

DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(1)-7

УДК 551.463.5

© А. А. Мольков^{1–3*}, И. А. Капустин^{1–3}, А. В. Ермошкин^{1,2}, Г. В. Лещев^{1,2}, Д. В. Доброхотова^{1,2}, Е. С. Кольцова¹, Б. В. Коновалов^{1,4}, А. Н. Дроздова^{1,4}, Н. А. Богатов², А. М. Чушнякова^{1,4}, А. Г. Кириллов², 2025

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

²Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

³Волжский государственный университет водного транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 5

⁴Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, 117997, Москва, Нахимовский пр., д. 36

*molkov@ipfran.ru

БИООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОД СРЕДНЕЙ ВОЛГИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ 2023 Г.

Статья поступила в редакцию 31.01.2024, после доработки 19.07.2024, принята в печать 26.11.2024

Аннотация

Настоящая работа открывает цикл статей, посвященных исследованиям биооптических характеристик волжских вод в контексте создания региональных биооптических моделей, учитывающих трансформацию оптических свойств волжских вод при распространении с севера на юг. В работе представлены результаты натурных измерений, выполненных в 2023 г. на первом из исследуемых участков, а именно в акваториях Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ. Измерения выполнялись с высоким пространственным разрешением — 3 м. На различных пространственных масштабах исследованы распределения и вариации различных гидрооптических и гидрологических характеристик, включая спектры яркости воды и синхронизированные с ними данные о содержании растворенных и взвешенных веществ, определяющих ее цвет (хлорофилл *a*, взвесь), а также сопутствующие данные о температуре воды, электропроводности, солёности, содержании растворенного кислорода, скорости и направлении течения. Оценено влияние различных притоков Волги, в том числе показана сезонная изменчивость биооптических характеристик в областях слияния Волги и Оки, Волги и Камы. Даны кросскорреляционные оценки. Полученные результаты расширяют представление об исследуемой акватории и будут использованы при анализе спутниковых данных высокого пространственного разрешения и разработке биооптических моделей.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, внутренние водоемы, средняя Волга, Чебоксарское водохранилище, Куйбышевское водохранилище, биооптические характеристики

© А. А. Molkov^{1–3*}, I. A. Kapustin^{1–3}, A. V. Ermoshkin^{1,2}, G. V. Leshchev^{1,2}, D. V. Dobrokhotova^{1,2}, E. S. Koltsova¹, B. V. Konovalov^{1,4}, A. N. Drozdova^{1,4}, N. A. Bogatov², A. M. Chushnyakova^{1,4}, A. G. Kirillov², 2025

¹N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, 23 Gagarin Avenue, Nizhny Novgorod 603022, Russia

²A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of RAS, 46 Ulyanova Str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

³Volga State University of Water Transport, 5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

⁴Shirshov Institute of Oceanology of RAS, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

*molkov@ipfran.ru

BIO-OPTICAL PROPERTIES OF THE MIDDLE VOLGA AT 2023

Received 31.01.2024, Revised 19.07.2024, Accepted 26.11.2024

Abstract

The presented paper opens a series of articles devoted to studies of the bio-optical characteristics of the Volga waters in the context of creating regional bio-optical models accounting the transformation of the water optical properties from north to south. The preliminary results of field measurements carried out in 2023 at the middle Volga are presented. Measurements were

Ссылка для цитирования: Мольков А.А., Капустин И.А., Ермошкин А.В., Лещев Г.В., Доброхотова Д.В., Кольцова Е.С., Коновалов Б.В., Дроздова А.Н., Богатов Н.А., Чушнякова А.М., Кириллов А.Г. Биооптические характеристики вод средней Волги по результатам натурных измерений 2023 г. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 1. С. 78–91. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-7

For citation: Molkov A.A., Kapustin I.A., Ermoshkin A.V., Leshchev G.V., Dobrokhotova D.V., Koltsova E.S., Konovalov B.V., Drozdova A.N., Bogatov N.A., Chushnyakova A.M., Kirillov A.G. Bio-optical Properties of the Middle Volga at 2023. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(1):78–91. doi:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-7

performed with high spatial resolution — 3 m. The spatial distributions and variations of various hydro-optical and hydrological characteristics, including water brightness spectra and the content of dissolved and suspended substances that determine its color (chlorophyll *a*, suspended solids), data on water temperature, electrical conductivity, salinity, dissolved oxygen content, flow velocity and direction, were investigated at different spatial scales. The influence of different Volga tributaries was assessed, including the seasonal variability of bio-optical characteristics in the areas of the confluence of the Volga and Oka, and the Volga and Kama. Cross-correlation estimates were given. The obtained results expand an actual picture of the studied water area and will be used in the analysis of satellite data and the development of bio-optical models.

Keywords: remote sensing, inland reservoirs, middle Volga, Cheboksary reservoir, Kuibyshev reservoir, bio-optical characteristics

1. Введение

Изучению качества вод пресноводных водоемов посвящено большое число зарубежных научных работ и национальных программ [1–5]. Особое внимание в них уделяется созданию систем дистанционного мониторинга на базе спутниковых данных и ГИС-систем, беспилотных летательных аппаратов, автоматических погружных зондов и флуориметров, лидаров палубного и авиационного базирования, способных предоставлять богатую информацию о качестве водных ресурсов на временных масштабах, близких к реальному времени для изучения трендов и контроля влияния антропогенных и биогенных факторов. При этом в открытых источниках есть множество подтверждений, указывающих на практическую эффективность запущенных программ, в целом, а также на используемые методы и подходы, в частности (см., например, [5–7]).

Похожие государственные программы [8–10] запускались и в России, но их результативность не всегда была очевидна: традиционные измерения на определенном наборе гидрометеорологических постов, осуществляемые надзорными государственными органами, хотя по-прежнему остаются важными элементами таких программ, но уже не отвечают на все имеющиеся запросы лимнологов, климатологов, биологов и др., а передовые научные изыскания и даже самые ценные научные результаты не могут быть оперативно внедрены в текущие системы государственного мониторинга. Наступившая осознанность этой преграды все чаще прослеживается в формулировках новых экологических проектов, требуя оперативного решения. Яркий пример такой преграды — невозможность (на текущий момент) признания спутникового мониторинга в качестве регулярного инструмента для количественных оценок тех или иных процессов, например, экологического состояния внутренних водоемов в силу отсутствия утвержденных методик валидации спутниковых данных.

С появлением и успешным функционированием космических сканеров цвета высокого и среднего пространственного разрешений и с оптимальным набором спектральных каналов, вести мониторинг качества воды и приповерхностных процессов на разных пространственных и временных масштабах стало возможным для водоемов практически любых размеров. Об этом свидетельствуют отчетные документы и научные публикации упомянутых ранее зарубежных программ [11, 12]. Использование этой возможности на водоемах России особенно актуально в связи с неудовлетворительным или даже неизвестным состоянием многих из них, значительной удаленностью или недостижимостью, а также в связи с активной цифровизацией всех отраслей народного хозяйства страны.

В 2023 году стартовал проект Российского научного фонда «Волжские биооптические алгоритмы», посвященный формированию «биооптического портрета» главной водной артерии центральной России — р. Волга на отрезке от Нижнего Новгорода (средняя Волга) до Волгограда (нижняя Волга). Настоящий проект включает два направления исследований: анализ трансформации волжских вод с севера на юг по биооптическим характеристикам и разработку биооптических моделей для космических сканеров цвета высокого и среднего разрешений. В настоящей работе приводятся результаты первого направления, основанные на данных натурных измерений, выполненных в 2023 на первой половине маршрута, проложенного по акватории средней Волги. Аналогичные исследования нижней Волги запланированы на 2024 г.

Важно отметить, что несмотря на то, что исследования на Волге ведутся давно, в литературе (см., например, [13–16]) нет необходимых и достаточных сведений необходимых для решения поставленной задачи. Во-первых, практика лимнологических исследований отличается от океанологических. Во-вторых, необходимость знания гидрооптических характеристик (спектральных показателей поглощения и ослабления, характеристик рассеяния, световых полей над и под водной поверхностью) применительно к спутниковому мониторингу внутренних водоемов возникла относительно недавно. В-третьих, в литературе, как правило, не публикуются координаты станций и время отбора проб воды, в результате чего становится невозможным отобрать те измерения, которые были проведены вблизи момента спутниковой съемки. Однако опубликованные данные все же полезны как справочные применительно к анализу восстановленных характеристик волжской воды по спутниковым данным.

