$  varied throughout the observation period within a wide range (Table 2). The maximum of  $Chl_{Bac}$  in individual reservoirs in June was from  $5.8$  to  $22.2 \mu\text{g/L}$ , in August – mainly from  $11.7$  to  $31.4 \mu\text{g/L}$ , exceeding  $60 \mu\text{g/L}$  in Cheboksary (2015) and Ivankovo (2016) reservoirs. The minimum of  $Chl_{Bac}$  was observed in Saratov reservoir. In June the share of  $Chl_{Bac}$  in total  $Chl\ a$  was the highest: from  $5.9\text{--}41\%$  to  $81\text{--}94\%$ , on average –  $40\text{--}60\%$ . The low values (average  $< 5 \mu\text{g/L}$ ) were observed both in June and August. Early in the summer,  $Chl_{Bac}$  formed about the half of total  $Chl\ a$ , with the low content of the latter, in Kuibyshev, Saratov, and Volgograd reservoirs. At the height of summer, in Ivankovo and Saratov (2015), Gorky and Kuibyshev (2016) reservoirs with the dominance of  $Chl_{Cyan}$ , the contribution of  $Chl_{Bac}$  was much lower (from  $9$  to  $29\%$ ). Average concentrations of  $Chl_{Bac}$  in limits of  $5\text{--}10 \mu\text{g/L}$  in June were obtained in the Gorky and Cheboksary reservoirs, where  $Chl_{Bac}$  made about half of total  $Chl\ a$ , and in August – in Uglich, Rybinsk (both years) and Cheboksary (2016) reservoirs – about a third of this pool. High (average  $> 10 \mu\text{g/L}$ ) concentration of  $Chl_{Bac}$  was recorded in Ivankovo (August 2016, about a third of  $Chl\ a$ ) and in Cheboksary (August 2015, about  $40\%$ ) reservoirs, as well as in the unregulated section of the Lower Volga from the dam of the Volgograd HEP to Astrakhan (June,  $88\%$ ). This section with high flow velocities was distinguished by the maximum absolute and relative content of  $Chl_{Bac}$ , due to the high abundance of the diatoms.

**Table 2.** Chlorophyll *a* content in basic phytoplankton taxa in the Volga River reservoirs according to fluorescent method

Water reservoir	Year, month	Chl <sub>Cyan</sub>		Chl <sub>Bac</sub>		Chl <sub>Chlor</sub>		Sum, µg/L
		µg/L	%	µg/L	%	µg/L	%	
Ivankovo	2015, VIII	3.0–42.0	26–86	0.8–11.7	8.5–58	0.3–3.9	1.2–18	4.3–49.0
		12.8±3.6	64±6.3	4.7±1.0	29±5.5	1.1±0.3	6.8±1.4	18.6±3.8
	2016, VIII	4.8–49.1	37–87	1.7–73.4	12–61	0.5–3.0	0.8–11	8.4–120
		19.7±5.4	62±4.2	12.7±6.8	32±4.2	1.2±0.3	5.5±1.1	33.7±11.1
Uglich	2015, VIII	2.2–28.5	20–84	3.2–14.2	12–74	0.3–1.7	1.6–6.6	17.1–35.2
		16.6±3.0	62±6.3	8.0±1.2	35±6.0	0.8±0.1	3.4±0.5	25.3±3.6
	2016, VIII	10.9–27.1	40–85	3.9–26.1	14–57	0.3–1.6	1.2–4.8	16.7–45.9
		18.2±1.5	68±4.2	8.6±2.2	29±4.0	0.8±0.2	2.8±0.4	27.6±2.8
Rybinsk	2015, VIII	6.3–20.5	24–93	1.0–19.5	6.5–74	0.0–0.6	0.2–3.6	8.6–29.1
		12.0±2.2	67±9.4	6.8±2.7	32±9.3	0.2±0.1	1.3±0.6	19.1±3.0
	2016, VIII	13.1–35.8	72–96	4.6–18.3	25–61	0.5–2.6	2.6–7.3	18.2–47.0
		20.7±2.3	68±4.6	8.4±1.3	29±4.3	0.6±0.2	2.1±0.4	30.1±2.5
Gorky	2015, VIII	7.2–27.8	46–91	2.6–14.0	8.6–53	0.0–2.1	0.0–6.1	15.6–36.1
		19.9±1.6	71±4.0	7.6±1.0	28±3.8	0.3±0.2	0.9±0.4	27.8±1.5
	2016, VI	0.4–12.5	2.1–63	0.9–16.3	35–95	0.0–1.2	0.1–6.5	2.5–20.5
		5.5±0.8	45±4.1	7.0±1.0	51±4.0	0.5±0.1	3.5±0.4	13.0±1.4
	2016, VIII	6.4–36.6	76–98	0.3–6.4	2.2–22	0.0–1.1	0.0–2.5	8.5–44.1
		17.7±2.3	90±1.8	1.8±0.5	8.9±1.6	0.1±0.1	0.7±0.3	19.6±2.7
Cheboksary	2015, VIII	0.5–26.1	1.5–89	1.6–63.2	9.9–97	0.0–0.4	0.0–1.1	16.2–81.5
		17.8±2.6	60±10	18.3±6.8	40±10	0.2±0.0	0.5±0.1	36.3±6.9
	2016, VI	0.8–4.0	18–54	0.8–14.4	41–81	0.1–1.0	1.0–9.9	1.8–19.0
		2.2±0.2	36±2.8	5.2±1.0	60±3.1	0.3±0.1	4.5±0.5	7.7±1.2
	2016, VIII	3.8–18.7	14–97	0.5–31.4	2.8–82	0.0–1.3	0.1–6.7	5.2–38.1
		10.4±1.9	66±6.3	6.7±1.2	30±5.7	0.6±0.1	3.7±0.8	17.7±2.2
Kuibyshev	2015, VIII	1.6–22.8	59–93	0.6–13.6	6.7–35	0.0–2.5	0.0–6.3	2.2–38.9
		10.6±2.0	78±2.9	2.7±0.9	21±2.6	0.3±0.2	1.4±0.5	13.6±2.8
	2016, VI	0.1–2.8	2.0–87	0.0–6.7	5.9–94	0.0–0.3	0.8–14	0.5–7.1
		0.9±0.1	53±4.6	1.3±0.3	42±4.6	0.1±0.0	5.2±0.7	2.3±0.3
	2016, VIII	6.7–47.2	44–95	0.6–11.9	4.7–46	0.1–3.0	0.2–12	7.9–49.9
		17.6±2.0	79±2.9	3.5±0.6	17±2.2	0.8±0.2	3.7±0.7	21.9±2.0
Saratov	2015, VIII	4.0–18.4	74–88	1.0–2.6	10–26	0.0–0.3	0.5–1.6	5.1–20.8
		9.5±1.3	82±1.3	1.7±0.2	17±1.4	0.1±0.0	0.9±0.1	11.3±1.4
	2016, VI	0.1–2.7	2.6–58	0.6–5.8	40–93	0.0–0.3	1.8–5.0	1.2–7.0
		1.3±0.2	37±4.1	2.8±0.4	60±4.0	0.2±0.0	3.5±0.2	4.2±0.4
Volgograd	2016, VI	0.9–7.1	3.9–75	0.8–22.2	18–94	0.2–0.5	1.9–8.0	2.1–23.6
Unregulated Volga	2016, VI	3.5±0.3	56±3.5	4.0±1.1	40±3.6	0.3±0.0	4.4±0.4	7.8±1.0
		0.0–2.1	0.1–14	5.2–49.0	82–96	0.1–2.3	2.0–6.3	5.6–51.3
		0.9±0.1	7.5±0.9	13.2±1.6	88±1.0	0.6±0.1	4.1±0.2	14.7±1.6



**Fig. 4.** Relationship between chlorophyll content in the diatoms (Chl<sub>Bac</sub>, fluorescent method data) and chlorophyll *c* (Chl *c*, spectrophotometric data).

Comparison of Chl<sub>Bac</sub> with another diatoms marker – the content of Chl *c*, which is determined spectrophotometrically, demonstrates a close relationship between them. This confirms the validity

of the results of both methods and makes it possible to obtain a quantitative dependence that is approximated by a linear equation (Fig. 4).

Dynamics of Chl<sub>Cyan</sub> and Chl<sub>Bac</sub> correspond to seasonal development of the Volga phytoplankton, which is characterized by the dominance of diatoms in spring and autumn, and the dominance of blue-green (or blue-green and diatoms) in summer. This is quantitatively expressed by the presence of spring, summer and autumn rises and early summer depression [Korneva, 2015].

In the last years, vegetation of the blue-green algae becomes more abundant and more prolonged at the intensification of phytoplankton development taking place simultaneously with temperature increase due to climate warming considered as eutrophication factor [Jeppesen et al., 2005]. The latter is confirmed by the increased



amount of  $\text{Chl}_{\text{Cyan}}$  in all reservoirs in June, as well as by the data on the long-term dynamics of  $\text{Chl}_{\text{Cyan}}$  in the Rybinsk reservoir [Mineeva, 2016].

Reservoirs of the Volga River are characterized by a complex hydrodynamic regime (flow, intensive mixing, developed network of tributaries, the presence of dissimilar water masses). This fact is responsible for the uneven horizontal distribution of phytoplankton, the most pronounced for a large ( $> 1000$  m) scale [Mineeva, 2004]. During the study period, the macroscale distribution of  $\text{Chl } a$  was characterized by a different degree of inhomogeneity. Coefficients of variation ( $C_V$ ) of  $\text{Chl } a$  average concentrations in most cases were from 30 to 70%, indicating a moderate

heterogeneity in the distribution of algae. The most uniform distribution of  $\text{Chl } a$  was observed in the Gorky reservoir in August 2015 ( $C_V = 21\%$ ), while the most heterogeneous – in Cheboksary reservoir during the whole period of studies ( $C_V = 75\text{--}102\%$ ) and in Volgograd reservoir in June ( $C_V = 96\%$ ) (Table 3). In each of the last two reservoirs, the maximum  $\text{Chl } a$  content was noted at a single station: in the mouth of the Oka River in Cheboksary reservoir (32  $\mu\text{g/L}$  in June, 63 and 86  $\mu\text{g/L}$  in August) and at the near-dam site in Volgograd reservoir (15.5  $\mu\text{g/L}$ ).

**Table 3.** Coefficients of variation (%) in the average chlorophyll content in the Volga River reservoirs during the study periods

Water reservoir	$\text{Chl}_{\text{Cyan}}$			$\text{Chl}_{\text{Bac}}$			$\text{Chl } a$		
	2015	2016		2015	2016		2015	2016	
	VIII	VI	VIII	VIII	VI	VIII	VIII	VI	VIII
Ivankovo	89	–	85	66	–	58	54	–	56
Uglich	54	–	25	46	–	78	32	–	47
Rybinsk	44	–	44	96	–	62	37	–	33
Gorky	29	73	42	48	70	86	21	49	55
Cheboksary	43	47	46	111	87	89	81	75	102
Kuibyshev	70	73	68	121	137	95	42	61	57
Saratov	53	68	–	37	75	–	41	60	–
Volgograd	–	57	–	–	160	–	–	96	–
Lower Volga	–	70	–	–	71	–	–	55	–

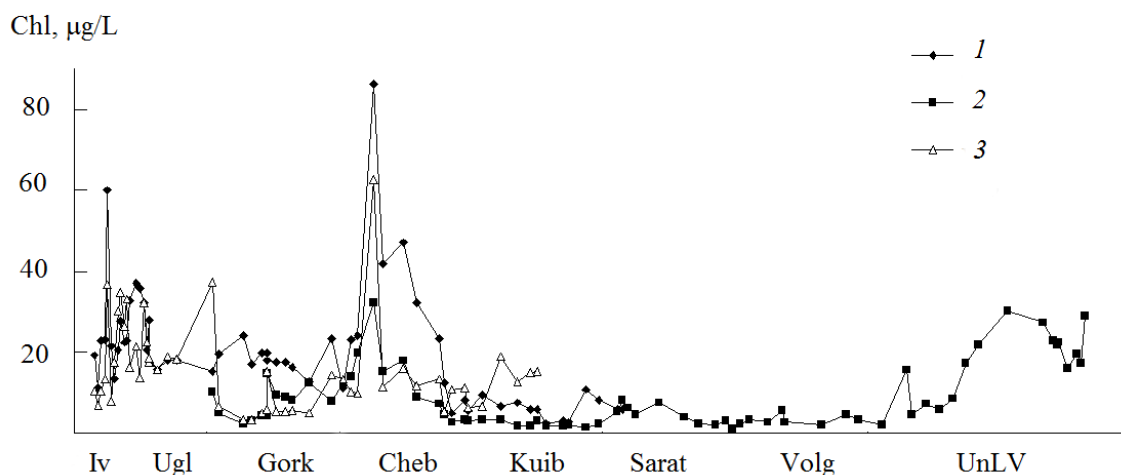
Note.  $\text{Chl } a$  – according to the spectrophotometric method; here and in Table 4, dash – absence of data.

Distribution of  $\text{Chl}_{\text{Cyan}}$  in the majority of cases was moderately heterogeneous ( $C_V = 42\text{--}73\%$ ), but more discrete in Ivankovo reservoir ( $C_V > 80\%$ ), and more uniform ( $C_V = 25\%$ ) in Uglich reservoir (August 2016). For the distribution of  $\text{Chl}_{\text{Bac}}$ , on the contrary, a high degree of variability was revealed, especially in June when  $C_V$  values exceeded 100% (Table 3).

If we consider the Volga cascade as a whole, the previously revealed tendency to decrease the chlorophyll content from the upper reservoirs to the lower ones remains [Mineeva, 2004]. Similar distribution is seen for phytoplankton biomass [Korneva, 2015]. The increase of flowage and drainage volume downstream of the Volga River as well as decrease of lateral tributaries volume explain this.