2. Район исследований

Исследуемый район Волги целиком относится к средней Волге и охватывает два водохранилища — Чебоксарское водохранилище (ЧВ) на участке от Нижегородской ГЭС до Чебоксарской ГЭС и Куйбышевское водохранилище (КВ) на участке от Чебоксарской ГЭС до слияния с р. Кама в районе пгт. Камское устье (рис. 1). Этот район хорошо освещен в литературе по целому ряду направлений исследований, например, исследование гидродинамических процессов, эрозии берегов и изменчивости топографии дна, влияния режимов работы ГЭС, особенностей развития и распределения фито и зоопланктона, популяций рыб, донных отложений, антропогенного воздействия и др. Среди параметров, наиболее близких к проблеме спутникового мониторинга качества воды, наиболее обстоятельное описание в литературе имеют закономерности распределения и концентрации хлорофилла *a*, как одного из наиболее важных биооптических параметров [17–19]. Сведения по многим другим параметрам (содержание растворенного вещества, взвеси, цветности, прозрачности, и др.) в рассмотренной литературе фрагментарны (см., например, [20, 21]).

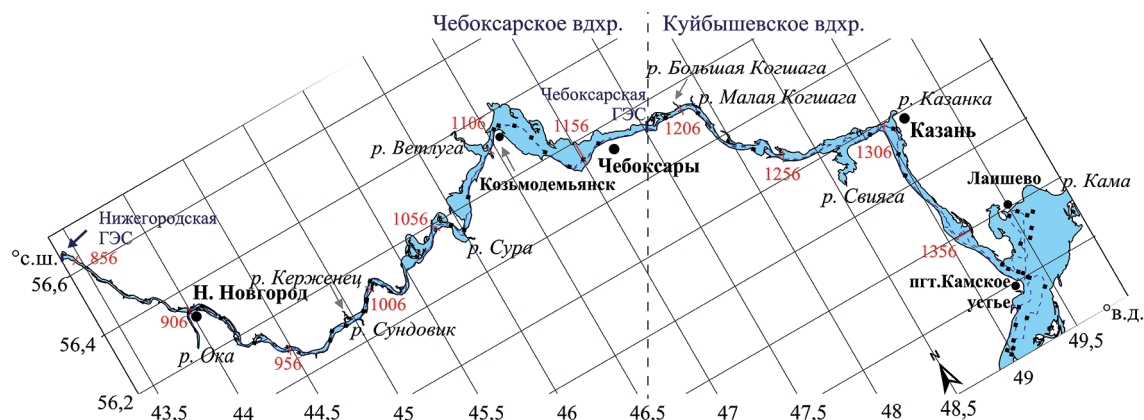


Рис. 1. Схема исследуемого района средней Волги. Цифрами обозначен километраж Волги от истока. Точками отмечены места отбора проб воды для лабораторного анализа

Fig. 1. Scheme of the study region of the middle Volga. The numbers indicate the mileage of the Volga from its source. The dots correspond to water samples

3. Методы и подходы

Натурные измерения в 2023 г. были проведены в ходе двух экспедиций: 17 июля — 08 августа и 09–16 сентября 2023 г. Первая экспедиция выполнена с борта глиссирующей моторной лодки «Волжанка-46», вторая с борта стальной водоизмещающей моторной яхты «Pedro Skiron 35». Схема размещения оборудования представлена на рис. 2.

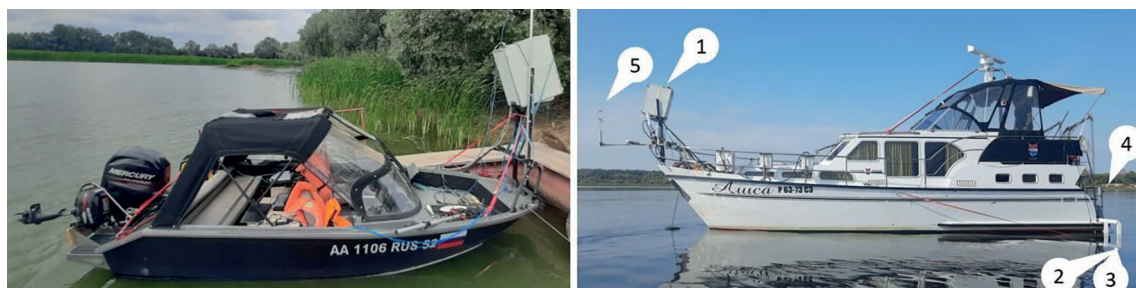


Рис. 2. Схема размещения оборудования во время экспедиций на средней Волге в 2023 году на моторной лодке «Волжанка-46» (слева) и на моторной яхте «Pedro Skiron 35» (справа): 1 — флуоресцентный лидар УФЛ-9, 2 — акустический доплеровский профилограф течений ADCP Workhorse Monitor 1200 kHz, 3 — СТД-зонд YSI EXO2 с дополнительными датчиками, 4 — проточная система, 5 — метеостанция

Fig. 2. Equipment positions on the motor boat “Volzhanka-46” (left) and on the motor yacht “Pedro Skiron 35” (right) during expeditions on the middle Volga in 2023: 1 — fluorescent lidar UFL-9, 2 — Doppler acoustic current profiler ADCP Workhorse Monitor 1200 kHz, 3 — CTD sonde YSI EXO2 with additional sensors, 4 — flow system, 5 — weather station

На носовом релинге под углом 10 градусов к вертикали был установлен флуоресцентный лидар УФЛ-9 разработки ИО РАН [22] для зондирования невозмущенного судном верхнего водного слоя и регистрации сигналов флуоресценции хлорофилла *a* и органического вещества (ОВ), а также сигнала обратного рассеяния, коррелирующего с содержанием минеральной взвеси. Погрешность измерений составляет 10 % для взвеси и ОВ и 16 % для хлорофилла *a*. Акустический доплеровский профилограф течений ADCP Workhorse Monitor 1200 kHz фиксировался в кормовой части судна на внешнем выносном кронштейне на глубине 0,5 м (уровень положения сенсоров) и удалении 0,5 м от борта. Погрешность измерений составляла 0,3 %. Из-за намагниченности корпуса судна направление течений корректировалось по данным внешнего GPS приемника, осуществляющего запись координат непосредственно в файл данных ADCP. Скорость и направление ветра регистрировались анемометром WindMaster Pro с последующим усреднением и пересчетом на скорость и курс судна по GPS. Зонд YSI EXO 2 устанавливался в проточную систему (вертикальная серая труба на рис. 2) таким образом, что сенсоры располагались на высоте 20 см от дна системы. Подача воды с горизонта 0,5 м осуществлялась в проточную систему снизу для исключения накопления и взмучивания осадка, излишки воды самотеком вытекали через верхнюю кромку. Зонд регистрировал температуру воды (°C), электропроводность (мкСм/см), растворенный кислород (мг/л), мутность (FNU), позднее пересчитываемую во взвесь (мг/л), концентрацию хлорофилла *a* (мкг/л), а также флуоресценцию ОВ (RFU), пересчитываемую в показатель поглощения $a(440)$ на длине волны 440 нм (м^{-1}). Погрешность измерений не превосходит 1 % (<https://www.ysi.com/exo2>).

Для пересчета сигналов флуоресценции оптических сенсоров (лидара и зонда) в биооптические характеристики, принятые в оптике океана, на всем маршруте была отобрана 101 проба воды из верхнего слоя толщиной 0–30 см с помощью ведра. Пробы воды фильтровались через фильтры Whatman GF/F 0.7 мкм на борту в тот же день. Фильтры использовались позднее в лаборатории для определения концентраций хлорофилла *a* и взвеси (минеральной и органической частей) по методике [23], фильтрат — для восстановления спектрального показателя поглощения света водой [24].

Все измерения, кроме отбора проб воды, производились во время движения судов: моторная лодка двигалась со скоростью 36 км/ч (10 м/с), моторная яхта — 10–12 км/ч. Измерительная техника работала непрерывно с частотой 1 Гц, что обеспечило получение данных с пространственным разрешением 3–10 м. После экспедиции данные со всех приборов были сведены в единый массив синхронизированных и геопривязанных данных. На его основе построены карты пространственно-временных распределений измеренных параметров и исследованы корреляции между параметрами. Для построения карт использовалось усреднение данных по 200 м (1 мин), для поиска корреляционных связей между измеренными характеристиками — 5 км. Ниже будут представлены данные по концентрации хлорофилла *a*, взвеси и ОВ как с лидара, так с зонда. Это связано с тем, что в начале пути лидар был запущен позднее, поскольку мешала дождливая погода для его корректной работы, в то время как на обратном пути вышла из строя помпа проточной системы (приблизительно в последней трети маршрута от Васильсурска до Нижнего Новгорода).