At the same time, the distribution of total  $\text{Chl } a$ , distribution of  $\text{Chl}_{\text{Bac}}$  and  $\text{Chl}_{\text{Cyan}}$  along the Volga cascade are characterized by the alternation of rises and falls. All water reservoirs have areas with elevated abundance of phytoplankton. In June, when  $\text{Chl } a$  concentrations were low overall, a local peak of its content was observed in the upper part of Cheboksary reservoir with maximum

downstream of the Oka River inflow; in the upper reach of the Volgograd HEP and (the most significant) – in the unregulated Lower Volga (Fig. 5). During this period, the overall chlorophyll pool was formed mostly by  $\text{Chl}_{\text{Bac}}$  as its content was significantly higher than that of  $\text{Chl}_{\text{Cyan}}$  in majority of cases. Concentrations of  $\text{Chl}_{\text{Bac}}$  from 3 to 10  $\mu\text{g/L}$  were obtained at a third of the stations, concentrations over 10  $\mu\text{g/L}$  at 11 stations, including the sites in Gorky reservoir, the mouth of the Oka River, and the Lower Volga. An increase in the content of  $\text{Chl}_{\text{Cyan}}$  to 5–7  $\mu\text{g/L}$  was observed only in the upper part of Volgograd reservoir (near the mouth of the Bol'shoi Irgiz and Kurdyum rivers), and up to 9–13  $\mu\text{g/L}$  in the middle part of Gorky reservoir, including the Kostroma expansion (Fig. 6). At these stations, the concentrations of  $\text{Chl}_{\text{Cyan}}$  were higher than  $\text{Chl}_{\text{Bac}}$ . In August 2015, Ivankovo, Uglich, Gorky and the upper part of Cheboksary reservoir were characterized by a high content of  $\text{Chl } a$ , which decreased significantly towards the lower stations of the latter and not changing in the Kuibyshev and Saratov reservoirs (Fig. 5).



**Fig. 5.** Distribution of chlorophyll *a* in the Volga River reservoirs in August 2015, June and August 2016 (1–3, respectively). Data of the spectrophotometric method. Reservoirs: Iv – Ivankovo, Ugl – Uglich, Gork – Gorky, Cheb – Cheboksary, Kuib – Kuibyshev, Sarat – Saratov, Volg – Volgograd, UnLV – unregulated section of the Lower Volga.

This decrease could be a consequence of the specific conditions of the high-water river areas with high flowage, which inhibits the development of algae. The Chl *a* pool was mainly formed by Chl<sub>Cyan</sub>, the content of which was from 10 to 30 µg/L at 2/3 of the stations, reaching maximum of 42 µg/L in the Shosha reach of Ivankovo reservoir. In the upper part of the latter, as well as in the estuarine zones of rivers, the amount of Chl<sub>Bac</sub> (8–14 µg/L) was noticeable (Fig. 6). In August 2016 the content of Chl *a* was maximal in the Upper Volga, declining in the Gorky and Cheboksary reservoirs and increasing in Kuibyshev reservoir below the confluence of the river Sviyaga (Fig. 5). The content of Chl<sub>Cyan</sub> in most cases was > 10 µg/L and exceeded the content of Chl<sub>Bac</sub> by 2 times or more, and at 16 stations (mainly in the Middle Volga) – by an order of magnitude. Only at three stations, with a high abundance of algae (the mouth of the Medveditsa River, Shosha Bay, the mouth of the Oka River), Chl<sub>Cyan</sub> quantitatively yielded to Chl<sub>Bac</sub>, significantly so in the Oka River mouth (Fig. 6).

Concentrations of Chl *a* over 30–60 µg/L, characteristic for the water bloom of varying intensity [Sirenko, Gavrilenko, 1978], were noted in the Volga cascade only locally. The Shosha Bay in Ivankovo reservoir and the mouth of the Oka River in Cheboksary reservoir constantly belong to such areas and sometimes they include also the lower part of Ivankovo reservoir, the upper part of Uglich reservoir and its estuary zones, the Kostroma expansion in Gorky reservoir.

A comparison of the current data and those dating back to the end of the 20th century shows that the chlorophyll content, which characterizes the degree of phytoplankton development, became

significantly higher in Uglich reservoir and slightly decreased in Saratov and Volgograd reservoirs. In Rybinsk and Gorky reservoirs (2015), in Cheboksary and Kuibyshev (2016) reservoirs, chlorophyll concentrations are commensurate with those obtained earlier. However, lower concentration of Chl *a* were seen in Rybinsk and Gorky reservoirs (2016), as well as in Kuibyshev reservoir (2015), while greater values were demonstrated in Cheboksary reservoir (2015) (Table 4).

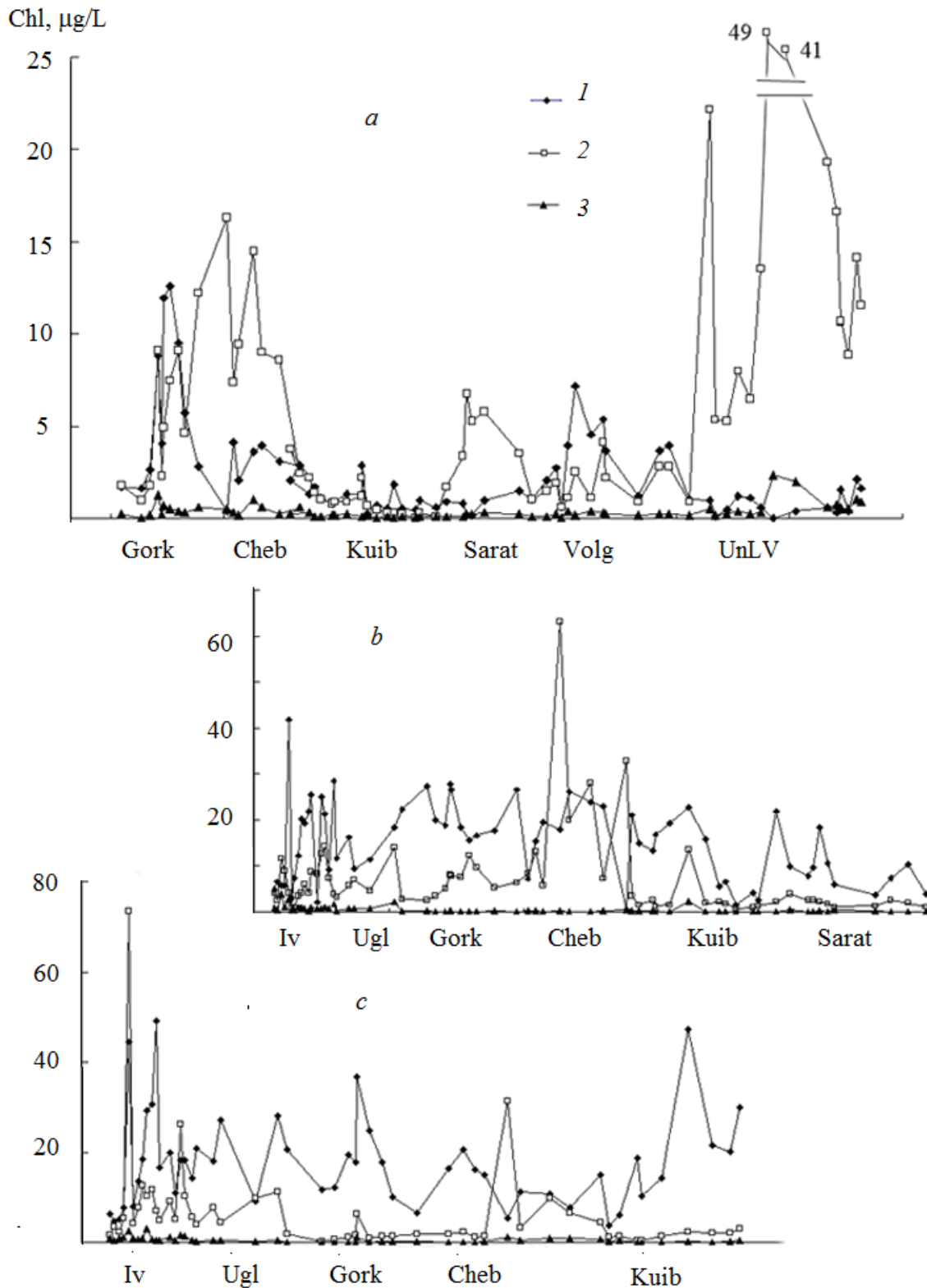
Photosynthetic pigments characterize not only the development and functioning of phytoplankton, but are also used to assess the trophic status of water bodies and water quality [Vinberg, 1960; Kitaev, 2007]. According to the average content of Chl *a*, the Volga River reservoirs correspond to different trophic categories that are associated with the development of biological communities and, considering the high dynamics of this development, are subject to seasonal and interannual fluctuations. In the beginning of summer the reservoirs of the Middle and Lower Volga were characterized as mesotrophic (<10 µg/L Chl *a*), with only Cheboksary reservoir – as moderate eutrophic. In August 2015, five upper reservoirs were classified as eutrophic (15–30 µg/L), Kuibyshev and Saratov reservoirs – mesotrophic. In August 2016 Gorky reservoir corresponded to mesotrophic type; Rybinsk and Kuibyshev reservoirs – moderate eutrophic (10–15 µg/L); Ivankovo, Uglich, and Cheboksary reservoirs – eutrophic (Table 4).

Modern assessment of trophic status of reservoirs in some cases differs from that obtained in the second half of the 20th century, when Uglich, Saratov, and Volgograd reservoirs were characterized as mesotrophic, Rybinsk and Kuibyshev res-



ervoirs – moderate eutrophic, Ivankovo, Gorky, and Cheboksary reservoirs – eutrophic [Mineeva,

2004]. Nowadays concentrations of Chl *a* correspond to a higher trophic category in Uglich and



**Fig. 6.** Distribution of chlorophyll in blue-green ( $\text{Chl}_{\text{Cyan}}$ , 1), diatom ( $\text{Chl}_{\text{Bac}}$ , 2) and green ( $\text{Chl}_{\text{Chlor}}$ , 3) algae in the Volga River reservoirs in June 2016, August 2015 and 2016 (a, b, c, respectively). The remaining notations, as in Fig. 5.

**Table 4.** Chlorophyll *a* content in the Volga River reservoirs in different years.

Water reservoir	Chlorophyll <i>a</i> , µg/L			
	VIII 1989–1991*	VIII 2015	VI 2016	VIII 2016
Ivanovo	25.5±2.4	24.0±4.0	–	20.7±3.7
Uglich	7.9±0.8	25.5±2.8	–	17.7±3.0
Rybinsk	24.4±2.5	24.8±3.6	–	12.9±1.8
Gorky	17.9±1.0	18.4±1.1	8.2±1.2	7.5±1.3
Cheboksary	14.6±1.4	29.6±8.1	12.2±3.1	16.9±6.7
Kuibyshev	11.5±1.0	6.1±0.8	3.0±0.5	14.8±2.8
Saratov	8.1±1.0	5.7±1.0	3.8±0.9	–
Volgograd	8.9±1.0	–	4.3±1.5	–

**Note.** \* – according to Mineeva, 2004

Rybinsk reservoirs and to a lower one in Gorky reservoir. At the same time, the values obtained in Ivankovo, Uglich, and Cheboksary reservoirs correspond to the same trophic gradation in both years of observation, whereas they differ in Rybinsk, Gorky, and Kuibyshev reservoirs. These

changes are caused by the interannual and long-term dynamics of phytoplankton revealed by continuous long-term observations at the Rybinsk reservoir [Mineeva, 2016], and indicate a high dynamic development of the ecosystems in the Volga River reservoirs.

## CONCLUSION

In the summer of 2015 and 2016 the content of photosynthetic pigments in reservoirs of the Volga River is represented by the values typical for the early summer depression of phytoplankton in June and the summer maximum in August. The average concentration of chlorophylls (Chl *a*+*b*+*c*) in early summer is 4.0–5.5 µg/L in Kuibyshev, Saratov, and Volgograd reservoirs; 10.0–14.7 µg/L in Gorky and Cheboksary reservoirs. At the height of summer 2015 and 2016 higher values were obtained (16.3–34.4 µg/L), generally. Determination of chlorophyll by standard spectrophotometric and fluorescent methods showed good convergence of the obtained results ( $R^2 = 0.78$ ). Chlorophyll *a* prevails (71–85% in June, 67–93% in August) in the pool of green pigments of phytoplankton, its share became higher than at the end of the 20th century. An increase in the fraction of Chl *a* indirectly indicates an intensification of the development of blue-green algae, which is confirmed by the high amount of Chl<sub>Cyan</sub> in all reservoirs, not only in August, but also in June. The relative content of Chl *c* is 6–29%, Chl *b* is 1–9%, phaeopigments are 26–78%, the content of plant carotenoids and Chl *a* is commensurate. The contribution of Chl<sub>Cyan</sub> (an average of 36–56% in June and 60–90% in August) and Chl<sub>Bac</sub> (40–60% and 9–40%)

in the total amount of Chl *a* corresponds to the taxonomic composition of the Volga phytoplankton and the dynamics of its main divisions. Close relationship ( $R^2 = 0.69$ ) is established between the content of diatoms markers – Chl *c*, determined spectrophotometrically, and Chl<sub>Bac</sub>, determined by the fluorescent method.

With a general tendency towards a decrease in phytoplankton biomass from the upper water reservoirs to the lower ones, its distribution in the Volga cascade is characterized by alternating rises and falls in the concentration of Chl *a*. Local increase in Chl *a* up to 30–60 µg/L is constantly observed in the Shosha Bay in Ivankovo reservoir and the mouth of the Oka River in Cheboksary reservoir.

The trophic status of the reservoirs of the Middle Volga in early summer is characterized as mesotrophic, with only Cheboksary reservoir – as a moderately eutrophic. At the height of the summer, Ivankovo, Uglich, and Cheboksary reservoirs are eutrophic. The trophic status of Rybinsk reservoir during the study varied from moderately eutrophic to eutrophic, Gorky reservoir from mesotrophic to eutrophic, Kuibyshev reservoir from mesotrophic to moderately eutrophic. Reservoirs of the Lower Volga are characterized as mesotrophic.

The author expresses sincere gratitude to the employees T.P. Zaikina, O.S. Makarova, and V.V. Solov'eva (Laboratory of Algology of IBIW RAS) for collecting field material.

## REFERENCES

- Foy R.H. 1987. A comparison of chlorophyll *a* and carotenoid concentrations as indicator of algal volume // *Freshwater Biol.* Vol. 17. № 2. P. 237–250.
- Gaevskiy N.A., Shatrov I.Yu., Gold V.M. 1993. [Fluorescence analysis of phytoplankton pigments] // *Metodicheskie voprosy izucheniya pervichnoy produktsii vnutrennih vodoemov*. SPb: Gidrometeoizdat. 1993. P. 101–109. [In Russian]
- Gold V.M., Gaevskiy N.A. Shatrov I.Yu., et al. 1986. [Experience of using fluorescence for differential evaluation of chlorophyll contents in planktonic algae] // *Gidrobiol. zhurn.* 1986. Vol. 22. № 3. P. 80–85. [In Russian]
- Jeffrey S.W., Humphrey G.F. 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*<sub>1</sub> and *c*<sub>2</sub> in higher plants, algae and natural phytoplankton // *Biochem. Physiol. Pflanz.* Bd 167. P. 191–194.
- Jeppesen E., Sondergaard M., Jensen J. P., et al. 2005. Lake responses to reduced nutrient loading – an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies // *Freshwater Biol.* Vol. 50. № 9. P. 1747–1771.
- Kitaev S.P. 2007. [Basic General Limnology for Hydrobiologists and Ichthyologists]. Petrozavodsk, Karelsk Scientific Center RAS, 395 pp. [In Russian]
- Korneva L.G. 2015. [Phytoplankton of Volga River Basin Reservoirs]. Kostroma. Dom Pechati. 284 pp. [In Russian]
- Kovalevskaya R.Z., Karabanovich V.S. 1975. [The primary product of the plankton of the Volga and its reservoirs] // *Vod. Resursy.* № 1. P. 86–93. [In Russian]
- Litvinov A.S., Mineeva N.M. 1997. Hydrological Conditions and Distribution of Phytoplankton in Reservoirs of the Volga Chain of Reservoirs // *Water Resources.* Vol. 24. №. 4. P. 448–455
- Lorenzen C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations // *Limnol. Oceanol.* Vol. 12. № 2. P. 343–346.
- Lorenzen C.J., Jeffrey S.W. 1980. Determination of chlorophyll in sea water. UNESCO Technical Paper in Marine Science 35. Paris: UNESCO. 20 pp.
- Mineeva N.M. 1995. [Forming the primary production in reservoirs of the Volga River cascade in nowadays. Phytoplankton pigments] // *Vod. resursy.* Vol. 22. № 6. P. 746–756. [In Russian]
- Mineeva N.M. 2000 a. [Pigment characteristics of plankton and their variations in waters of different trophic state] // *Biol. vnutr. vod.* № 3. P. 24–34. [In Russian]
- Mineeva N.M. 2000 b. [Plant pigments as indicators of ecosystem state in reservoirs. Plankton pigments] // *Sovremennaya ekologicheskaya situatsiya v Rybinskom i Gor'kovskom vodohranilishchah: sostoyanie biologicheskikh soobshchestv i perspektivy ryborazvedeniya*. Yaroslavl. YaGTU. P. 66–83. [In Russian]
- Mineeva N.M. 2004. [Plant Pigments in the Waters of the Volga River Reservoirs]. Moscow: Nauka. 158 pp. [In Russian]
- Mineeva N.M. 2006. [Content of photosynthetic pigments in the Upper Volga reservoirs] // *Biol. vnutr. vod.* № 1. P 31–40. [In Russian]
- Mineeva N.M. 2011. Plant pigments as indicators of phytoplankton biomass (Review) // *Internat. J. Algae.* Vol. 13. № 4. P. 330–340.
- Mineeva N.M. 2016. [Study of seasonal and interannual dynamics of chlorophyll in plankton of the Rybinsk Reservoir based on fluorescence diagnosis] // *Ecologia, morfologiya i sistematika vodnyh rasteniy*. Yaroslavl. Filigran. P. 75–93. [In Russian]
- Mineeva N.M., Litvinov A.S., Stepanova I.E., Kochetkova M.Yu. 2008. [Chlorophyll content and factors affecting its spatial distribution in the Middle Volga Reservoirs] // *Inland Water Biol.* Vol. 1. №. 1. P. 64–72.
- Mineeva N.M., Schur L.A. 2012. [Chlorophyll content in phytoplankton biomass (Review)] // *Algologia.* Vol. 22. № 4. P. 423–435. [In Russian]
- Paerl H.W., Tucker J., Bland P.T. 1983. Carotenoid enhancement and its role in maintaining blue-green algal (*Microcystis aeruginosa*) surface bloom // *Limnol. Oceanogr.* Vol. 28. № 5. P. 847–857.
- Parsons T.R., Strickland J.D.H. 1963. Discussion on spectrophotometric determination of marine-plant pigments with revised equations for ascertaining chlorophylls and carotenoids // *J. Mar. Res.* Vol. 21. № 3. P. 155–168.
- Pyrina I.L. 1966. [Primary production of phytoplankton in Ivankovo, Rybinsk, and Kuibyshev reservoirs in dependence on some factors] // *Producirovanie i krugovorot organicheskogo veshchestva vo vnutrennih vodoemah*. Moscow-Leningrad: Nauka. P. 249–270. [In Russian]
- Rivers of Europe 2009. Amsterdam: Elsevier. 700 pp.
- SCOR-UNESCO Working Group 17. 1966. Determination of photosynthetic pigments // *Determination of photosynthetic pigments in sea water. Monographs on Oceanographic Methodology*. Montreux. UNESCO. P. 9–18.
- Sirenko L.A., Gavrilenko M.Ya. 1978. [Water Bloom and Eutrophication]. Kiev: Naukova dumka. 232 pp. [In Russian]
- The River Volga and Its Life. 1979. The Hague-Boston-London: Dr. W. Junk B.V. Publ. 473 pp.
- Vinberg G.G. 1960. [Primary Production of the Basins]. Minsk: Izd-vo AN BSSR. 329 p. [In Russian]
- Watson R.A., Osborne P.L. 1979. An algal pigment ratio as an indicator of the nitrogen supply to phytoplankton in three Norfolk broads // *Freshwater Biol.* Vol. 9. № 6. P. 585–59.

## СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В ПЛАНКТОНЕ ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛГИ (2015–2016 гг.)

Н. М. Минеева

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

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

Приводятся данные по составу и содержанию фотосинтетических пигментов в планктоне водохранилищ Волги летом 2015 и 2016 гг. Определение пигментов выполнено стандартным спектрофотометрическим и флуоресцентным методами, результаты которых коррелируют между собой ( $R^2 = 0.78$ ). Средняя концентрация хлорофиллов (Хл  $a+b+c$ ) составляет в июне в Куйбышевском, Саратовском и Волгоградском водохранилищах 4.0–5.5 мкг/л, в Горьковском и Чебоксарском – 10.0–14.7 мкг/л, на незарегулированном участке Нижней Волги – 22.5 мкг/л. В августе содержание Хл  $a+b+c$  равняется 20.5–34.4 мкг/л в пяти верхних водохранилищах каскада, 6.3 и 6.7 мкг/л в Куйбышевском и Саратовском (2015 г.), 10.9 мкг/л в Горьковском и 16.3–26.4 мкг/л в остальных водохранилищах (2016 г.). В фонде зеленых пигментов преобладает Хл  $a$  (71–85% в июне, 67–93% в августе); доля Хл  $c$  составляет 6–29%, доля Хл  $b$  – 1–9%, количество феопигментов – 26–78%, содержание растительных каротиноидов и хлорофилла измеримо. Вклад в суммарное количество Хл  $a$  синезеленых (в среднем 36–56% в июне и 60–90% в августе) и диатомовых водорослей (40–60% и 9–40%) соответствует таксономическому составу волжского фитопланктона. Трофический статус водохранилищ Средней Волги в начале лета характеризуется как мезотрофный, лишь Чебоксарского – как умеренно эвтрофный. В разгар лета Ивановское, Угличское и Чебоксарское водохранилища устойчиво относятся к категории эвтрофных. Статус Рыбинского водохранилища в годы исследования меняется от умеренно эвтрофного до эвтрофного, Горьковского – от мезотрофного до эвтрофного, Куйбышевского – от мезотрофного до умеренно эвтрофного. Водохранилища Нижней Волги характеризуются как мезотрофные.

*Ключевые слова:* фотосинтетические пигменты, водохранилища Волги, трофический статус.

## СОДЕРЖАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ В ВОДЕ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОХРАНИЛИЩ Р. КАМЫ

П. Г. Беляева<sup>1</sup>, Н. М. Минеева<sup>2</sup>, Л. Е. Сigareва<sup>2</sup>, Н. А. Тимофеева<sup>2</sup>, О. С. Макарова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения РАН

614081 г. Пермь, ул. Голева, 13, e-mail: belyaeva@psu.ru

<sup>2</sup> Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

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

Приводятся первые данные о содержании растительных пигментов в планктоне и донных отложениях водохранилищ р. Камы. В период летней межени 2016 г. в Камском, Воткинском и Нижнекамском водохранилищах концентрации хлорофиллов (Хл  $a+b+c$ ) в толще воды составляют  $20.8 \pm 3.3$ ,  $24.0 \pm 9.2$  и  $19.0 \pm 5.4$  мкг/л, содержание хлорофилла в сумме с феопродуктивными (Хл  $a$ +Фео) в поверхностном слое донных осадков –  $76.7 \pm 21.6$ ,  $42.6 \pm 14.6$  и  $16.3 \pm 10.3$  мкг/г с.о., соответственно. Доля феопродуктивных в толще воды невелика (от  $22.4 \pm 4.8\%$  до  $30.9 \pm 1.4\%$ ), но формирует основу пигментного фонда донных отложений (от  $76.9 \pm 3.4\%$  до  $90.4 \pm 4.1\%$ ). При отсутствии связи между пигментами водного и донного ярусов трофическое состояние всех камских водохранилищ по среднему содержанию Хл  $a$  в планктоне оценивается как эвтрофное, по среднему содержанию Хл  $a$ +Фео в донных осадках Камское водохранилище – эвтрофное, Воткинское и Нижнекамское – мезотрофные.

*Ключевые слова:* растительные пигменты, водная толща, донные отложения, водохранилища р. Камы.

DOI 10.24411/0320-3557-2018-1-0007

### ВВЕДЕНИЕ

При исследовании водных экосистем необходимы сведения о формировании их продуктивности – основном показателе, отражающем особенности функционирования биологических сообществ в различных условиях среды. Целостное представление о формировании и трансформации органического вещества в водоеме дает комплексное изучение продуктивности пелагиали и бентали, которое редко проводится синхронно. Взаимодействие водной толщи и донных отложений выражено наиболее четко в неглубоких водоемах с высокой гидродинамической активностью. Среди показателей, отражающих связь пелагиали и бентали, особый интерес представляют растительные пигменты, которые широко используются в современных гидробиологических исследованиях для получения оперативной информации о развитии и состоянии альгоценозов. Содержание основного фотосинтетиче-

ского пигмента хлорофилла  $a$  (Хл  $a$ ) в планктоне служит характеристикой продукционных возможностей водорослей, их биомассы, а также трофического статуса водоема и качества воды [Винберг, 1960; Китаев, 2007 (Vinberg, 1960; Kitaev, 2007)]. В то же время, связь содержания осадочных пигментов с трофией водоема изучена недостаточно.

При обширных данных о пигментах планктона [Минеева, 2004, 2018 (Mineeva, 2004, 2018)] и донных отложений Волги [Сigareва, 2012; Сigareва, Тимофеева, 2018 (Sigareva, 2012; Sigareva, Timofeeva, 2018)], данные для камских водохранилищ до настоящего времени единичны [Беляева, 2014 (Belyaeva, 2014)]. Цель работы — изучение содержания и распределения растительных пигментов в воде и донных отложениях водохранилищ р. Камы для оценки их современного трофического состояния.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал собран в августе 2016 г. в Камском, Воткинском, Нижнекамском и камской ветви Куйбышевского водохранилищ (рис. 1). Содержание пигментов в воде и донных отложениях определяли спектрофотометрическим методом [Сigareва, 2012 (Sigareva, 2012); SCOR-UNESCO, 1966]. Для характеристики водной толщи анализировали интегральные пробы воды, отобранные от поверхности до дна на 31 русловой и 11 мелководных

станциях, для донных отложений – образцы грунта из поверхностного слоя (0–10 см) на 18 русловых станциях. Подробное описание сбора и обработки материала приведено в статьях [Минеева, 2018; Сigareва, Тимофеева, 2018 (Mineeva, 2018; Sigareva, Timofeeva, 2018)]. Оценка трофии по содержанию Хл  $a$  в планктоне выполнена согласно [Минеева, 2000 (Mineeva, 2000)], по осадочным пигментам – согласно [Möller, Scharf, 1986].



**Рис. 1.** Карта-схема водохранилищ р. Камы.

**Fig. 1.** Map-scheme of the Kama River reservoirs.

Река Кама, крупнейший приток Волги, протекает преимущественно по широкой долине между возвышенностями Высокого Заволжья. Ее бассейн простирается от таежной до лесостепной зоны. Длина Камы 1805 км, площадь водосборного бассейна более 507 тыс. км<sup>2</sup>, питание преимущественно снеговое, а также подземное и дождевое [Rivers of Europe, 2009]. Река подвержена загрязнению промышленными сточными водами. На Каме создано три крупных неглубоких водохрани-

лища речного типа, различающихся по морфометрическим показателям (табл. 1). Водохранилища характеризуются интенсивным водообменом, Камское и Воткинское – сезонным, а Нижнекамское – недельно-суточным регулированием стока. Около половины площади Нижнекамского водохранилища занимают мелководья с глубинами до 2 м. Нижняя часть каскада относится к Куйбышевскому водохранилищу.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наши исследования выполнены в августе 2016 г. в период летней межени при максимальном прогреве водной толщи. Количество осадков и объем поверхностного притока в бассейне р. Камы летом 2016 г. были на 18% ниже средних многолетних величин, а температура воды ( $> 20^{\circ}\text{C}$ ) мало изменялась с глубиной (табл. 2) и существенно (на  $6^{\circ}\text{C}$ ) превышала среднюю многолетнюю [<http://accident.perm.ru/index.php/spravochnyj-gazdel/klimat>].

Прозрачность воды составляла 0.8–1.4 м в двух верхних водохранилищах и увеличива-

лась до 0.9–1.8 м в нижнем течении р. Камы. Высокое содержание растворенного кислорода в Нижнекамском и Куйбышевском водохранилищах свидетельствует о благоприятном кислородном режиме. В Воткинском и Камском водохранилищах содержание  $\text{O}_2$  существенно снижалось с глубиной (табл. 2). Средняя электропроводность уменьшалась от 460 мкСм/см в Камском водохранилище до 230–280 в Воткинском и Нижнекамском и увеличивалась до 340 мкСм/см в камском отроге Куйбышевского, рН воды (8.1–8.3) была слабо щелочной на всех станциях.

**Таблица 1.** Морфометрические характеристики водохранилищ р. Камы по: [Матарзин, Новосельский, 1983; Матарзин и др. 1984; Эдельштейн 1998 (Matarzin, Novosel'sky, 1983; Matarzin et al., 1984; Edel'shtein, 1998)].