4. Результаты и обсуждение

4.1. Калибровки

На рис. 3 представлены калибровочные зависимости лидара и зонда для пересчета сигналов флуоресценции в размерные биооптические характеристики воды: хлорофилл *a*, показатель поглощения $a(440)$, взвесь (R^2 — коэффициент детерминации, N — число точек).

4.2. Пространственные распределения характеристик

Пространственное распределение характеристик на глубине полуметра попарно представлено на рис. 4 на основе данных зонда за 09–17 сентября: верхняя карта каждой пары соответствует прямому маршруту вниз по течению, нижняя — обратному маршруту (стрелки поясняют направление движения). Видно, что ключевые биооптические характеристики варьировались в значительных пределах 0,8–45 мкг/л (хлорофилла *a*), 2,8–3,8 мг/л (минеральная взвесь), 1–2,5 м^{-1} (показатель поглощения на длине волны 440 нм, $a(440)$), имея при этом различные пространственные масштабы флуктуаций. Так содержание пигмента на уровне 8–12 мкг/л наблюдалось вдоль всего маршрута, за исключением участка протяженностью 170 км от р. Ока до р. Сура (рис. 4, *a*, верхняя кривая). Поток окской воды с концентрацией пигмента на уровне 45 мкг/л (в створе слияния Оки и Волги, 906-й км), не смешиваясь с волжской, распространялся на 40 км до г. Кстово, ниже которого наблюдалось быстрое смешение потоков до равновесной концентрации 17 мкг/л,

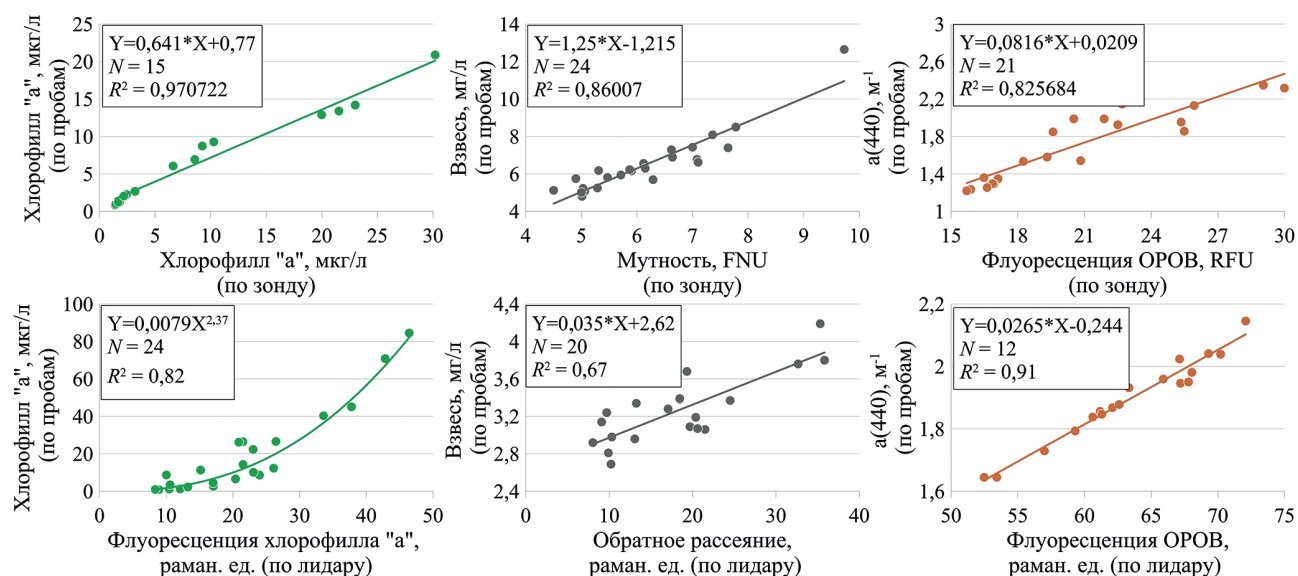


Рис. 3. Результаты калибровки зонда (верхний ряд) и лидара (нижний ряд)

Fig. 3. Calibration curves for YSI sonde (top) and LiDAR (bottom)

сохранявшейся на этом уровне вплоть до начала расширения Волги в районе р. Сура (1068-й км). Здесь концентрация падала до значений, близких к фоновым в начале маршрута — 8 мкг/л и сохранялась на таком уровне последующие 330 км до самого Камского устья (1400-й км). В Каме отмечено самое низкое содержание пигмента — 2–5 мкг/л. Локальное мелкокомасштабное повышение концентрации пигмента до 25–30 мкг/л наблюдалось вследствие нагонного эффекта под правым берегом за 15 км до Чебоксар (1160-й км). Важно отметить, что зарегистрированное пространственное распределение получено в условиях сонаправленного с течением продолжительного сильного северного ветра. В течение последующих 4 дней на обратном маршруте (рис. 4, а, нижняя карта) пространственное распределение пигмента в целом не поменялось, хотя в условиях штилевой ясной погоды приповерхностные скопления фитопланктона в районах с малой проточностью стали более частыми и протяженными (см., например, озерную часть ЧВ ниже г. Козьмодемьянск, участок 1120–1160-й км). Согласно результатам лабораторного анализа проб воды, в отдельных случаях встречались концентрации хлорофилла *a* до 256 мкг/л.

Пространственное распределение взвешенного вещества характеризовалось умеренным постоянством на уровне 5–10 мг/л в районе Нижнего Новгорода выше р. Ока и от р. Ветлуга до р. Кама (рис. 4, б, верхняя карта). При этом наиболее низкие концентрации порядка 5 мг/л зарегистрированы на хорошо проточном участке ниже Чебоксарской ГЭС и на р. Кама выше слияния с Волгой. Области с концентрацией взвеси порядка 10–12 мг/л установлены в условиях ветро-волнового воздействия в районах, подверженных эрозии берегов (крутые глиняные берега выше пгт. Камское устье), на мелководных поймах вследствие взмучивания донных осадков (ниже пгт. Лаишево в озерной части КВ), а также в областях, где проявляется нагонный эффект (например, фитопланктона в низовье озерной части ЧВ). Однако, наиболее заметные возрастания до 20 мг/л наблюдались на обратном пути в областях приповерхностного скопления фитопланктона в условиях штилевой погоды (см. для сравнения нижнюю карту на рис. 4, а). В таких районах согласно результатам лабораторного анализа 51 пробы воды вклад органической компоненты составлял до 45–70 %, при среднем вкладе в 37 % на протяжении всей исследуемой акватории в условиях перемешанного верхнего слоя в ветренную погоду. Концентрация же минеральной взвеси варьировалась в небольших пределах от 2,8 мг/л до 4,5 мг/л (рис. 4, в), при этом наибольшие концентрации зарегистрированы там же, где и скопления фитопланктона у поверхности (см. рис. 4, а и в, нижние карты). Вероятно, это связано с «захватом» мелких минеральных частиц колониальными видами фитопланктона посредством полисахаридной слизи [25].

Пространственное распределение последнего из рассматриваемых биооптических компонентов, а именно показателя поглощения $a(440)$, как индикатора растворенного органического вещества и гуминовых кислот в первую очередь, представлено на рис. 4, г. Видно, что $a(440)$ волжской воды характеризо-

вался стабильным значением $1,5 \text{ м}^{-1}$ до р. Сура и варьировался в небольшом диапазоне $1,7\text{--}2 \text{ м}^{-1}$ ниже нее до слияния с р. Кама. Наименьшие значения $1\text{--}1,2 \text{ м}^{-1}$ зарегистрированы в притоках Ока, Свияга и Кама. Значительно более контрастная картина возникала в условиях ясной штилевой погоды, когда показатель поглощения возрос до $2,5\text{--}3 \text{ м}^{-1}$ в районах скопления фитопланктона у поверхности, что вероятно вызвано продуцированием органического вещества клетками фитопланктона [26]. Надо отметить, что $a(440)$ оказался единственным из биооптических параметров, изменения которого вблизи притоков были регулярны (см. локальные вариации цвета напротив притоков на рис. 4, з).

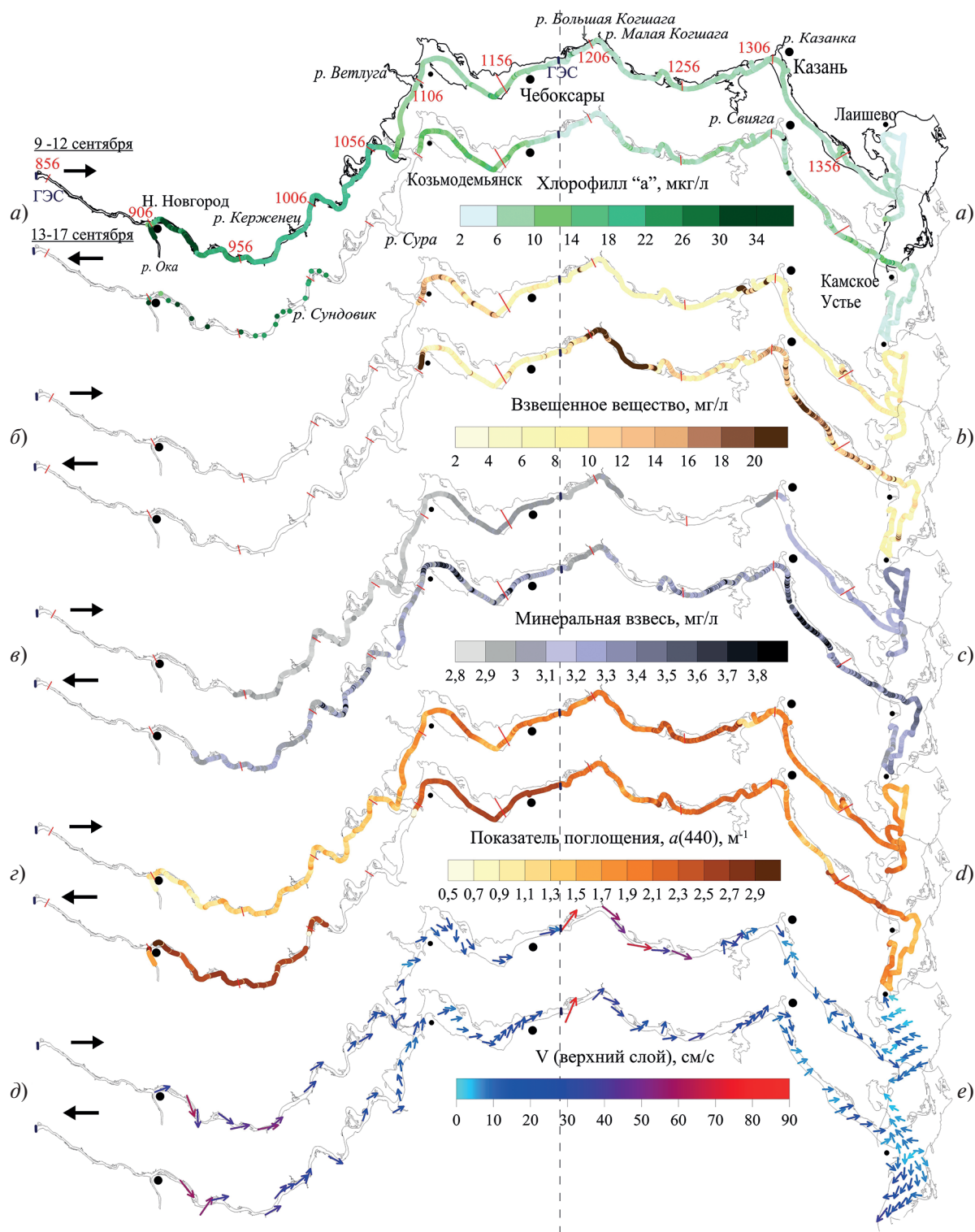


Рис. 4. Окончание на с. 84
Fig. 4. Fin in p. 84

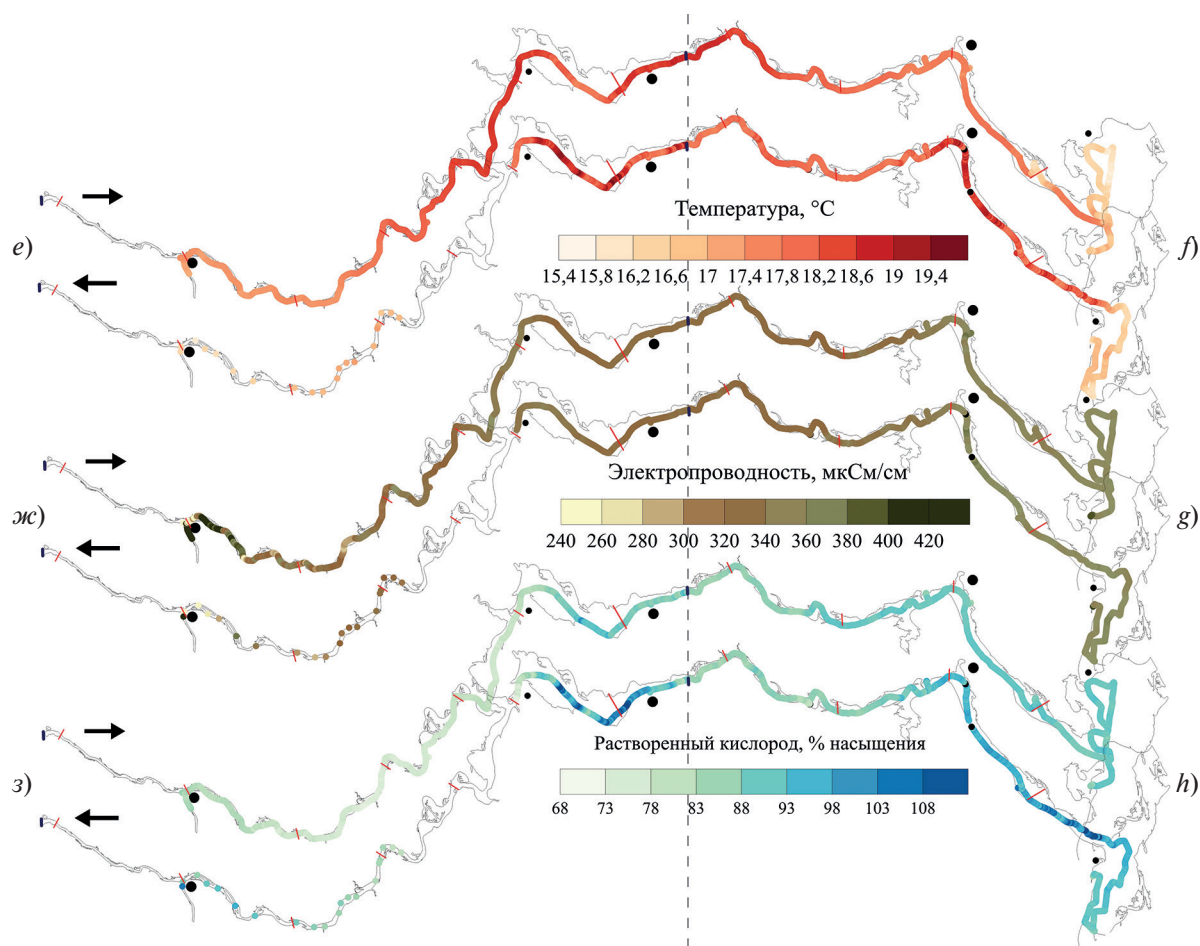


Рис. 4. Пространственное распределение (усреднение 200 м) биооптических характеристик на средней Волге за 09–17 сентября 2023 г.: верхняя кривая каждой пары соответствует движению по течению, нижняя — в обратном направлении (направление движения продублировано стрелками)

Fig. 4. Spatial distribution (averaging 200 m) of biooptical characteristics of the middle Volga at September 09–17, 2023: the upper distribution of each pair corresponds to movement with the Volga current, the bottom distribution — in the opposite direction. The movement direction is duplicated by arrows

В дополнение к биооптическим характеристикам на рис. 4, д-з представлены распределения важных гидрологических характеристик, отчасти проясняющих распределение биооптических. Среди них — течение на глубине 1 м (приповерхностное течение), температура воды, электропроводность и растворенный кислород. Согласно рис. 4, д наибольшая скорость течения в 1 м/с наблюдалась ниже Чебоксарской ГЭС в районе притоков Большая и Малая Кокшага (30 км от ГЭС) (аналогичные данные ниже Нижегородской ГЭС были опубликованы ранее в работе [27]). Ниже скорость потока в речных частях обоих водохранилищ потока падала до 15–30 см/с, а при переходе к озерной части до 5–15 см/с. Общую структуру течений на исследуемом участке акватории можно охарактеризовать как весьма сложную, поэтому регулярных корреляций с распределением биооптических характеристик не установлено, хотя в отдельных районах наблюдались общие закономерности проявления скоплений взвеси и повышенной температуры воды в областях с малой проточностью (озерные части ЧВ и КВ). Кроме того, пространственная структура скорости течения даже на масштабах нескольких дней (при движении с севера на юг и на обратном маршруте) практически не обладала повторяемостью, что может быть обусловлено движением носителя аппаратуры на периодических волнах попуска через ГЭС (при движении от Нижнего Новгорода до Новочебоксарска — Горьковской ГЭС, при движении от Чебоксар до Камского устья — Чебоксарской ГЭС).