**Table 1.** Morphometric characteristics of the Kama River reservoirs according to: [Matarzin, Novosel'sky, 1983; Matarzin et al., 1984; Edel'shtein, 1998].

Показатель	Камское	Воткинское	Нижнекамское	Куйбышевское камская ветвь
Годы заполнения	1954	1962–1964	1979	1955–1957
Площадь акватории, км <sup>2</sup>	1910	1120	1080	1397
Площадь мелководий, %	19.4	11.3	49.8	–
Объем, км <sup>3</sup>	12.2	9.4	2.9	6.6
Длина, км	300	365	185	265
Максимальная глубина, м	30	28	20	–
Средняя глубина, м	6.3	8.4	3.3	5.5
Коэффициент водообмена, год <sup>-1</sup>	4.2	5.8	6.8	4.1

**Таблица 2.** Абиотические характеристики водохранилищ р. Камы в августе 2016 г. (по данным лаб. гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН).

**Table 2.** Abiotic characteristics of the Kama River reservoirs in August 2016 (according to the data of Laboratory of hydrology and hydrochemistry IBIW RAS).

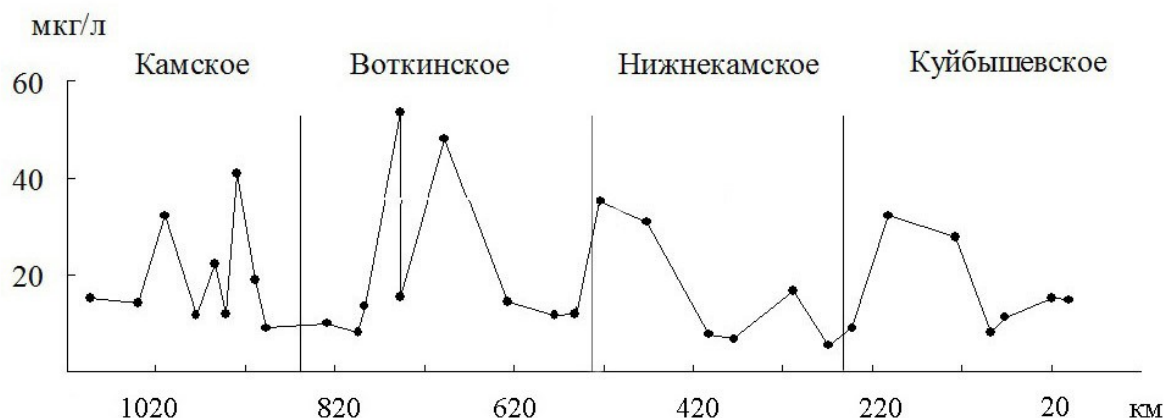
Водохранилище	Прозрачность, м	Температура воды, °С		О <sub>2</sub> , мг/л		О <sub>2</sub> , %	
		Поверхность	Дно	Поверхность	Дно	Поверхность	Дно
Камское	1.2±0.1	23.3±0.3	22.1±0.7	9.6±0.5	2.5±1.0	117±6	28±12
Воткинское	1.0±0.1	23.6±0.1	22.0±0.7	10.6±1.0	4.2±1.6	127±12	49±18
Нижнекамское	1.4±0.4	24.3±0.6	24.2±0.3	10.1±0.9	8.9±0.6	122±11	105±7
Куйбышевское, камская ветвь	1.3±0.1	24.7±0.1	24.8±0.1	9.7±0.3	8.1±0.5	119±3	104±12

Примечание. Здесь и в табл. 4, 5 приведены средние величины со стандартной ошибкой.

Note. Here and in the Tables 4, 5 are the mean values with standard error.

Содержание Хл *a* в воде Камских водохранилищ варьирует от 4.2 до 88.5 мкг/л. Минимальные и максимальные значения различались в 12 раз в русловой части Воткинского и в 3.9–6.5 раз в остальных водохранилищах. Повышенным содержанием Хл *a* (рис. 2) выделялись участки Воткинского и Камского водохранилищ, принимающие воды основных притоков – рек Иньва, Косьва, Нытва, Тулва. Коэффициенты вариации средних для водоема концентраций Хл *a* (35–76%) свидетельствуют об умеренной изменчивости пространственного распределения фитопланктона. Содержание пигмента на мелководьях Камского и Воткинского водохранилищ в 1.4–2 раза выше, чем на русловых станциях (табл. 3). Вероятно, это обусловлено характерным для литоральной зоны интенсивным прогревом и повышенным содержанием биогенных веществ. Аналогичное соотношение между показателями развития фитопланктона в глубоководной и мелководной зонах отмечено для водохранилищ Волги [Минеева, 2004 (Mineeva, 2004)]. Хл *a* преобладал в общем фонде зеленых пигментов (Хл *a+b+c*), его вклад возрастал от 67% в цен-

тральном районе Нижнекамского водохранилища до 97% в нижней части Камского и составлял в среднем от 85.1 до 90.7%. Содержание дополнительных хлорофиллов было значительно ниже, максимальные величины отмечены в центральных районах водохранилищ. Средняя доля Хл *b* колебалась в пределах 3.1–5.7%, доля Хл *c* – от 6.0 до 9.6% (табл. 4). Такое соотношение зеленых пигментов свидетельствует о смешанном составе фитопланктона, характерном для водохранилищ Камы [Беляева, 2016 (Belyaeva, 2016); Rivers of Europe, 2009]. Концентрация продуктов распада хлорофилла – феопигментов составляла в среднем 3.4–5.8 мкг/л при наиболее высоких значениях в камской ветви Куйбышевского водохранилища. Их относительное содержание (в среднем 22.4–30.9% суммы с чистым Хл *a*) типично для фотической зоны большинства пресных водоемов, включая водохранилища Волги [Минеева, 2004 (Mineeva, 2004)]. Тесная связь между содержанием Хл *a* и феопигментов ( $r \sim 0.80$ ) свидетельствует, что их основным источником в водохранилищах Камы являются планктонные водоросли.



**Рис. 2.** Содержание хлорофилла *a* на русловых станциях водохранилищ р. Камы в августе 2016 г. По оси абсцисс – расстояние от устья Камы, вертикальные линии – границы водохранилищ.

**Fig. 2.** Chlorophyll *a* content in channel stations of the Kama River reservoirs in August 2016. Abscissa is the distance from the Kama mouth; vertical lines are the boundaries of reservoirs.

**Таблица 3.** Содержание хлорофилла *a* в воде глубоководных русловых и мелководных участков водохранилищ Камы в августе 2016 г.

**Table 3.** Chlorophyll *a* content in the water of deep channel and shallow sites in the Kama River reservoirs in August 2016.

Водохранилище, участок	Хлорофилл <i>a</i> , мкг/л	
	Пределы	Среднее с ошибкой
Камское, русловой	8.9–40.1	18.9±3.1
мелководный	13.1–43.8	26.5±3.6
Воткинское, русловой	6.2–76.3	22.6±6.4
мелководный	4.2–88.5	46.5±14.5
Нижнекамское, русловой	5.4–35.5	17.2±5.9
Куйбышевское, камская ветвь, русловой	8.2–32.1	16.9±3.5

Содержание растительных каротиноидов изменялось от 2.3 до 33.4  $\mu\text{SPU}/\text{л}$ , средние для водоемов значения – от 9.9 до 15.6  $\mu\text{SPU}/\text{л}$ . Концентрации желтых и зеленых пигментов, как и в других водоемах [Минеева, 2004 (Mineeva, 2004)], тесно коррелируют между собой ( $r=0.96$ ). Их отношение (К/Хл) изменяется от 0.8 до 1.5, средние величины К/Хл ниже единицы, что свидетельствует о физиологическом благополучии фитопланктона и его достаточной обеспеченности биогенным питанием. Другой показатель соотношения каротиноидов и хлорофилла – пигментный индекс  $E_{480}/E_{664}$  (отношение оптической плотности экстракта в максимумах поглощения света каротиноидами и хлорофиллом) во всех водохранилищах близок к единице и лишь в Нижнекамском водохранилище незначительно превышает ее (табл. 4).

Содержание Хл *a* в донных отложениях изменялось от следовых количеств до 27 мкг/г сухого осадка (с.о.) и было существенно ниже, чем содержание феопигментов (Фео), достигавшее 118 мкг/г с.о. (рис. 3). В суммарной концентрации растительных пигментов (Хл *a*+Фео), изменявшейся от 1 до 145 мкг/г с.о., доля феопигментов оценивалась в 62–94%, средние для отдельных водохранилищ величины составляли 77–90% при максимальных в Камском водохранилище, минимальных – в Нижнекамском (табл. 5). По среднему содержанию Хл *a*+Фео в донных отложениях камские водохранилища близки к водохранилищам Средней и Нижней Волги, но заметно уступают таковым Верхней Волги [Сигарева, 2012 (Sigareva, 2012)].

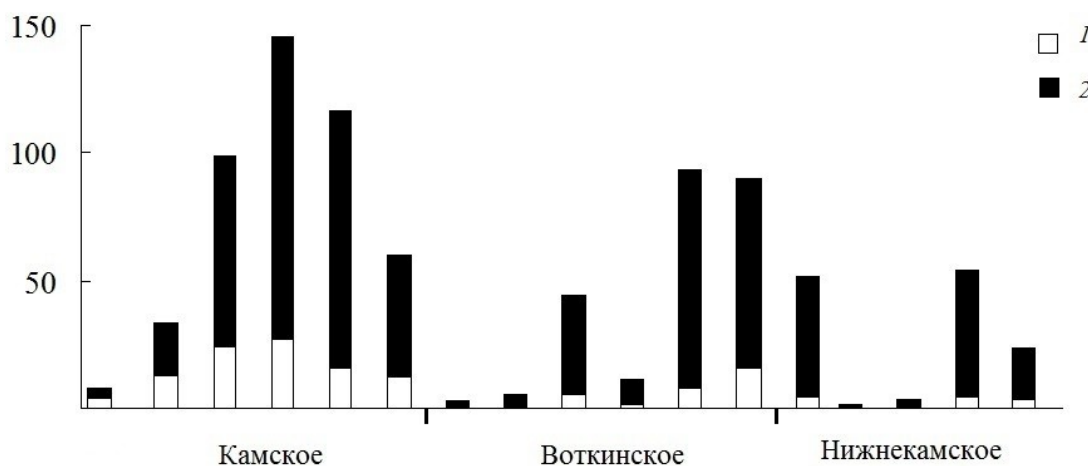


**Таблица 4.** Содержание фотосинтетических пигментов в воде русловых станций водохранилищ Камы.

**Table 4.** The content of photosynthetic pigments in the channel stations water of the Kama River reservoirs.

Показатель	Камское	Воткинское	Нижнекамское	Куйбышевское, камская ветвь
Число станций	9	9	6	7
Хл $a+b+c$ , мкг/л	20.8±3.3	24.0±9.2	19.0±5.4	18.9±4.0
Хл $a$ , %	85.1±1.8	88.2±0.5	85.6±4.2	90.7±1.1
Хл $b$ , %	5.7±0.8	3.4±0.1	4.7±1.7	3.1±1.0
Хл $c$ , %	9.2±0.9	8.4±0.5	9.6±2.5	6.0±0.5
Феопигменты, мкг/л	5.1±2.2	3.7±1.4	3.4±0.9	5.8±1.3
То же, %	30.9±1.4	27.3±0.8	22.4±4.8	28.1±3.0
Каротиноиды (К), $\mu\text{SPU}/\text{л}$	9.9±1.5	12.9±2.3	15.6±5.6	12.9±2.3
$E_{480}/E_{664}$ , отн.ед.	1.04±0.06	1.07±0.03	1.12±0.04	0.96±0.04
К/Хл, отн.ед.	0.80±0.05	0.86±0.02	0.89±0.02	0.79±0.03

Хл  $a$ , Фео, мкг/г с.о.



**Рис. 3.** Содержание осадочных пигментов на русловых станциях водохранилищ р. Камы в августе 2016 г. (1 – хлорофилл  $a$ , 2 – феопигменты).

**Fig. 3.** Sedimentary pigments content in channel stations of the Kama River reservoirs in August 2016 (1 – chlorophyll  $a$ , 2 – pheopigments).

Относительное содержание феопроизводных Хл  $a$  в донных отложениях существенно выше, чем в толще воды, что соответствует высокой степени деградации осадочного хлорофилла в разнотипных водоемах [Сигарева, 2012; Сигарева и др. 2016 (Sigareva, 2012; Sigareva et al., 2016)]. В то же время, соотношение желтых и зеленых пигментов характеризовалось сравнительно небольшими величинами. Индекс  $E_{480}/E_{664}$  изменялся от 1.2 до 2.4, индекс  $E_{480}/1.7 \cdot E_{665к}$ , рассчитанный с поправкой на феопигменты, – от 0.65 до 1.50. Первый индекс превышал величины, полученные для функционирующего фитопланктона (табл. 4, 5), второй сопоставим с ними. Судя по значениям обоих индексов, в донных отложениях камских водохранилищ создаются неблаго-

приятные условия для длительного сохранения органического вещества.

Содержание осадочных пигментов в камских водохранилищах тесно связано с типом грунта. Донные отложения на станциях наблюдения верхних участков Камского и Нижнекамского водохранилищ представлены песком, в Воткинском – илистым песком. Преобладающий тип донных отложений большинства участков Камского и Воткинского водохранилищ – глинистый и песчанистый илы, а Нижнекамского – песок. Самые низкие концентрации Хл  $a$ +Фео (0.1–5.5 мкг/г) отмечены в отложениях песка и илистого песка, более высокие (11–44 мкг/г) – для песчанистого ила, максимальные (52–145 мкг/г) – для глинистого ила. Это согласуется с выявленными ранее

особенностями накопления и сохранения растительных пигментов в донных отложениях в зависимости от их типа и условий формирования грунтового комплекса [Сигарева, 2012;

Сигарева и др., 2013, 2016; Сигарева, Тимофеева, 2018 (Sigareva, 2012; Sigareva et al., 2013, 2016; Sigareva, Timofeeva, 2018)].