Распределение температуры верхнего слоя воды представлено на рис. 4, е. Видно, что в речной части ЧВ температура воды составляла 17 °С, плавно возрастающая до 19 °С на участке от р. Керженец до р. Сура и оставаясь таковой всю озерную часть ЧВ. При этом температура воды сохранялась даже после прохож-

дения Чебоксарской ГЭС, что указывает на относительно однородное распределение температуры по глубине (вероятно, в силу перемешивания слоев под действием продолжительного ветрового воздействия), поскольку сброс воды осуществляется с нижних горизонтов. Двадцатью километрами ниже притоков Большая и Малая Кокшага температура воды резко снизилась на 1°C и оставалась таковой на протяжении последующих 150 км вплоть до Камского устья. Локальный минимум в $15,5^{\circ}\text{C}$ на мелководной пойме по левому берегу перед Камским устьем (напротив пгт. Теньки), вероятно, связан с влиянием холодных притоков, поскольку затекание холодной камской воды ($15,5^{\circ}\text{C}$) под левым берегом Волги установлено не было. Ниже, в зоне слияния с холодной камской водой волжский поток быстро остывал до тех же 17°C , которые наблюдались в начале маршрута в районе Нижнего Новгорода, при этом камский поток отчетливо прорисовывался левее, что совпадает с его идентификацией по показателю поглощения (см. для сравнения рис. 4, *з*). Следует отметить, что полученные температурные показатели скорее всего не являются типичными для данного периода года, поскольку в сентябре 2023 г. температура воздуха была существенно выше климатической нормы.

Следующий значимый параметр — электропроводность. Из рис. 4, *ж* видно, что в целом наблюдается плавное увеличение минерализации к югу, что согласуется с предшествующими исследованиями (см., например, [28]). Так электропроводность волжской воды в верхней части ЧВ перед Нижним Новгородом составляла 250 мкСм/см, в озерной части ЧВ — 320 мкСм/см, от р. Казанка и ниже по течению, включая Каму — 350 мкСм/см. Сравнение распределений на прямом и обратном маршруте указывает на постоянство распределений независимо от метеоусловий. При этом за счет не больших, но устойчивых вариаций (порядка 5 %) рассматриваемого параметра все же выделяются некоторые притоки (р. Ока, Керженец, Ветлуга), подобно проявлениям по показателю поглощения.

Наконец, на рис. 4, *з* представлено пространственное распределение растворенного в воде кислорода. Несмотря на изменчивость этой характеристики под действием ряда биологических процессов, можно отметить, что на момент съемки содержание растворенного кислорода в волжских водах ЧВ (за исключением участка от Козьмодемьянска до Чебоксар) было в среднем на 20 % меньше, чем в водах КВ (7 мг/л против 9 мг/л). В течение последующих нескольких суток распределение осталось прежним, за исключением локальных мелкомасштабных повышений до 12 мг/л в областях скопления фитопланктона.

4.3. Проявление притоков

Как уже отмечалось выше, некоторые притоки были отличимы по содержанию органического вещества (ОВ) в воде и ее электропроводности. Таблица 1 дает более полное количественное описание проявления притоков на всем протяжении маршрута экспедиции по величине контраста каждой из измеренных характеристик воды. Контраст рассчитывался как отношение значения характеристики в точке, напротив или ниже притока, к значению на 1–10 км выше притока (в зависимости от ширины устья и подпора). Исключение р. Ветлуга и р. Кама. Ветлуга имеет широкое устье, поэтому результат оценки контраста вблизи него сильно варьировался и был исключен из рассмотрения. Что касается р. Кама, то контраст определялся по значениям в двух точках — первая на русле р. Волга у пгт. Камское устье, вторая — на 30 км выше по Каме напротив пгт. Лайшево. Через знак «/» указаны значения на прямом маршруте в условиях перемешанного верхнего слоя под действием сильного ветра и значения на обратном маршруте, зарегистрированные в штилевую ясную погоду. Если за значимые контрасты принять контрасты, отличающиеся более чем на 15 %, то большая часть наиболее крупных притоков оказывается условно различимой. Однако изменение контрастов на прямом и обратном рейсе, связанное с принципиально различными метеоусловиями, указывает на, например, малую надежность использования взвеси и ее производных в качестве маркера притока. Исключение — р. Ока, воды которой в силу узкого устья и значительного расхода воды, соизмеримого с р. Волга ($1300\text{ м}^3/\text{с}$ против $2800\text{ м}^3/\text{с}$ соответственно), уверенно идентифицировались по всем биооптическим характеристикам. В качестве примера на рис. 5, *а* приведено спутниковое изображение слияния рек Волга и Ока, а на рис. 5, *б-г* — распределения хлорофилла, показателя поглощения $a(440)$ и электропроводности для этого района. Следует отметить, что среди прочих характеристик именно электропроводность несмотря на малый (3–5 %), но регулярный контраст оказалась надежным маркером различения вод практически всех притоков. Исключение составили воды в районе Камского устья, где однородная электропроводность наблюдалась во всем районе и даже выше по течению, вплоть до Казани.

Таблица 1

Table 1

Результаты расчета контраста для характеристик воды, измеренных зондом на глубине 0,5 м, в районе притока и выше него («—» — параметр не определен, н. д. — нет данных)

Results of contrast calculation for water characteristics measured by the sonde at a depth of 0.5 m, in the inflow area and above it («—» means parameter not defined, n. d. is no data)

	Ока	Сундовик	Сура	Ветлуга	Когшага	Свияга	Казанка	Кама
Биооптические характеристики								
Хлорофилл <i>a</i> , мкг/л	5,75/5,73	1,07/1,01	0,56/5,27	—/—	1,39/1,04	0,93/0,89	1,05/0,87	0,42/1,04
Показатель поглощения, м ⁻¹	0,82/0,54	0,79/1,01	1,16/0,78	—/—	1,15/0,93	0,42/1,02	0,84/0,93	0,7/0,72
Взвешенное вещество, мг/л	0,42/1,49	0,42/1,05	2,95/1,15	—/—	1,13/2,89	5,9/0,36	0,17/0,62	0,55/1,69
Гидрологические характеристики								
Температура воды, °С	0,98/0,99	1/1	1/ н. д.	1/ н. д.	0,97/1	0,98/1,01	1/1,02	0,89/0,96
Растворенный кислород, мг/л	1/1,19	1,03/1	1/ н. д.	1/ н. д.	1,02/1,04	0,97/1,04	1/1	1/0,98
Электропроводность, мкСм/см	2,83/2,47	0,95/0,96	1,1/ н. д.	1/ н. д.	1/0,95	1,03/0,98	1,05/1,02	0,99/1,02

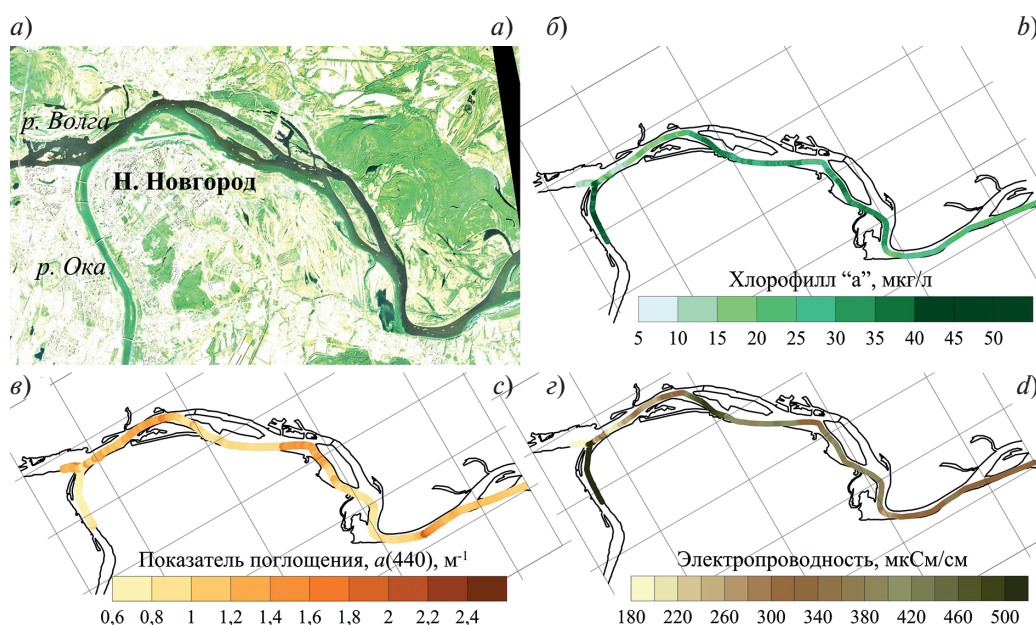


Рис. 5. RGB-композит слияния двух рек Волга и Ока в районе Нижнего Новгорода 20 сентября 2023 (а) и распределения хлорофилла *a* (б), показатель поглощения *a*(440) (в) и электропроводности (г).