**Таблица 5.** Содержание осадочных пигментов в водохранилищах Камы.

**Table 5.** The content of sedimentary pigments in the Kama River reservoirs.

Показатель	Камское	Воткинское	Нижнекамское
Число станций	6	7	5
Хл <i>a</i> +Фео, мкг/г с.о.	76.7±21.6	42.6±14.6	16.3±10.3
Хл <i>a</i> , мкг/г с.о.	15.5±3.8	4.9±2.1	1.2±0.79
То же, %	23.1±3.4	10.6±1.4	9.6±4.1
Феопигменты, мкг/г с.о.	61.2±18.3	37.6±12.8	15.1±9.5
То же, %	76.9±3.4	89.4±1.4	90.4±4.1
$E_{480}/E_{665}$ , отн.ед.	1.67±0.10	1.83±0.15	1.73±0.33
$E_{480}/1.7 \cdot E_{665к}$ , отн.ед.	1.14±0.07	1.16±0.10	1.08±0.20

Концентрации растительных пигментов в водной толще и донных отложениях камских водохранилищ не коррелируют между собой ( $r < 0.10$ ), что, вероятно, обусловлено сложным характером связи между этими показателями. Интенсивный водообмен и высокая проточность препятствуют осаждению фитопланктона из толщи воды. Кроме этого, судя по коэффициентам вариации средних (табл. 6), пространственное распределение пигментов в воде характеризуется умеренной, а в донных отложениях – высокой степенью неоднородности. Последнее является следствием существенных различий условий формирования донных отложений и их продукционных свойств в водохранилищах. Ранее и на других водоемах было показано, что пространственное распределение пигментов в донных отложениях выражено сильнее, чем в водной толще [Сигарева, 2012 (Sigareva, 2012)].

Выявленные особенности распределения растительных пигментов в пелагиали и бентали обуславливают различие оценок трофического статуса водохранилищ по содержанию пигментов в воде и донных отложениях. Среднее содержание Хл *a* в толще воды всех водохранилищ Камы соответствует эвтрофной ка-

тегории и отражает ситуацию, сложившуюся в водоеме в период летней межени. Среднее содержание Хл *a*+Фео в донных осадках, отражающее более длительный период функционирования экосистемы и значительную неравномерность пространственного распределения продукционных показателей, характеризует Камское водохранилище как эвтрофное, Воткинское и Нижнекамское – как мезотрофные.

**Таблица 6.** Коэффициенты вариации (%) содержания растительных пигментов в воде и донных отложениях водохранилищ Камы.

**Table 6.** Coefficients of variation (%) of the plant pigments content in water and bottom sediments in the Kama River reservoirs.

Водохранилище	Хл <i>a</i> в водной толще	Хл <i>a</i> +Фео в донных отложениях
Камское	55	69
Воткинское	35	91
Нижнекамское	76	141

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В период летней межени 2016 г. содержание фотосинтетических пигментов в водохранилищах р. Камы, крупнейшего притока Волги, представлено широким диапазоном величин, относящихся к разным трофическим категориям. Средняя концентрация суммы хлорофиллов (Хл *a*+*b*+*c*) в воде Камского, Воткинского, Нижнекамского и камской ветви Куйбышевского водохранилищ составляет соответственно 20.8, 24.0, 19.0 и 18.9 мкг/л, в

фонде зеленых пигментов преобладает Хл *a*, среднее количество феопигментов (22.4–30.9%) типично для пресноводного планктона. Средняя концентрация осадочных пигментов (Хл *a*+Фео) составляет 76.7, 42.63 и 16.3 мкг/г с.о. соответственно в Камском, Воткинском и Нижнекамском водохранилищах. В пигментном фонде донных отложений преобладают феопроизводные хлорофилла (от 76.9 до 90.4%), что обусловлено неблагоприятными

для новообразования ОВ условиями. Пространственное распределение растительных пигментов в камских водохранилищах неоднородно. Коэффициенты вариации свидетельствуют об умеренной изменчивости концентраций Хл *a* в водной толще и высокой вариабельности Хл *a*+Фео в донных отложениях. Локальное увеличение концентрации Хл *a* в толще воды отмечается на участках, принимающих основные притоки, содержание осадочных пигментов меняется в зависимости от

типа грунта. Количественная связь между пигментами в водной толще и донных отложениях водохранилищ Камы не выявлена. Трофическое состояние всех камских водохранилищ в период летней межени 2016 г. по содержанию Хл *a* в планктоне оценивается как эвтрофное, по среднему содержанию Хл *a*+Фео в донных осадках Камское водохранилище – эвтрофное, Воткинское и Нижнекамское – мезотрофные.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беляева П.Г. Трофический статус Камского водохранилища по фитопланктону в летний период // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2014. Т. 16. № 5. С. 244–248.
- Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
- Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2007. 395 с.
- Матарзин Ю.М., Новосельский Ю.И. Камское водохранилище как объект районирования // Комплексные исследования рек и водохранилищ Урала. Пермь: Перм. гос. ун-т, 1983. С. 3–19.
- Матарзин Ю.М., Сорокина Н.Б., Пушкина Н.П. и др. Современные экологические условия Камы и Камских водохранилищ // Биологическая продуктивность и качество воды Волги и ее водохранилищ. М.: Наука, 1984. С. 26–37.
- Минеева Н.М. Растительные пигменты как показатель состояния экосистемы водохранилищ. Пигменты планктона // Современная экологическая ситуация в Рыбинском и Горьковском водохранилищах: состояние биологических сообществ и перспективы рыборазведения. Ярославль: ЯГТУ, 2000. С. 66–83.
- Минеева Н.М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М.: Наука, 2004. 156 с.
- Минеева Н.М. Состав и содержание фотосинтетических пигментов в планктоне водохранилищ Волги (2015–2016) // Тр. ИБВВ РАН. 2018. Наст. сб.
- Сigareва Л.Е. Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2012. 217 с.
- Сigareва Л.Е., Законнов В.В., Тимофеева Н.А., Касьянова В.В. Осадочные пигменты и скорость илонакопления как показатели трофического состояния Рыбинского водохранилища // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 1. С. 62–69.
- Сigareва Л.Е., Пырина И.Л., Тимофеева Н.А. Межгодовая динамика растительных пигментов в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища // Экология, морфология и систематика водных растений. Тр. ИБВВ РАН. Вып. 76 (79). Ярославль: Филигрань, 2016. С. 119–130.
- Сigareва Л.Е., Тимофеева Н.А. Содержание растительных пигментов в донных отложениях водохранилищ Волги // Тр. ИБВВ РАН. 2018. Наст. сб.
- Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
- Электронный ресурс Климатические особенности в Пермском крае: <http://accident.perm.ru/index.php/spravochnyj-razdel/klimat>.
- Möller W.A.A., Scharf B.W. The content of chlorophyll in the sediment of the volcanic maar lakes in the Eifel region (Germany) as an indicator for eutrophication // Hydrobiologia. 1986. Vol. 143. P. 327–329.
- Rivers of Europe / Eds. K. Tockner, U. Uehlinger, Ch.T. Robinson. Amsterdam: Elsevier, 2009. 700 pp.
- SCOR-UNESCO Working Group 17. Determination of photosynthetic pigments // Determination of photosynthetic pigments in sea water. Monographs on oceanographic methodology. Montreux: UNESCO, 1966. P. 9–18.

#### REFERENCES

- Belyaeva P.G. 2014. [Trophic status of the Kama reservoir according to phytoplankton occurrence in summer period] // Izv. Samarskogo Nauch. Tsentra RAN. Vol. 16. No 5. P. 244–248. [In Russian]
- Edel'shtein K.K. 1998. [Reservoirs of Russia: environmental problems, the ways to solve them]. Moskva: GEOS. 277 pp. [In Russian]
- Kitaev S.P. [Basic General Limnology for Hydrobiologists and Ichthyologists]. Petrozavodsk: Karelskiy Nauch. Tsentr RAN. 2007. 395 pp. [In Russian]
- Matarzin Yu.M., Sorokina N.B., Pushkina N.P. et al. 1984. [Modern ecological conditions in the Kama River and Kama reservoirs] // Biologicheskaya produktivnost' i kachestvo vody Volgi i ee vodohranilish. Moskva: Nauka. P. 26–37. [In Russian]
- Matarzin Yu.M., Novosel'sky Yu.I. 1983. [Kama reservoir as an object of regionalization] // Kompleksnye issledovaniya rek i vodohranilish Urala. Perm': Perm. gos. un-t. P. 3–19. [In Russian]
- Mineeva N.M. 2000. [Plant pigments as indicators of ecosystem state in reservoirs. Plankton pigments] // Sovremennaya ekologicheskaya situatsiya v Rybinskom i Gor'kovskom vodohranilishchah: sostoyanie biologicheskikh soobshchestv i perspektivy ryborazvedeniya. Yaroslavl. YaGTU. P. 66–83. [In Russian]

- Mineeva N.M. 2004. [Plant Pigments in the Waters of the Volga River Reservoirs]. Moskva: Nauka. 158 pp. [In Russian]
- Mineeva N.M. 2018. [Composition and content of photosynthetic pigments in plankton of the Volga River reservoirs (2015–2016)] // Trudy IBVV RAN. This issue. [In Russian]
- Möller W.A.A., Scharf B.W. 1986. The content of chlorophyll in the sediment of the volcanic maar lakes in the Eifel region (Germany) as an indicator for eutrophication // *Hydrobiologia*. Vol. 143. P. 327–329.
- Rivers of Europe 2009. / Eds. K. Tockner, U. Uehlinger, Ch.T. Robinson. Amsterdam: Elsevier. 700 pp.
- SCOR-UNESCO Working Group 17. 1966. Determination of photosynthetic pigments // *Determination of photosynthetic pigments in sea water. Monographs on oceanographic methodology*. Montreux: UNESCO. P. 9–18.
- Sigareva L.E. 2012. [Chlorophyll in bottom sediments of the Volga water bodies]. Moskva: KMK Scientific Press. 217 p. [In Russian]
- Sigareva L.E., Pyrina I.L., Timofeeva N.A. 2016. [Interannual dynamics of chlorophyll content in plankton and bottom sediments of the Rybinsk reservoir] // Bobrov A.A. (ed.): *Ekologiya, morfologiya i sistematika vodnykh rasteniy*. Trudy IBVV RAN. Vypusk 76 (79). Yaroslavl: Filigran. P. 119–130. [In Russian]
- Sigareva L.E., Timofeeva N.A. 2018. [Content of plant pigments in bottom sediments of the Volga River reservoirs] // Trudy IBVV RAN. This issue. [In Russian]
- Sigareva L.E., Zakonnov V.V., Timofeeva N.A., Kasyanova V.V. 2013. Sedimentary pigments and silting rate as indicators of the trophic condition of the Rybinsk reservoir // *Water Resources*. Vol. 40. No 1. P. 54–60.
- Vinberg G.G. 1960. [Primary Production of the Basins]. Minsk: Izd-vo AN BSSR. 329 p. [In Russian]
- Web Site Climatic features in the Perm region: <http://accident.perm.ru/index.php/spravochnyj-razdel/klimat> [In Russian]

## CONTENT OF THE PLANT PIGMENTS IN WATER AND BOTTOM SEDIMENTS OF THE KAMA RIVER RESERVOIRS

**P. G. Belyaeva<sup>1</sup>, N. M. Mineeva<sup>2</sup>, L. E. Sigareva<sup>2</sup>, N. A. Timofeeva<sup>2</sup>, O. S. Makarova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch of RAS*

*13, Golev street, Perm, 614081, e-mail: belyaeva@psu.ru*

<sup>2</sup>*Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS*

*Borok, Yaroslavl, 152742, e-mail: mineeva@ibiw.yaroslavl.ru*

The first data on content of the plant pigments in plankton and bottom sediments in the Kama River reservoirs are considered. During the low-water period, in summer 2016 concentrations of chlorophylls (Chl *a+b+c*) in the water column in the Kamsk, Votkinsk, Nizhnekamsk reservoirs made  $20.8 \pm 3.3$ ,  $24.0 \pm 9.2$ ,  $19.0 \pm 5.4$   $\mu\text{g/l}$ , and chlorophyll content in total with pheopigments (Chl *a*+Pheo) in the surface layer of bottom sediments made  $76.7 \pm 21.6$ ,  $42.6 \pm 14.6$ , and  $16.3 \pm 10.3$   $\mu\text{g/g}$  of dry weight, respectively. The share of pheopigments in the water column is small (from  $22.4 \pm 4.8\%$  to  $30.9 \pm 1.4\%$ ) but is quite high in bottom sediments (from  $76.9 \pm 3.4\%$  to  $90.4 \pm 4.1\%$ ). In the absence of correlation between pigments in the water column and bottom sediments, the trophic state of all Kama River reservoirs estimated by the average Chl *a* content in plankton corresponds to eutrophic type, while, the Kama reservoir is eutrophic, Votkinsk and Nizhnekamsk are mesotrophic according to the average content of Chl *a*+Pheo in the bottom sediments.

**Keywords:** plant pigments, water column, bottom sediments, Kama River reservoirs

## СОДЕРЖАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛГИ

Л. Е. Сигарева, Н. А. Тимофеева

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

*152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: [sigareva@ibiw.yaroslavl.ru](mailto:sigareva@ibiw.yaroslavl.ru)*

Представлены новые данные по содержанию растительных пигментов в донных отложениях, полученные спектрофотометрическим методом для 7 водохранилищ волжского каскада в сжатые сроки (август 2015 г.). Средние для водохранилища концентрации хлорофилла с феопигментами уменьшались вниз по течению Волги от значений гипертрофной категории в Ивановском ( $232 \pm 60$ ), к эвтрофной – Угличском ( $97 \pm 33$ ), Рыбинском ( $111 \pm 54$ ), Горьковском ( $85 \pm 26$ ) и мезотрофной – Чебоксарском ( $50 \pm 28$ ), Куйбышевском ( $39 \pm 6.7$ ), Саратовском ( $28 \pm 16$  мкг/г сухого грунта). Анализировали зависимость концентрации пигментов от типологических характеристик грунтов и глубины на станциях. Установили, что для всего массива данных, полученных в 2015 г., существует тесная зависимость концентрации осадочных пигментов от влажности ( $R^2=0.84$ ) и воздушно-сухой объемной массы ( $R^2=0.77$ ) донных отложений. Общая для исследуемых водохранилищ связь пигментов с глубиной не была выявлена, но по данным для отдельных водохранилищ показано сильное ослабление связи в направлении от Верхней Волги к Нижней (коэффициент детерминации  $R^2$  для уравнения степенной зависимости составил в Ивановском 0.90, Горьковском – 0.39 и Саратовском – 0.26). Концентрации хлорофилла с феопигментами в верхнем слое донных отложений в волжском каскаде близки к ранее полученным, и только в Ивановском водохранилище – существенно выше, чем в предшествующий период (1991–2001 гг.). В целом, результаты показали, что условия, наиболее благоприятные для накопления и сохранения растительных пигментов в донных отложениях, создаются в водохранилищах Верхней Волги, а наименее благоприятные – в водохранилищах Нижней Волги. Содержание хлорофилла *a* (с феопигментами) в водохранилищах волжского каскада в пересчете на условную биомассу водорослей составляет незначительное количество (0.5–1.4%) от первичной продукции планктонных водорослей.

*Ключевые слова:* растительные пигменты, донные отложения, трофическое состояние, водохранилища Волги.

DOI 10.24411/0320-3557-2018-1-0008

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение растительных пигментов в донных отложениях как интегральных показателей трофического состояния водоемов стало одним из направлений гидроэкологии. Сведения о содержании и распространении осадочных пигментов и, прежде всего, хлорофилла *a*, отражают итог взаимодействия пелагической и донной подсистем. По концентрации хлорофилла в донных отложениях можно получить информацию не только о продукционных свойствах бентали, но и о новообразовании органического вещества в планктоне. Для получения представлений о продуктивности экосистемы на основе растительных пигментов необходимо учитывать закономерности их распределения в разных экологических условиях и зависимости содержания пигментов от комплекса биотических и абиотических факторов. Однако превалирующая часть исследований по осадочным пигментам была выполнена на озерах [Trifonova, Davydova, 1983; Swain, 1985; Leavitt, Findlay, 1994; Ostrovsky, Yacobi, 1999; Buchaca, Catalan, 2007; Reuss et al., 2010; и др.].

Волжский каскад водохранилищ – главная водная артерия РФ, одна из уникальных

экосистем, имеющая протяженность 3530 км и расположенная в разных природных зонах (от лесной зоны до пустыни). Широкий диапазон условий внешней среды в пределах единой водной экосистемы дает основание использовать ее в качестве модельной системы для решения ряда научных и практических задач. Первые сведения о содержании растительных пигментов в донных отложениях водохранилищ Волги были получены, в основном, эпизодически в разные годы, что затрудняет сравнительный анализ и обобщение результатов [Номоконова, 1989 (Nomokonova, 1989)]. Возможности использования осадочных пигментов в экологическом мониторинге водохранилищ раскрываются в ряде публикаций [Сигарева, 2012 (Sigareva, 2012); Сигарева и др., 2013, 2016 (Sigareva et al., 2013, 2016)]. Цель настоящей работы – определить содержание растительных пигментов в верхнем слое донных отложений в максимально сжатые сроки, и на основе пигментных характеристик сравнить трофические свойства дна в водохранилищах каскада Волги.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы получены в комплексной экспедиции ИБВВ РАН и ИО РАН. Пробы донных отложений собирали с 12 по 31 августа 2015 г. коробчатым дночерпателем из верхнего 5-сантиметрового слоя на 62 станциях 7 водохранилищ Волги. Растительные пигменты анализировали спектрофотометрическим методом в общем экстракте 90% ацетоном на спектрофотометре Lambda-25 (Perkin Elmer, США). Хлорофилл *a* и продукты его распада – феофигменты рассчитывали по уравнениям Лоренцена [Lorenzen, 1967] и выражали на массу сухого грунта – мкг/г и на единицу площади дна ( $1 \text{ м}^2$ ) и толщину слоя 1 мм сырого

грунта – мг/( $\text{м}^2 \text{ мм}$ ). Влажность грунта определяли после высушивания образцов при  $60^\circ\text{C}$ . Воздушно-сухую объемную массу грунта рассчитывали по составленной ранее формуле [Сигарева, 2012 (Sigareva, 2012)]. Статистический анализ выполняли на ПК по стандартным программам. Первичная продукция фитопланктона волжских водохранилищ за год, использованная для оценки степени ее утилизации, рассчитана на основании среднесуточных значений за период открытой воды по данным Н.М. Минеевой [Минеева, 2009 (Mineeva, 2009)].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Водохранилища волжского каскада различаются параметрами основных абиотических факторов, регулирующих первичную продукцию (интенсивности падающей на поверхность воды солнечной радиации, температуры воды и концентрации элементов минерального питания) в связи со сменой климатических условий в природных зонах на территории р. Волги и ее бассейна [Минеева и др., 2008 (Mineeva et al., 2008)]. В период наблюдений 2015 г. температура, цветность и прозрачность воды были близкими к характерным значениям соответствующих показателей для волжских водохранилищ в летний период [Минеева и др., 2008 (Mineeva et al., 2008)]. Вниз по каскаду увеличивались глубина водной толщи и прозрачность воды, а также уменьшалась ее цветность. Содержание кислорода в воде чаще всего превышало порог насыщения и распределялось по глубине равномерно, и только в отдельных местах отмечалось уменьшение его концентрации в нижних слоях воды.

Показатели илонакопления и осадкообразования в целом по каскаду отражают восходящий тренд массы и толщины отложений от водохранилищ Верхней Волги к Средней и Нижней [Законнов, Законнова, 2008 (Zakonnov, Zakonnova, 2008)]. Наибольшие скорости аккумуляции взвеси отмечены для водохранилищ озеровидного типа – Рыбинского и Куйбышевского. В каждом водохранилище отмечается возрастание интенсивности осадконакопления от места выклинивания подпора к плотине, а также в направлении от речных участков к озеровидным [Законнов, Законнова, 2008 (Zakonnov, Zakonnova, 2008)].

Донные отложения на исследуемых станциях были характерными для волжских водохранилищ. Основные типы грунтов: песок

(иногда с гравием), илистый песок (иногда с гравием), песчанистый ил, торфогенный ил, глинистый ил (табл. 1). В направлении от Верхней к Средней и Нижней Волге увеличивается встречаемость песчаных грунтов, характеризующихся относительно низкой влажностью и высокой воздушно-сухой объемной массой. С этими типологическими свойствами донных отложений связано содержание растительных пигментов. В песках, как правило, растительных пигментов гораздо меньше, чем в илах. Низкие концентрации пигментов ( $<1 \text{ мкг/г}$  сухого грунта) отмечены в донных отложениях Средней и Нижней Волги, высокие ( $>200 \text{ мкг/г}$  сухого грунта) характерны для Верхней Волги (табл. 1).

*Трофическое состояние бентали.* Концентрации хлорофилла с феофигментами в донных отложениях водохранилищ Волги соответствуют разным трофическим уровням. Если принять градацию [Möller, Scharf, 1986], в которой к олиготрофной категории относятся величины  $<13$ , мезотрофной –  $13\text{--}60$ , эвтрофной –  $60\text{--}120$  и гипертрофной  $>120 \text{ мкг/г}$  сухого грунта, то в волжском каскаде на долю величин, соответствующих этим категориям трофии, приходится 25.8, 32.3, 14.5 и 27.4% всего числа данных. Средние концентрации осадочных пигментов для всех станций каждого из водохранилищ уменьшаются вниз по каскаду от величин гипертрофной категории (в Ивановском) к эвтрофным (в Угличском, Рыбинском, Горьковском) и мезотрофным (в Чебоксарском, Куйбышевском, Саратовском) (табл. 2).

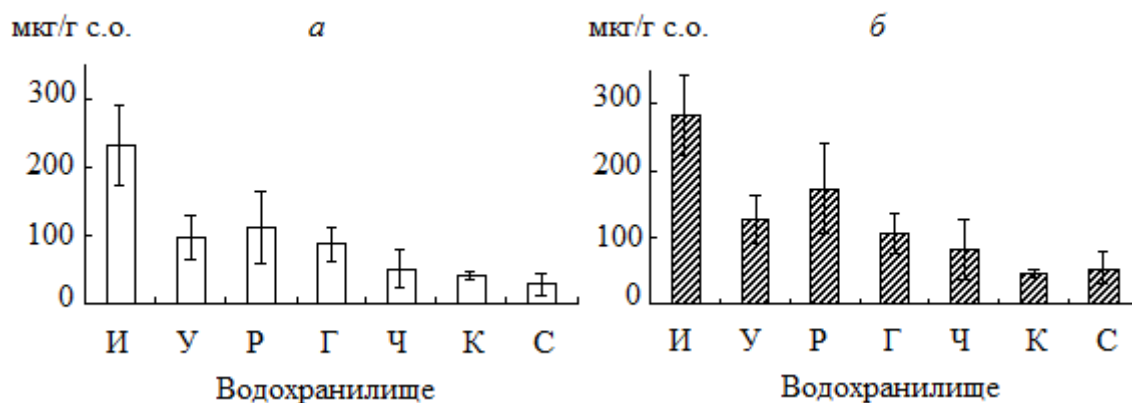
**Таблица 1.** Характеристика донных отложений и фонда осадочных пигментов на станциях водохранилищ Волги в августе 2015 г.

**Table 1.** Characteristics of bottom sediments and sedimentary pigments at the stations of the Volga River reservoirs in August 2015

Станции		Глубина, м	Тип грунта	Влаж- ность, %	Объемная мас- са, г/см3	Хлорофилл <i>a</i> +феопигменты, мкг/г сухого грунта	Феоиг- менты, %	E <sub>480</sub> /E <sub>665</sub>	E <sub>480</sub> / 1.7E <sub>665</sub>	
№	Месторасположение									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Липня	17	глинистый ил	84.2	0.18	361.2	63.5	68.6	1.71	1.22
2	Уходово	14	глинистый ил	79.5	0.24	292.7	69.0	64.6	1.79	1.32
3	Корчева	13	глинистый ил	80.4	0.22	301.8	67.5	66.1	1.71	1.25
4	Мошковицкий залив	2	илистый песок	23.9	1.47	7.7	11.3	73.5	1.96	1.36
5	Устье р.Созь	14	песчанистый ил	80.1	0.23	277.2	63.0	72.4	1.76	1.24
6	Свердлово	13	глинистый ил	78.5	0.25	361.7	90.1	69.1	1.37	0.98
7	Шошинский залив	2	илистый песок	25.6	1.41	10.1	14.2	81.5	1.55	1.03
8	Выше р. Шоша	9	песчанистый ил	57.5	0.58	115.3	67.0	70.5	1.56	1.11
9	оз. Видогощ	18	глинистый ил	82.9	0.19	625.9	119.8	74.2	1.71	1.18
10	Городня	10	песчанистый ил	64.5	0.46	159.9	73.1	86.2	1.56	1.01
11	Горохово	10	илистый песок	38.9	1.00	41.1	41.0	82.7	1.50	0.99
12	Устье Грехова ручья	21	глинистый ил	61.9	0.50	132.5	66.5	79.5	1.99	1.34
13	г. Калязин	12	глинистый ил	70.6	0.36	135.0	48.8	70.3	2.05	1.46
14	Ниже устья р. Нерль	13	песчанистый ил	73.2	0.32	240.4	77.7	73.0	1.84	1.28
15	Устье р. Медведица	9	песчанистый ил	44.9	0.85	45.9	38.8	70.1	1.72	1.22
16	Белый городок	9	илистый песок с гравием	25.6	1.41	25.3	35.6	76.4	1.94	1.33
17	Кимры	8	илистый песок	21.7	1.55	9.6	14.8	82.3	2.14	1.42
18	Ниже устья р. Дубна	9	песчанистый ил	58.7	0.56	87.6	48.9	86.1	2.51	1.62
19	Мышкин	7	песчанистый ил	58.7	0.56	76.2	42.6	88.7	2.57	1.63
20	Глебово	14	глинистый ил	77.9	0.26	267.3	68.6	58.6	2.26	1.71
21	Еремейцево	5	илистый песок	35.3	1.09	14.3	15.6	83.5	2.71	1.78
22	Крутец	7	илистый песок	33.9	1.14	23.8	27.0	80.7	2.12	1.41
23	Волково	16	торфогенный ил	81.8	0.21	173.7	35.8	75.4	3.25	2.24
24	г. Рыбинск, ниже очистных	6	песок	16.4	1.78	0.8	1.4	97.4	1.77	1.06
25	Выше г. Ярославль	5	песчанистый ил	27.3	1.35	12.4	16.6	77.1	2.43	1.66
26	Ниже г. Ярославль (Туношна)	6	илистый песок	17.4	1.73	3.2	5.6	82.1	2.28	1.51
27	Красный Профинтерн	11	песчанистый ил	32.0	1.19	21.2	25.3	79.7	2.47	1.66
28	Костромское расширение, русло	9	илистый песок	19.2	1.65	4.3	7.1	81.9	1.99	1.32
29	Там же, левый берег	5	песчанистый ил	71.5	0.35	84.1	29.3	83.5	2.94	1.93

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
30	Ниже г. Кострома	8	илистый песок	30.3	1.25	22.4	27.9	74.0	2.96	2.06
31	г. Волгореченск	11	илистый песок	32.0	1.19	19.5	23.2	80.5	2.63	1.76
32	Ниже г. Плес	11	песчанистый ил	74.2	0.31	128.5	39.5	84.1	3.37	2.20
33	Наволоки	9	глинистый ил	73.4	0.32	118.0	37.7	81.1	2.32	1.54
34	Ниже г. Кинешма	14	глинистый ил	79.7	0.23	155.6	36.2	83.5	2.43	1.59
35	г. Юрьевец	12	песчанистый ил	64.6	0.46	79.4	36.2	70.7	1.94	1.37
36	г. Пучеж, середина расширения	17	глинистый ил	79.2	0.24	267.1	64.0	68.6	2.02	1.45
37	В/б Нижегородской ГЭС	12	глинистый ил	85.3	0.16	269.9	43.6	73.8	2.53	1.76
				Чебоксарское вдхр.						
38	г. Н.Новгород, устье р. Ока	5	песок	18.6	1.68	6.9	11.6	90.3	1.38	0.87
39	Ниже Кстово	6	песок	15.0	1.84	0.9	1.6	76.2	1.30	0.89
40	Лысково-Макарьев	6	песок	19.1	1.66	7.6	12.7	75.6	1.26	0.87
41	Васильсурск	9	илистый песок	30.3	1.25	35.0	43.7	77.4	1.95	1.33
42	г. Козьмодемьянск	10	глинистый ил	76.4	0.28	190.1	52.7	82.6	3.23	2.13
43	Ильинка	15	песчанистый ил	27.2	1.35	12.8	17.3	91.8	2.38	1.48
44	В/б Чебоксарской ГЭС, левый берег	14	глинистый ил	77.6	0.26	94.6	24.7	93.1	2.03	1.25
				Куйбышевское вдхр.						
45	Ниже Звенитово	20	песок	16.4	1.77	0.4	0.8	60.6	1.51	1.14
46	Ниже Свияжска	20	илистый песок	30.2	1.25	10.7	13.4	84.2	2.63	1.72
47	Шеланга	16	песчанистый ил	36.9	1.05	26.5	27.8	88.0	3.22	2.05
48	Выше п. Камское устье	22	глинистый ил	55.7	0.62	26.6	16.4	87.8	2.69	1.72
49	устье р. Кама	12	глинистый ил	65.3	0.44	48.9	21.7	90.0	3.46	2.18
50	Против Атабаево, р. Кама	16	глинистый ил	71.3	0.35	57.5	20.2	92.1	2.48	1.54
51	Затон им. Куйбышева	9	глинистый ил	66.2	0.43	80.5	34.6	92.2	3.75	2.33
52	Выше п. Тетюши	19	глинистый ил	65.3	0.44	23.6	10.5	96.2	2.59	1.57
53	Против с. Кременки	23	глинистый ил	64.5	0.46	43.4	19.9	93.7	2.69	1.65
54	Ниже г. Новоульяновск	16	глинистый ил	75.6	0.29	56.1	16.2	95.5	1.97	1.20
55	Против устья р. Б. Черемшан	24	глинистый ил	62.7	0.49	46.9	22.9	78.5	2.68	1.81
56	В/б Самарской ГЭС	23	глинистый ил	75.8	0.29	50.4	14.4	95.0	2.48	1.51
				Саратовское вдхр.						
57	Нижний бьеф Самарской ГЭС	8	песок	18.4	1.69	0.7	1.2	100.0	2.22	1.31
58	о. Тушинский, 1749 км	14	песчанистый ил	35.5	1.09	41.7	45.5	93.9	2.54	1.56
59	Нижнепечерское, 1825 км	12	песок	18.5	1.68	0.5	0.9	100.0	1.75	1.03
60	Ниже г. Сызрань	12	песок с гравием	14.7	1.85	1.0	1.9	91.9	1.02	0.63
61	Разлив у Приволья	11	песчанистый ил	66.2	0.43	92.1	39.6	92.6	2.76	1.71
62	Выше г. Хвалыньск	16	песчанистый ил	53.1	0.67	30.9	20.6	89.9	2.37	1.49