Fig. 5. RGB composite of the confluence of Volga and Oka in the Nizhny Novgorod on September 20, 2023 (a), the corresponding distribution of chlorophyll *a* (b), absorption coefficient *a*(440) (c), and conductivity (d).

4.4. Сезонная изменчивость биооптических характеристик

Исследование временных масштабов изменчивости характеристик среды является обязательным вопросом при разработке биооптических алгоритмов для внутренних водоемов, хотя не все исследователи уделяют ему должное внимание [29]. Часто причиной расхождения измеренных и восстановленных по спутниковым данным характеристик является слишком большой временной интервал между спутниковой съемкой и подспутниковыми измерениями [30]. Представленные на рис. 4 пространственные распределения биооптических и гидрологических характеристик наглядно демонстрируют еще и временную изменчивость характеристик на масштабах 1–3 суток после смены погоды с пасмурной и ветренной на ясную и штилевую.

Совместный анализ данных обеих экспедиций (в июле и в сентябре) позволил выявить и сезонные изменения в содержании ОВ. Рис. 6 демонстрирует снижение ОВ к осени на примере двух противоположно расположенных районов исследуемой акватории, а именно на примере слияния Волги и Оки в Чебоксарском водохранилище и Волги и Камы в Куйбышевском водохранилище. Установлено, что в июле-августе по отношению к сентябрю показатель поглощения на русле Камы снижается с $1,5 \text{ м}^{-1}$ до $1,3 \text{ м}^{-1}$, на пойме по бокам от русла Камы с $2,0 \text{ м}^{-1}$ до $1,6 \text{ м}^{-1}$, на русле Волги с $3,1 \text{ м}^{-1}$ до $1,8 \text{ м}^{-1}$, по бокам от русла Волги с $2,8 \text{ м}^{-1}$ до $2,1 \text{ м}^{-1}$, на русле Оки с $2,0 \text{ м}^{-1}$ до $1,5 \text{ м}^{-1}$. Это снижение связано с фотодеградацией органики и, вероятно, ее потреблением развивающимся фитопланктоном.

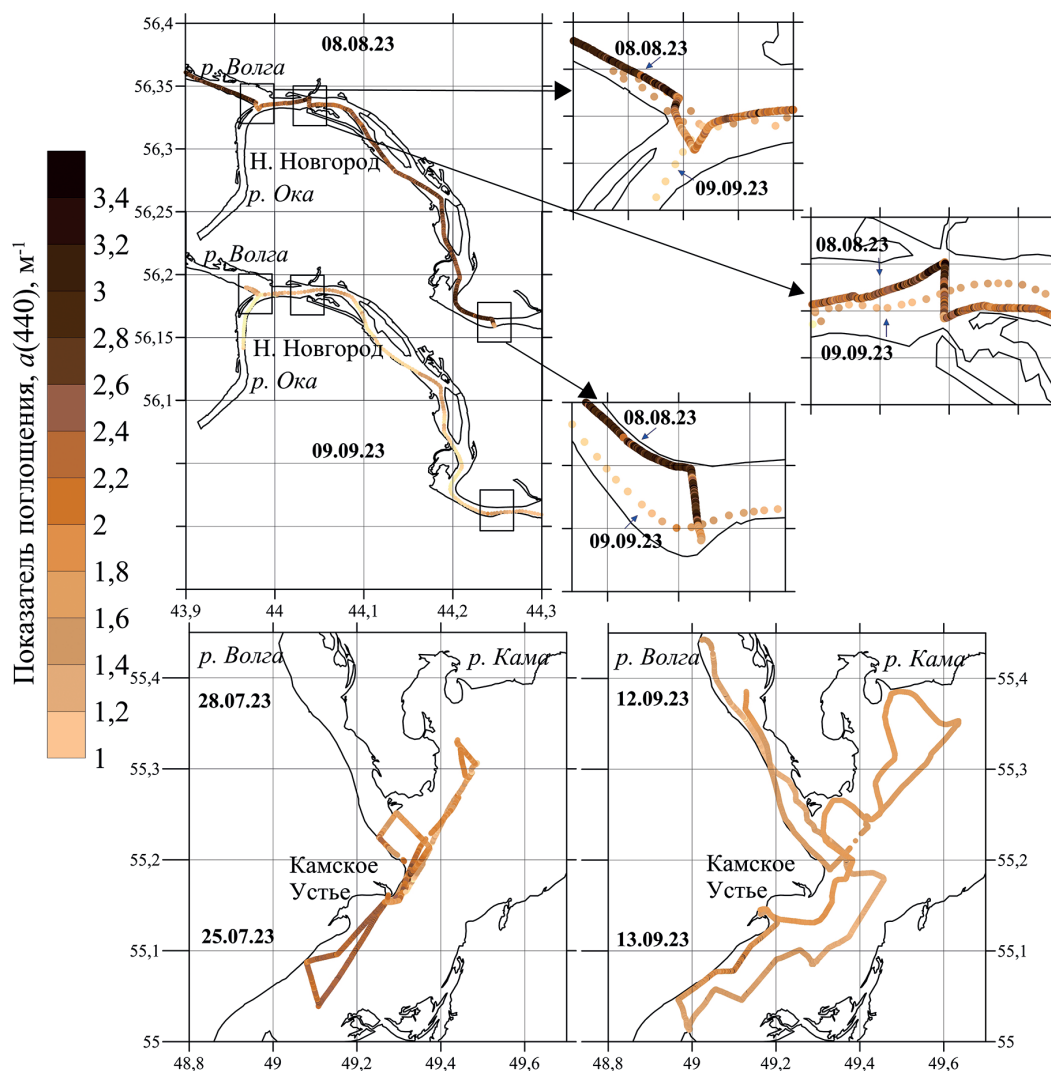


Рис. 6. Сезонная изменчивость содержания органического вещества (показателя поглощения на 440 нм) на примере слияния Волги и Оки в Чебоксарском водохранилище и Волги и Камы в Куйбышевском водохранилище

Fig. 6. Seasonal variability of organic matter (absorption coefficient at 440 nm) using the example of the confluence of the Volga and Oka in the Cheboksary Reservoir and the Volga and Kama in the Kuibyshev Reservoir

5. Заключение

В работе представлены результаты натурных измерений ряда биооптических и гидрофизических характеристик на средней Волге в 2023 г. Измерения выполнены квазинепрерывно с высоким пространственным разрешением (3 м), что принципиально отличает их от предшествующих, где разрешение составляло единицы и десятки километров. Полученные значения параметров среды не только хорошо согласуются с ли-

тературными данными, но и значительно дополняют их в части понимания вариаций среды на различных пространственно-временных масштабах. В настоящей работе отсутствуют причинно-следственные связи, описывающие особенности продуктивности водоема и типичные для работ лимнологов и гидробиологов. Это связано с тем, что настоящее исследование преследует другую цель — формирование «биооптического» портрета реки Волга, т. е. исследование гидрооптических характеристик верхнего слоя реки, спектральный цвет которого регистрируется космическими сканерами цвета и может быть «раскодирован» в содержание взвеси и растворенных в воде веществ в верхнем слое.

Продemonстрированные существенные вариации биооптических характеристик на масштабах 500 км указывают на наличие как продуктивных вод, так и мутных или относительно чистых по содержанию примесей, но богатых растворенной органикой, а также смешанных.

В мировой практике спутникового мониторинга внутренних водоемов, создание таких массивов синхронизированных данных является на сегодня регулярной работой. Это позволяет, используя возможности машинного обучения, точно классифицировать оптический тип вод, построить гибкий биооптический алгоритм и определить исследуемый водоем среди других водных объектов.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Кайнову Алексею Борисовичу за обеспечение экспедиции, активное участие и дельные советы в ходе проведения работ, а также Гречушниковой Марии Георгиевне и Воденевой Екатерине Леонидовне за обсуждение и помощь в интерпретации результатов.

Acknowledgements

The authors are grateful to Alexey Borisovich Kainov for providing the expedition, active participation and advice during the work, and to Maria Georgievna Grechushnikova and Ekaterina Leonidovna Vodeneeva for discussion and assistance in interpreting the results.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-17-00071 («Волжские биооптические алгоритмы»), <https://rscf.ru/project/23-17-00071>, в части исследования трансформации биооптических характеристик волжских вод и разработки биооптических моделей, а также по теме Госзадания FMWE-2024–0015 «Гидрофизические процессы, формирующие экологическое состояние внутренних и окраинных морей и прибрежной зоны океана».