**Рис. 1.** Концентрация хлорофилла *a* в сумме с феопигментами в донных отложениях всех типов (а) и илов (б) в водохранилищах Волги в 2015 г. И, У, Р, Г, Ч, К, С – Ивановское, Угличское, Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское, Куйбышевское, Саратовское водохранилища, соответственно.

**Fig. 1.** The concentrations of the sum of chlorophyll *a* and pheopigments in (a) all types of bottom sediments and (б) silts of the Volga River reservoirs in 2015. И, У, Р, Г, Ч, К, С correspond to Ivan'kovo, Uglich, Rybinsk, Gorki, Chelboksary, Kuybyshev, and Saratov reservoirs, respectively.

Аналогичное распределение (по каскаду) концентраций пигментов отмечено для илов (рис. 1). Илистые грунты аккумулируют пигментов больше, чем песчаные, поэтому именно с долей илов в грунтовом комплексе и изменениями в них концентраций пигментов (и, соответственно, органического вещества) связаны вариации трофического потенциала бентали.

Сравнение в многолетнем аспекте показало, что концентрации хлорофилла с феопигментами в верхнем слое отложений волжского каскада сходны по данным съемок 2015 г. и предшествующего периода (1991–2001 гг.). Однако в Ивановском водохранилище они стали почти в 2 раза выше [Сigareва, 2012 (Sigareva, 2012)]. Так, концентрации пигментов в Ивановском водохранилище по данным съемок 1996–1998 гг. ( $126 \pm 18$  мкг/г сухого грунта) относились к границе перехода между эвтрофной и гипертрофной категориями, а в настоящее время являются типично гипертрофными ( $232 \pm 60$  мкг/г).

**Состояние пигментного фонда.** Растительные пигменты в донных отложениях глубоководной зоны волжских водохранилищ, как правило, находятся в разрушенном состоянии. Суммарное содержание хлорофилла *a* с феопигментами в донных отложениях водохранилищ волжского каскада представлено преимущественно продуктами деградации хлорофилла – от 59 до 100%, по данным отдельных проб, и от 74 до 95%, по средним величинам для водохранилищ (табл. 2). Минимальный вклад дериватов хлорофилла отмечен в Ивановском водохранилище, максимальный – в Саратовском.

Другой показатель состояния пигментного комплекса – соотношение между концентрациями желтых и зеленых пигментов. Для оценки этого соотношения использовали индексы:  $E_{480}/E_{665}$  и  $E_{480}/1.7E_{665к}$ . Первый – реальное отношение оптических плотностей экстрактов в максимумах поглощения света каротиноидами (480 нм) и суммой хлорофилла *a* с феопигментами (665 нм), второй – рассчитанное отношение с учетом вклада феопигментов, у которых коэффициент экстинкции меньше, чем у хлорофилла *a*, в 1.7 раза. Все исходные значения этих индексов и средние для водохранилищ заметно  $>1.0$  (табл. 2), они свидетельствуют о значительной степени разрушения пигментного фонда в донных отложениях, причем преимущественно за счет зеленых пигментов, которые обесцвечиваются быстрее каротиноидов. В целом по каскаду пигментные индексы для донных отложений выше, чем для функционирующего фитопланктона, что также подтверждает сильную степень деградации фонда растительных пигментов в накопленных осадках.

**Зависимость концентрации растительных пигментов от типа грунта.** Тип грунта – основной фактор содержания и распределения пигментов в донных отложениях волжских водохранилищ [Сigareва, 2012 (Sigareva, 2012); Сigareва и др., 2013, 2016 (Sigareva et al., 2013, 2016)]. Результаты показали, что связь между содержанием хлорофилла с феопигментами и типологическими свойствами отложений нелинейная. Степенная и экспоненциальная связь осадочных пигментов с влажностью и воздушно-сухой объемной массой характеризуются высокими коэффициен-

тами детерминации (рис. 2). Аналогичный тип зависимости был показан на других водоемах – оз. Плещеево в Ярославской области [Сигарева и др., 2000 (Sigareva et al., 2000)], Влоц-

лавском водохранилище на р. Висле в Польше [Sigareva et al., 2011], малой реке Ильд – притоке Рыбинского водохранилища [Тимофеева и др., 2015 (Timofeeva et al., 2015)].

**Таблица 2.** Содержание растительных пигментов в донных отложениях водохранилищ Волги в августе 2015 г.

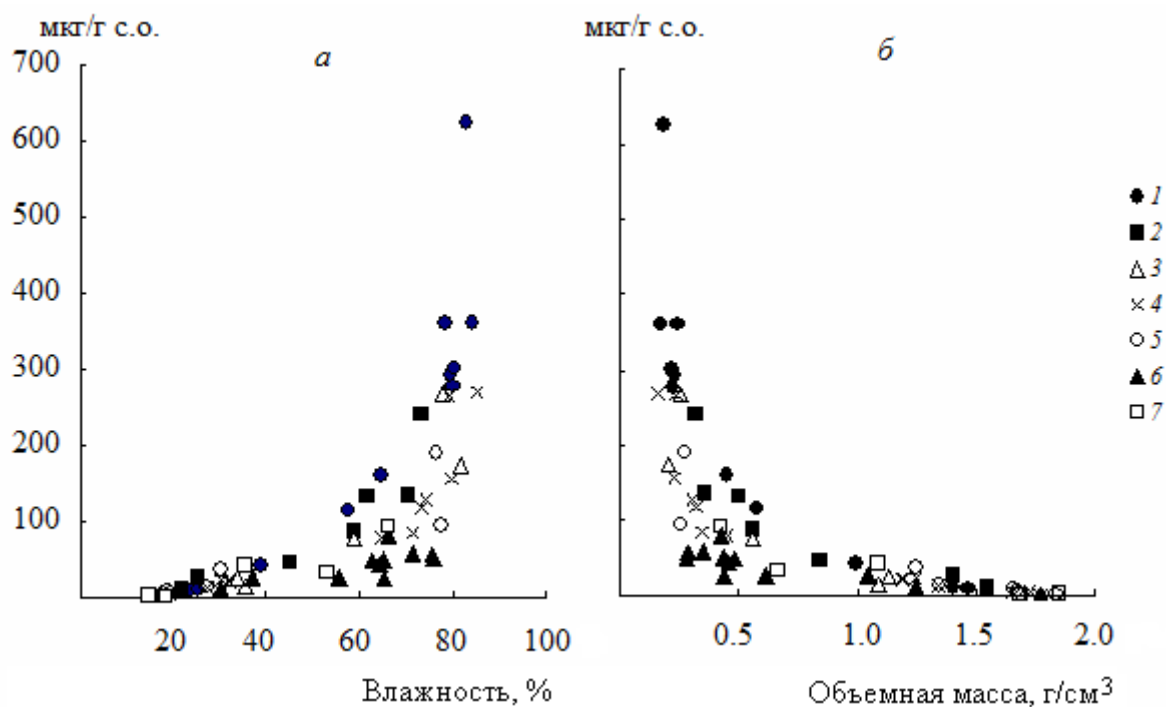
**Table 2.** The content of plant pigments in bottom sediments of the Volga River reservoirs in August 2015

Водохранилище	Хлорофилл <i>a</i> +феопигменты		Феопигменты, %	E <sub>480</sub> /E <sub>665</sub>	E <sub>480</sub> /1.7E <sub>665к</sub>
	мкг/г сухого грунта	мг/м <sup>2</sup> мм			
Иваньковское	<u>7.7–626</u> 232±60 (81)	<u>11.3–120</u> 61.8±9.9 (50)	<u>65–86</u> 74±2.2 (10)	<u>1.4–2.0</u> 1.65±0.05 (10)	<u>1.0–1.4</u> 1.15±0.04 (12)
Угличское	<u>9.6–240</u> 97±33 (83)	<u>15–78</u> 47±8.4 (44)	<u>70–86</u> 77±2.5 (8)	<u>1.7–2.5</u> 2.03±0.10 (13)	<u>1.2–1.6</u> 1.38±0.05 (10)
Рыбинское	<u>14–267</u> 111±54 (97)	<u>16–69</u> 38±10 (52)	<u>59–89</u> 77±5.8 (15)	<u>2.1–3.3</u> 2.58±0.22 (17)	<u>1.4–2.2</u> 1.76±0.15 (17)
Горьковское	<u>0.8–270</u> 85±26 (110)	<u>1.4–64</u> 28±4.7 (60)	<u>67–97</u> 80±2 (9)	<u>1.8–3.4</u> 2.43±0.12 (18)	<u>1.1–2.2</u> 1.63±0.08 (18)
Чебоксарское	<u>0.9–190</u> 50±29 (140)	<u>1.6–53</u> 24±7.5 (79)	<u>76–93</u> 84±3.2 (9)	<u>1.3–3.2</u> 1.93±0.29 (37)	<u>0.9–2.1</u> 1.26±0.19 (36)
Куйбышевское	<u>0.4–80</u> 39±6.7 (57)	<u>0.8–35</u> 18.2±2.6 (47)	<u>61–96</u> 88±3 (11)	<u>1.5–3.8</u> 2.68±0.18 (22)	<u>1.1–2.3</u> 1.70±0.11 (21)
Саратовское	<u>0.5–92</u> 27.8±16 (130)	<u>0.9–45.5</u> 18.3±9.1 (90)	<u>90–100</u> 95±1.9 (4.5)	<u>1–2.8</u> 2.11±0.28 (30)	<u>0.6–1.7</u> 1.29±0.18 (31)
Все вдхр.	<u>0.4–626</u> 96±15.4 (125)	<u>0.8–120</u> 33.7±3.2 (74)	<u>59–100</u> 82±1.3 (12)	<u>1–3.8</u> 2.2±0.1 (27)	<u>0.6–2.3</u> 1.5±0.0 (25)

Примечание. Над чертой – пределы, под чертой – среднее со стандартной ошибкой, в скобках – коэффициент вариации, %.

*Связь концентрации осадочных пигментов с глубиной.* Глубина – одна из основных морфометрических характеристик водоема, обуславливающая свойства его экосистемы и, прежде всего, параметры фотосинтезирующей зоны. От глубины зависит время оседания взвеси и состояние растительных пигментов, поступающих на дно. Исследования показали, что связь растительных пигментов в донных отложениях с глубиной в водоеме и в каскаде неоднозначная. Для всех полученных данных в каскаде связь пигментов с глубиной (и линейная, и нелинейная) характеризовалась крайне низкими коэффициентами детерминации (табл. 3, рис. 3). В то же время, в отдельных водохранилищах Верхней и Средней Волги эта связь была достаточно сильной. Рассматриваемая зависимость (концентрации растительных пигментов в донных отложениях от глубины на станции) ослабевает в водохранилищах нижней части каскада (рис. 3). Предположим, что фактор, нивелирующий влияние глубины на накопление и сохранение пигментов в отложениях водохранилищ – скорость течения, усиление которой в Нижней Волге препятствует оседанию взвеси. В южной части каскада интенсивные деструкционные процессы в водной толще, очевидно, приводят к более полной утилизации органического вещества (и соответственно растительных пигментов), синтезированного фитопланктоном.

Концентрации растительных пигментов в донных отложениях можно рассматривать как остаточное количество новообразованного органического вещества после взаимодействия продукционных и деструкционных процессов в водоеме, а также как показатель утилизации первичной продукции в трофических цепях экосистемы. Оценка этого показателя ранее выполнялась на озерах и водохранилищах волжского бассейна по алгоритму: пересчет среднегодовой концентрации хлорофилла в сумме с феопигментами в отложениях в углерод условной биомассы водорослей и сравнении его количества с первичной продукцией водоема за год, выраженной в единицах углерода [Сигарева, 2012 (Sigareva, 2012)]. Рассчитанное содержание углерода условной биомассы водорослей в донных отложениях, как правило, <1% первичной продукции. По данным, полученным в 2015 г., рассматриваемый показатель составил 0.5–1.4% (среднее – 1.0%). Почти все новообразованное при фотосинтезе органическое вещество (более 98% первичной продукции) утилизируется в экосистеме водохранилищ волжского каскада.



**Рис. 2.** Зависимость суммарной концентрации хлорофилла с феопигментами в донных отложениях от влажности грунта (а) и воздушно-сухой объемной массы (б) в водохранилищах Волги. Водохранилища: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 — Ивановское, Угличское, Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское, Куйбышевское, Саратовское, соответственно.