Funding

The research was supported by RNF grant No. 23-17-00071 (“Volga bio-optical algorithms”), <https://rscf.ru/project/23-17-00071>, in the part of the study of the transformation of bio-optical characteristics of Volga waters and development of bio-optical models, as well as under the topic of State Task FMWE-2024-0015 “Hydrophysical processes shaping the ecological state of inland and marginal seas and coastal ocean zone”.

Литература

1. Global Environment Monitoring System for Freshwater. URL: <https://ceowatermandate.org/resources/global-environment-monitoring-system-for-freshwater-2019/> (дата обращения: 12.11.2023)
2. USGS Water Resources Mission Area. URL: <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources> (дата обращения: 12.11.2023)
3. Water Framework Directive. URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en (дата обращения: 12.11.2023)
4. The United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development. URL: <https://oceandecade.org/ru/news/ocean-decade-unveils-new-set-of-endorsed-actions-on-all-continent/> (дата обращения: 12.11.2023)
5. Ferreira J.G., Vale C., Soares C.V., Salas F., Stacey P.E., Bricker S.B., Silva M.C., Marques J.C. Monitoring of coastal and transitional waters under the E.U. water framework directive. // Environmental monitoring and assessment. 2007. Vol. 135. P. 195–216. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9643-0>
6. Ansper A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, No. 1. P. 64. <https://doi.org/10.3390/rs11010064>

7. *Adjovu G.E., Stephen H., James D., Ahmad S.* Overview of the application of remote sensing in effective monitoring of water quality parameters // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 7. P. 1938. <https://doi.org/10.3390/rs15071938>
8. Национальный проект «Экология» (2019–2024 гг.) URL: <https://xn-80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--plai/projects/ekologiya/> (дата обращения: 12.11.2023)
9. Федеральный проект «Вода России». URL: <https://voda.org.ru/> (дата обращения: 12.11.2023)
10. Государственная программа Российской Федерации «Охрана окружающей среды». URL: <http://government.ru/rugovclassifier/874/events/> (дата обращения: 12.11.2023)
11. *Soomets T., Uudeberg K., Jakovels D., Zagars M., Reinart A., Brauns A., Kutser T.* Comparison of Lake Optical Water Types Derived from Sentinel-2 and Sentinel-3 // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 23. P. 2883. <https://doi.org/10.3390/rs11232883>
12. *Pahlevan N., Smith B., Schalles J., Binding C., Cao Z., Ma R., Alikas K., Kangro K., Gurlin D., Hà N., Matsushita B., Moses W., Greb S., Lehmann M.K., Ondrusek M., Oppelt N., Stumpf R.* Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: A machine-learning approach // *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 240. P. 111604. doi.org/10.1016/j.rse.2019.111604
13. *Буторин Н.В.* О прозрачности и мутности воды Горьковского водохранилища // *Труды Института биологии водохранилищ*. 1959. Т. 2, № 5. С. 204–211.
14. Куйбышевское водохранилище / Под ред. Монакова А.В. Л.: Наука, 1983. 213 с.
15. *Шитиков В.К., Выхристюк Л.А., Паутова В.Н., Зинченко Т.Д.* Комплексное экологическое районирование Куйбышевского водохранилища // *Водные ресурсы*. 2007. Т. 34, № 4. С. 481–489.
16. *Буторин Н.В.* Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 322 с.
17. *Минеева Н.М.* Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги / Отв. ред. А.И. Копылов. Ярославль: Принтхаус, 2009. 279 с.
18. *Корнева Л.Г.* Современное состояние фитопланктона водохранилищ Верхней Волги // *Биологические ресурсы, их сохранение и использование* / Под ред. В.П. Семерного. Ярославль: ЯрГУ, 1999. С. 81–91.
19. *Селезнева К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А.* Влияние массового развития цианобактерий на формирование качества воды куйбышевского водохранилища (проблема и пути решения) // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2023. Т. 25, № 5. С. 164–174. [doi:10.37313/1990-5378-2023-25-5-164-174](https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-5-164-174)
20. *Мингазова Н.М., Набеева Э.Г., Чебан Е.Ю., Павлова Л.Р., Яковлева Е., Путинцев Р., Мак Кироя К.А., Сиво Л., Шавалиева А.* Гидрохимическая характеристика Куйбышевского водохранилища (по материалам экспедиции «Плавучий Университет» // *Проблемы экологии Волжского бассейна*. 2021. С. 22–22.
21. *Эдельштейн К.К.* Динамика водной массы речной части Горьковского водохранилища / *Динамика водных масс водохранилищ*. Л.: Изд-во АН СССР, 1965. С. 39–44.
22. *Palmer S.C., Pelevin V.V., Goncharenko I.V., Kovács A., Zlinszky A., Présing M., Horváth H., Nicolás-Perea V., Balzter H., Tóth V.* Ultraviolet Fluorescence Lidar (UFL) as a Measurement Tool for Water Quality Parameters in Turbid Lake Conditions // *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5. P. 4405–4422. doi.org/10.3390/rs5094405
23. *Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А., Новигатский А.Н.* Определение концентрации минеральной взвеси и взвешенного органического вещества по их спектральному поглощению // *Океанология*, 2014. Т. 54, № 4. С. 704–711. [doi:10.7868/S0030157414040066](https://doi.org/10.7868/S0030157414040066)
24. *Mueller J.L., Bidigare R.R., Trees C., Balch W.M., Dore J., Drapeau D.T., Karl D., Van Heukelem L., Perl J.* Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 5, Volume 5: Biogeochemical and Bio-Optical Measurements and Data Analysis Protocols // *Greenbelt, MD. Goddard Space Flight Space Center*. 2003. P. 5–24. [doi:10.25607/OBP-67](https://doi.org/10.25607/OBP-67)
25. *Kessler N., Armoza-Zvuloni R., Wang S., Basu S., Weber P.K., Stuart R.K., Shaked Y.* Selective collection of iron-rich dust particles by natural *Trichodesmium* colonies // *The ISME Journal*. 2020. Vol. 14. P. 91–103. [doi:10.1038/s41396-019-0505-x](https://doi.org/10.1038/s41396-019-0505-x)
26. *Рабинович Е.* Фотосинтез. Т. 1. / пер. с англ. Н.Д. Леонова, под ред. и с предисл. А.А. Ничипоровича. М.: Изд-во иностр. лит., 1951. 648 с.
27. *Molkov A., Kapustin I., Grechushnikova M., Dobrokhotova D., Leshchev G., Vodeneeva E., Sharagina E., Kolesnikov A.* Investigation of Water Dynamics Nearby Hydroelectric Power Plant of the Gorky Reservoir on Water Environment: Case Study of 2022 // *Water*. 2023. Vol. 15. P. 3070. [doi:10.3390/w15173070](https://doi.org/10.3390/w15173070)
28. *Немировская И.А.* Насколько загрязнена Волга // *Природа*. № 4. 2011. С. 36–44.
29. *Hansen C.H., Burian S.J., Dennison P.E., Williams G.P.* Spatiotemporal Variability of Lake Water Quality in the Context of Remote Sensing Models // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. P. 409. [doi:10.3390/rs9050409](https://doi.org/10.3390/rs9050409)
30. *Molkov A., Fedorov S., Pelevin V.* Toward Atmospheric Correction Algorithms for Sentinel-3/OLCI Images of Productive Waters // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. P. 3663. [doi:10.3390/rs14153663](https://doi.org/10.3390/rs14153663)

References

1. Global Environment Monitoring System for Freshwater. URL: <https://ceowatermandate.org/resources/global-environment-monitoring-system-for-freshwater-2019/> (Accessed: 12.11.2023)
2. USGS Water Resources Mission Area. URL: <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources> (Accessed: 12.11.2023)
3. Water Framework Directive. URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en (Accessed: 12.11.2023)
4. The United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development. URL: <https://oceandecade.org/ru/news/ocean-decade-unveils-new-set-of-endorsed-actions-on-all-continent/> (Accessed: 12.11.2023).
5. Ferreira J.G., Vale C., Soares C.V., Salas F., Stacey P.E., Bricker S.B., Silva M.C., Marques J.C. Monitoring of coastal and transitional waters under the E.U. water framework directive. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2007;135:195–216. doi:10.1007/s10661-007-9643-0
6. Ansper A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes. *Remote Sensing*. 2019;11(1): 64. doi:10.3390/rs11010064
7. Adjovu G.E., Stephen H., James D., Ahmad S. Overview of the application of remote sensing in effective monitoring of water quality parameters. *Remote Sensing*. 2023;15(7):1938. doi:10.3390/rs15071938
8. National Project “Ecology” (2019–2024). URL: <https://xn-80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--plai/projects/ekologiya/> (Accessed: 12.11.2023)
9. Federal project “Water of Russia”. URL: <https://voda.org.ru/> (Accessed: 12.11.2023)
10. State Program of the Russian Federation “Environmental Protection”. URL: <http://government.ru/rugovclassifier/874/events/> (Accessed: 12.11.2023).
11. Soomets T., Uudeberg K., Jakovels D., Zagars M., Reinart A., Brauns A., Kutser T. Comparison of Lake Optical Water Types Derived from Sentinel-2 and Sentinel-3. *Remote Sensing*. 2019;11(23):2883. doi:10.3390/rs11232883
12. Pahlevan N., Smith B., Schalles J., Binding C., Cao Z., Ma R., Alikas K., Kangro K., Gurlin D., Hà N., Matsushita B., Moses W., Greb S., Lehmann M.K., Ondrusek M., Oppelt N., Stumpf R. Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: A machine-learning approach. *Remote Sensing of Environment*. 2020;240:111604. doi:10.1016/j.rse.2019.111604
13. Butorin N.V. About transparency and turbidity of water of the Gorki Reservoir. *Trudy Instituta Biologii Vodoxranilishh*. 1959;2(5):204–211 (in Russian).
14. Monakov A.V. (ed.) *Kuibyshev Reservoir*. Leningrag: Nauka; 1983. 213 p. (in Russian).
15. Shitikov V.K., Vykhristyuk L.A., Pautova V.N., Zinchenko T.D. Comprehensive ecological zoning of the Kuibyshev reservoir. *Water Resources*. 2007;34(4):450–458. doi:10.1134/S0097807807040100
16. Butorin N.V. Hydrological processes and dynamics of water masses in the Volga Cascade Reservoirs. Leningrag, Nauka, 1969. 322 p. (in Russian).
17. Mineeva N.M. Plankton primary production in the Volga River reservoirs / Ed. by A.I. Kopylov. Yaroslavl: Print House, 2009. 279 p. (in Russian).
18. Korneva L.G. Modern state of phytoplankton of the Upper Volga reservoirs. In: Semerny V.P. (ed.). *Biological Resources, their conservation and use*. Yaroslavl: Yaroslavl State University; 1999. 81–91 (in Russian).
19. Selezneva K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. Influence of the mass development of cyanobacteria on the formation of the water quality of the Kuibyshev reservoir (problem and solutions). *Izvestiya of Samara Scientific Center of The Russian Academy of Sciences*. 2023;25(5):164–174 (in Russian). doi:10.37313/1990-5378-2023-25-5-164-174
20. Mingazova N.M., Nabeeva E.G., Cheban E. Yu., Pavlova L.R., Yakovleva E., Putintsev R., Mac Quiroa Ch.A., Landi S., Shavaliyeva A. Hydrochemical characteristics of the Kuibyshev Reservoir (based on the materials of the floating university expedition). *Problemy Ekologii Volzhskogo Basseina: Proceedings of the 6th Scientific Conference*, N. Novgorod, November 24–25, 2021. Iss. 4. Volga State University of Water Transport; 2021. 35 p.
21. Edelstein K.K. Dynamics of the water mass of the river part of the Gorki Reservoir / Dynamics of water masses of reservoirs. Leningrag: Izdvo AS USSR; 1965. P. 39–44 (in Russian).
22. Palmer S.C., Pelevin V.V., Goncharenko I.V., Kovács A., Zlinszky A., Présing M., Horváth H., Nicolás-Perea V., Balzter H., Tóth V. Ultraviolet Fluorescence Lidar (UFL) as a Measurement Tool for Water Quality Parameters in Turbid Lake Conditions. *Remote Sensing*. 2013;5:4405–4422. doi:10.3390/rs5094405
23. Konovalov B.V., Kravchishina M.D., Belyaev N.A., Novigatsky A.N. Determination of the concentration of mineral particles and suspended organic substance based on their spectral absorption. *Oceanology*. 2014;54(5):660–667. doi:10.1134/S0001437014040067
24. Mueller J.L., Bidigare R.R., Trees C., Balch W.M., Dore J., Drapeau D.T., Karl D., Van Heukelem L., Perl J. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 5, Volume 5: Biogeochemical and Bio-Optical Measurements and Data Analysis Protocols. *Greenbelt, MD. Goddard Space Flight Space Center*. 2003;5–24. doi:10.25607/OBP-67

25. Kessler N., Armoza-Zvuloni R., Wang S., Basu S., Weber P.K., Stuart R.K., Shaked Y. Selective collection of iron-rich dust particles by natural *Trichodesmium* colonies. *The ISME Journal*. 2020;14:91–103. doi:10.1038/s41396-019-0505-x
26. Rabinowitz E. *Photosynthesis*. V. 1. / translated from English by N.D. Leonov, ed. and with a foreword by A.A. Nichiporovich. Moscow: Izd. inostr. Lit.; 1951. 648 p. (in Russian).
27. Molkov A., Kapustin I., Grechushnikova M., Dobrokhotova D., Leshchev G., Vodeneeva E., Sharagina E., Kolesnikov A. Investigation of Water Dynamics Nearby Hydroelectric Power Plant of the Gorky Reservoir on Water Environment: Case Study of 2022. *Water*. 2023;15:3070. doi:10.3390/w15173070
28. Nemirovskaya I.A. How polluted is the Volga? *Priroda*. 2011;4:36–44 (in Russian).
29. Hansen C.H., Burian S.J., Dennison P.E., Williams G.P. Spatiotemporal variability of lake water quality in the context of remote sensing models. *Remote Sensing*. 2017;9:409. doi:10.3390/rs9050409
30. Molkov A., Fedorov S., Pelevin V. Toward Atmospheric Correction Algorithms for Sentinel-3/OLCI Images of Productive Waters. *Remote Sensing*. 2022;14:3663. doi:10.3390/rs14153663

Об авторах

МОЛЬКОВ Александр Андреевич, заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-8550-2418, Scopus AuthorID: 55377777800, WoS ResearcherID: A-3623-2014, SPIN-код (РИНЦ): 8959-5235, e-mail: molkov@ipfran.ru

КАПУСТИН Иван Александрович, заведующий лабораторией ННГУ, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0001-6845-3119, Scopus AuthorID: 25629629000, WoS ResearcherID: A-3593-2014, SPIN-код (РИНЦ): 7060-5757, e-mail: kia@ipfran.ru

ЕРМОШКИН Алексей Валерьевич, старший научный сотрудник ИПФ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-6528-7589, Scopus AuthorID: 54410480500, WoS ResearcherID: D-5271-2015, SPIN-код (РИНЦ): 1336-6994, e-mail: al-ermoshkin@yandex.ru

ЛЕЩЕВ Георгий Владимирович, младший научный сотрудник ННГУ, ORCID: 0000-0001-5574-7935, Scopus AuthorID: 57213165519, SPIN-код (РИНЦ): 5370-0731, e-mail: georgeleshev@ipfran.ru

ДОБРОХОТОВА Дарья Васильевна, младший научный сотрудник, ORCID: 0000-0001-5546-1670, Scopus AuthorID: 57219659995, WoS ResearcherID: AAA-7981-2022, SPIN-код (РИНЦ): 9740-3806, e-mail: vostryakova@ipfran.ru

КОЛЬЦОВА Екатерина Сергеевна, лаборант-исследователь ННГУ, ORCID: 0000-0002-3089-4987, WoS ResearcherID: KPA-51862024, e-mail: koltsova.es@phystech.edu

КОНОВАЛОВ Борис Васильевич, ведущий инженер ННГУ. SPIN-код (РИНЦ): 58631, e-mail: bvkonovalov@yandex.ru

ДРОЗДОВА Анастасия Николаевна, старший научный сотрудник ННГУ, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-5547-6693, Scopus AuthorID: 57189681902, WoS ResearcherID: F-8435-2011, SPIN-код (РИНЦ): 2156-3769, e-mail: asya-nd@yandex.ru

БОГАТОВ Николай Андреевич, ведущий программист ИПФ РАН, ORCID: 0000-0001-5034-888X, SPIN-код (РИНЦ): 9519-3017, e-mail: nbogatov@ipfran.ru

ЧУШНЯКОВА Алёна Михайловна, младший научный сотрудник ННГУ, e-mail: zdesssss@yandex.ru

КИРИЛЛОВ Алексей Геннадьевич, заведующий сектором ИПФ РАН, член-корреспондент Академии медико-технических наук РФ, ORCID: 0000-0001-7077-4018, e-mail: kir@ipfran.ru