**Fig. 2.** Relationship of the sum of sedimentary chlorophyll *a* and pheopigments with (a) water content and (б) air-dry volumetric mass of bottom sediments in Volga River reservoirs: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 correspond to Ivan'kovo, Uglich, Rybinsk, Gorki, Cheboksary, Kuybyshev, and Saratov reservoirs, respectively.

**Таблица 3.** Коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) для связи концентрации растительных пигментов в донных отложениях с глубиной в водохранилищах Волги в августе 2015 г.

**Table 3.** Coefficients of determination ( $R^2$ ) for relationship between concentrations of sedimentary pigments and water depth in Volga River reservoirs in August 2015

Водохранилище	Глубина, м				$R^2$ для линейной регрессии	$R^2$ для степенной регрессии
	минимум	максимум	среднее с ошибкой	$C_v$ , %		
Иваньковское	2	18	11.1±1.7	48	0.78	0.91
Угличское	8	21	11.6±1.9	39	0.30	0.47
Рыбинское	5	16	8.8±2.8	56	0.92	—
Горьковское	5	17	9.8±1	37	0.52	0.39
Чебоксарское	5	15	9.3±1.6	43	0.12	0.39
Куйбышевское	9	24	18.3±1.4	25	0.23	0.08
Саратовское	8	16	12.2±1.2	22	0.03	0.26
Все водохранилища	2	24	12.0±0.7	44	0.07	0.11

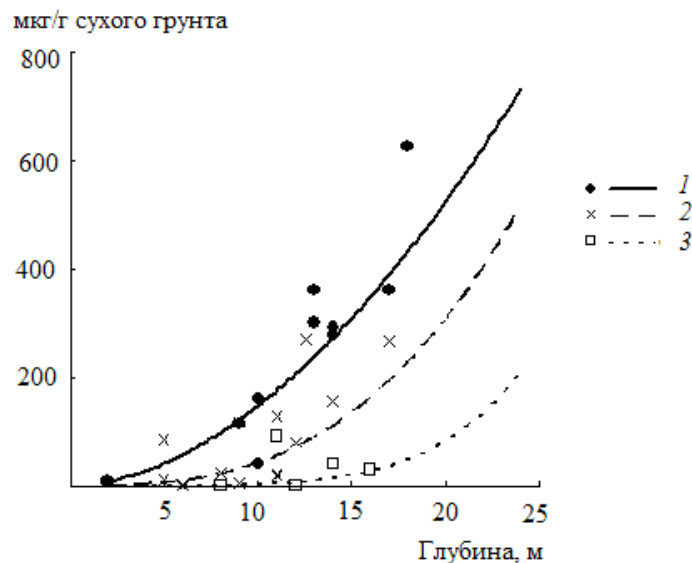
### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена последовательность водохранилищ Волги по уровню содержания растительных пигментов в донных отложениях на основе анализа материала, собранного в кратчайшие сроки. Результаты показали, что условия, наиболее благоприятные для накопления и сохранения растительных пигментов в донных отложениях, создаются в водохранилищах Верхней Волги, а наименее благоприятные — в водохранилищах Нижней Волги. Для донных отложений Ивановского водохранилища характерны концентрации осадочных пигментов

гипертрофной категории Угличского, Рыбинского, Горьковского — эвтрофной, Чебоксарского, Куйбышевского и Саратовского — мезотрофной. Современный уровень содержания пигментов в донных отложениях близок к отмечаемому в конце XX века во всех водохранилищах, кроме Ивановского, где средняя концентрация возросла. Распределение содержания пигментов в отложениях волжского каскада водохранилищ согласуется со структурой грунтового комплекса, формирующейся в зависимости от условий в соответствующих

природных зонах. Во всех водохранилищах содержание растительных пигментов в среднегодовом слое осадконакопления невелико, что свидетельствует об эффективном функциони-

ровании экосистемы волжского каскада. Причины многолетних изменений концентраций осадочных пигментов в каскаде водохранилищ требуют дальнейшего изучения.



**Рис. 3.** Связь концентрации хлорофилла *a* с феопигментами в донных отложениях с глубиной на станциях Иваньковского (1), Горьковского (2) и Саратовского (3) водохранилищ.

**Fig. 3.** Relationship between the sum of chlorophyll *a* and pheopigments in bottom sediments and water depth in the Volga River reservoirs: (1–3) correspond to Ivan'kovo, Gorki, and Saratov reservoir

Авторы выражают благодарность Р.А. Ложкиной за сбор проб донных отложений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Законнов В.В., Законнова А.В. Географическая зональность осадконакопления в системе водохранилищ Волги // Изв. РАН. Сер. геогр. 2008. № 2. С. 105–111.
- Минеева Н.М. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус. 2009. 279 с.
- Минеева Н.М., Сигарева Л.Е. Паутова В.Н., Номоконова В.И. Природные и антропогенные факторы функционирования фитопланктона зарегулированной Волги // Изв. Самар. НЦ РАН. 2008. Т. 10, № 5/1. С. 216–227.
- Сигарева Л.Е. Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2012. 217 с.
- Сигарева Л.Е., Законнов В.В., Шарапова Н.А. Оценка экологического состояния оз. Плещеево по пигментным характеристикам донных отложений // Проблемы региональной экологии. 2000. № 6. С. 100–113.
- Сигарева Л.Е., Пырина И.Л., Тимофеева Н.А. Межгодовая динамика растительных пигментов в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища // Труды ИБВВ РАН. Ярославль: Филигрань, 2016. Вып. 76 (79). С. 119–130.
- Тимофеева Н.А., Сигарева Л.Е., Законнов В.В. Растительные пигменты в донных отложениях как показатели трофического состояния малой реки // Вода: химия и экология. 2015. № 7. С. 18–24.
- Номоконова В.И. Седиментация фитопланктона и его содержание в донных отложениях // Экология фитопланктона Куйбышевского водохранилища. Л.: Наука, 1989. С. 237–249.
- Buchaca T., Catalan J. Factors influencing the variability of pigments in the surface sediments of mountain lakes // Freshwater biology. 2007. Vol. 52. P. 1365–1379.
- Leavitt P.R. A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance // J. Paleolimnol. 1993. № 9. P. 109–127.
- Leavitt P.R., Findlay D.L. Comparison of fossil pigments with 20 years of phytoplankton data from eutrophic Lake 227, Experimental Lakes Area, Ontario // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1994. Vol. 51. P. 2286–2299.
- Lorenzen C.J. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations // Limnol. Oceanogr. 1967. Vol. 12, № 2. P. 343–346.
- Möller W.A.A., Scharf B.W. The content of chlorophyll in the sediment of the volcanic maar lakes in the Eifel region (Germany) as an indicator for eutrophication // Hydrobiologia. 1986. Vol. 143. P. 327–329.
- Ostrovsky I., Yacobi Y.Z. 1999. Organic matter and pigments in surface sediments: possible mechanisms of their horizontal distributions in a stratified lake // Can. J. Fish. Aquat. Sci. Vol. 56. P. 1001–1010.
- Reuss, N., Leavitt P.R., Hall R.I., Bigler C., Hammarlund D. 2010. Development and application of sedimentary pigments for assessing effects of climatic and environmental changes on subarctic lakes in northern Sweden // J. Paleolimnol. Vol. 43. P. 149–169.

- Sigareva L.E., Zakonnov V.V., Gerszhevskiy P. Content and Distribution of the Plant Pigments in the Bottom Sediments of The Eutrophic Wloclawek Reservoir // *Hydrobiological Journal*. 2011. Vol. 47, № 3. P. 57–66.
- Trifonova I.S., Davydova N.N. 1983. Diatoms in the plankton and sediments of two lakes of different trophic type // *Hydrobiologia*. Vol. 103. P. 265–268.

## REFERENCES

- Buchaca T., Catalan J. 2007. Factors influencing the variability of pigments in the surface sediments of mountain lakes // *Freshwater biology*. Vol. 52. P. 1365–1379.
- Leavitt P.R. 1993. A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance // *J. Paleolimnol.* № 9. P. 109–127.
- Leavitt P.R., Findlay D.L. 1994. Comparison of fossil pigments with 20 years of phytoplankton data from eutrophic Lake 227, Experimental Lakes Area, Ontario // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* Vol. 51. P. 2286–2299.
- Lorenzen C.J. 1967. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations // *Limnol. Oceanogr.* Vol. 12, № 2. P. 343–346.
- Mineeva N.M. 2009 [Plankton primary production in the Volga River reservoirs]. Yaroslavl: Print House. 279 p. [In Russian]
- Mineeva N.M., Sigareva L.E., Pautova V.N., Nomokonova V.I. 2008. [Natural and anthropogenic factors of phytoplankton functioning in the regulated Volga] // *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*. Vol. 10, № 5/1. P. 216–227. [In Russian]
- Möller W.A.A., Scharf B.W. The content of chlorophyll in the sediment of the volcanic maar lakes in the Eifel region (Germany) as an indicator for eutrophication // *Hydrobiologia*. 1986. Vol. 143. P. 327–329.
- Nomokonova V.I. 1989. [Sedimentation of phytoplankton and its content in bottom sediments]. *Phytoplankton Ecology in the Kuibyshev Reservoir*. Leningrad: Nauka. P. 237–249. [In Russian]
- Ostrovsky I., Yacobi Y.Z. 1999. Organic matter and pigments in surface sediments: possible mechanisms of their horizontal distributions in a stratified lake // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* Vol. 56. P. 1001–1010.
- Reuss, N., Leavitt P.R., Hall R.I., Bigler C., Hammarlund D. 2010. Development and application of sedimentary pigments for assessing effects of climatic and environmental changes on subarctic lakes in northern Sweden // *J. Paleolimnol.* Vol. 43. P. 149–169.
- Sigareva L.E. 2012. [Chlorophyll in bottom sediments of the Volga water bodies]. Moscow: KMK Scientific Press. 217 p. [In Russian]
- Sigareva L.E., Pyrina I.L., Timofeeva N.A. 2016. [Interannual dynamics of chlorophyll content in plankton and bottom sediments of the Rybinsk reservoir] // *Trudy IBVV RAN. Vypusk 76 (79)*. Yaroslavl': Filigran'. P. C. 119–130. [In Russian]
- Sigareva L.E., Zakonnov V.V., Gerszhevskiy P. Content and Distribution of the Plant Pigments in the Bottom Sediments of The Eutrophic Wloclawek Reservoir // *Hydrobiological Journal*. 2011. Vol. 47, № 3. P. 57–66.
- Sigareva L.E., Zakonnov V.V., Sharapova N.A. 2000. [Estimation of ecological state of the lake Pleshcheevo using pigment characteristics of bottom sediments] // *Problemy regional'noy ekologii*. № 6. P. 100–113. [In Russian]
- Timofeeva N.A., Sigareva L.E., Zakonnov V.V. 2015. [Plant pigments in bottom sediments as indicators of the trophic state of a small river] // *Voda: khimiya i ekologiya*. № 7. P. 18–24. [In Russian]
- Trifonova I.S., Davydova N.N. 1983. Diatoms in the plankton and sediments of two lakes of different trophic type // *Hydrobiologia*. Vol. 103. P. 265–268.
- Zakonnov V.V., Zakonnova A.V. 2008. [Geographical Zonality of Sedimentation in Volga River Reservoirs] // *Izvestiya RAN. Seriya Geogr.* № 2. P. 105–111. [In Russian]

## CONTENT OF PLANT PIGMENTS IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE VOLGA RIVER RESERVOIRS

**L. E. Sigareva, N. A. Timofeeva**

*Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences*

*Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, 152742 Russia, e-mail: [sigareva@ibiw.yaroslavl.ru](mailto:sigareva@ibiw.yaroslavl.ru)*

This paper presents new data on contents of sedimentary pigments in cascade of the Volga River dam reservoirs obtained in August 2015. The pigment concentrations were determined by spectrophotometric method. The dependence of pigment concentrations on characteristics of bottom sediments and water depth are analyzed. The average concentrations of chlorophyll *a* + pheopigments in bottom sediments are shown to decrease from the Upper Volga toward the Lower Volga. Their values correspond to hypertrophic category in Ivan'kovo reservoir (232±60) and eutrophic category in Uglich (97±33), Rybinsk (111±54), and Gorki (85±26) reservoirs, while these are typical of mesotrophic waters in Cheboksary (50±28), Kuibyshev (39±6.7), and Saratov (28±16 µg/g dry matter) reservoirs. On the data set, the close relationships between the concentrations of sedimentary pigments and water content ( $R^2=0.84$ ), as well as air-dry volumetric mass ( $R^2=0.77$ ) of bottom sediments were revealed. The relationship between contents of sedimentary pigments and water depth was found for the separate reservoirs, however it was not revealed for the entire cascade. It was shown that the strength of this relation reduce from the Upper Volga toward the Lower Volga (the coefficients of determination of power regression were

equal to 0.90, 0.39, and 0.26 for Ivan'kovo, Gorki, and Saratov reservoirs, respectively). The concentrations of chlorophyll *a* together with pheopigments in surface bottom sediments are similar to those obtained in 1991–2001 for all of Volga River reservoirs except of Ivan'kovo reservoir, where these have significantly increased. In the Upper Volga, conditions for accumulation and preservation of sedimentary pigments are the most favorable, whereas these are more favorable in the Middle Volga than in the Lower Volga. The annual accumulation of pigments in bottom sediments equivalent to assumed algal biomass amounted a small part of primary phytoplankton production (0.5–1.4%) in the Volga River reservoirs.

*Keywords:* plant pigments, bottom sediments, trophic state, the Volga River reservoirs

Научное издание

*О. Л. Цельмович, Н. Г. Отюкова, И. А. Немировская, А. Г. Боев, А. М. Титова, А. В. Храмцова, А. В. Ермаков, В. В. Законнов, А. В. Законнова, А. И. Цветков, Н. Г. Шерышева, В. И. Лазарева, И. Э. Степанова, Е. Г. Пряничникова, С. Н. Перова, П. Г. Беляева, Н. М. Минеева, Л. Е. Сигарева, Н. А. Тимофеева, О. С. Макарова*

# **ГИДРОЛОГИЯ, ГИДРОХИМИЯ И РАСТИТЕЛЬНЫЕ ПИГМЕНТЫ ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА**

**Труды ИБВВ РАН, 2018, вып. 81(84)**

Подписано в печать 20.03.2018. Формат 60×90 1/8.

Усл. печ. л. 14,5. Заказ № 18086. Тираж 150 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «Филигрань»  
150049, г. Ярославль, ул. Свободы, 91, тел. 8 (4852) 98-27-05, [pechataet@bk.ru](mailto:pechataet@bk.ru)