

Исследование влияния режима работы ГЭС на перераспределение фитопланктона в верхнем водном слое в приплотинном участке Горьковского водохранилища

Д. В. Доброхотова, И. А. Капустин, А. А. Мольков, Г. В. Лещёв

*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
Нижний Новгород, 603022, Россия*

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: vostryakova@ipfran.ru*

В период с июля по сентябрь в водохранилищах Волжского каскада наблюдается активное «цветение» вод, при этом по акватории фитопланктон распределяется неоднородно. В настоящей работе в ходе серии подспутниковых экспериментов в южной части Горьковского вдхр. впервые была проведена качественная оценка вклада в перераспределение водорослей таких геофизических факторов, как режим работы гидроэлектростанции (ГЭС) и неоднородные течения, возникающие в условиях переменного сброса воды. На основе экспериментальных данных за 1, 2 и 10 августа 2018 г., включающих измерения полей течения, ветра и оценки концентрации хлорофилла *a*, оптических спутниковых изображений Sentinel-2/MSI (*англ.* Multispectral Instrument), Sentinel-3/OLCI (*англ.* Ocean and Land Colour Instrument) и Landsat-8/OLI (*англ.* Operational Land Imager) за 1–5 и 10 августа, а также данных ГЭС о почасовом расходе воды было предложено предварительное описание эффекта перераспределения фитопланктона, учитывающее особенности течений в водохранилище. При пиковом суточном сбросе фитопланктон выносится из впадающих в водохранилище рек и сосредотачивается в старом русле Волги. При слабом ветре, характерном для начала августа, на дальнейшее распространение и локальное перераспределение фитопланктона влияют неоднородные течения, возникающие в условиях переменного сброса воды через ГЭС, а именно зарегулированный русловой поток, обратные течения и круговороты. Предварительные результаты показывают, что в типичный период первой декады августа распределение фитопланктона обладает высокой пространственно-временной изменчивостью.

Ключевые слова: фитопланктон, неоднородные течения, речные выносы, расход жидкости через ГЭС, оптические спутниковые изображения, Горьковское водохранилище

Одобрена к печати: 09.02.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-242-252

Введение

Известно, что водохранилища имеют большое хозяйственное и рекреационное значение. Основные производственные функции водохранилищ — это накопление водной массы и обеспечение необходимого для генерации электроэнергии напора воды в турбинах гидроэлектростанций (ГЭС), а также обеспечение судоходства. При создании водохранилищ образующие их гидротехнические сооружения внесли существенные изменения в речную экосистему — образовались новые искусственные водоёмы, характеризующиеся своими особенностями.

Модификация естественного руслового потока ведёт к снижению проточности водоёма в целом, образованию застойных областей и, как следствие, интенсивному эвтрофированию. Как показано в ряде работ, в период с июля по сентябрь водохранилища интенсивно «цветут». Известно, что основной группой, отвечающей за «цветение» воды в Горьковском вдхр., выступают цианобактерии, или сине-зелёные водоросли (Корнева, 2015).

В последние годы для изучения и мониторинга эвтрофирования внутренних водных объектов и прибрежных морских зон активно применяются космические сканеры цвета моря высокого и среднего разрешения (Лаврова и др., 2014; Anspér, Alikas, 2018). Представленные в литературе и базах данных оптические изображения показывают существенно неоднородное распределение фитопланктона по акватории Горьковского вдхр. (Мольков и др., 2020), а результаты зондирования в ходе полевых измерений говорят и о сильно неоднородном вер-

тикальном распределении (Ермаков et al., 2013). Известно, что основной фактор, приводящий к переносу биомассы, — течения в широком смысле слова (Буторин, 1969; Эдельштейн, 1965; Экологические..., 2001). Структура течений в акватории водохранилища весьма сложная: присутствует основной русловой поток, зарегулированный ГЭС; на пойме развиваются ветровые (дрейфовые) течения и круговороты (Капустин, Мольков, 2019; Капустин и др., 2021б); турбулентные течения, генерируемые ветровым волнением, приводят к вертикальному перемешиванию. Между тем, анализ влияния ГЭС на структуру течений и перераспределение фитопланктона во внутренних водоёмах в литературе не встречается. Следует отметить, что сама по себе биомасса не является пассивной примесью и может иметь свой ход по вертикали в зависимости от времени суток и освещённости водоёма (Stal, 2012). Известно, что собственные скорости вертикального перемещения фитопланктона существенно ниже как вертикальных, так и горизонтальных скоростей течений и для слоя водорослей в целом не превышают 1 мм/с (Алеев, 1991).

Настоящая работа посвящена анализу данных серии подспутниковых экспериментов 2018 г., проведённых в период наиболее активного цветения, для оценки влияния режима работы ГЭС на перераспределение фитопланктона в приплотинном участке водохранилища.

Эксперименты

Натурные измерения и условия экспериментов

Комплексные подспутниковые эксперименты были проведены 2, 3 и 10 августа 2018 г. в южной части акватории Горьковского вдхр. Измерения выполнялись с борта плавучей гидрофизической лаборатории «Геофизик» (Мольков и др., 2019). По курсу следования судна непрерывно проводились измерения трёх компонент скорости течения с использованием профилографа течений (*англ.* ADCP — Acoustic Doppler Current Profiler) WorkHorse Monitor 1200 kHz с шагом 0,5 м по глубине, начиная с горизонта 1 м, а также скорости и направления приводного ветра с помощью ультразвукового анемометра WindSonic. Квазиэквидистантно, в среднем через каждые 700 м, производились вертикальные зондирования водной толщи с использованием зонда Moldaenke FluoroProbe III для восстановления концентрации хлорофилла *a*. Карта глубин южной части водохранилища, на которой обозначены основные особенности акватории, представлена на *рис. 1*.

Гидрометеорологические условия в период проведения экспериментов представлены в *таблице* (данные взяты с метеорологического сайта gr5.ru, <https://gr5.ru>), полужирным начертанием отмечены даты проведения измерений, курсивом — дни, в которые были получены пригодные для анализа оптические спутниковые изображения. В *таблице* также приведены время съёмки (МСК) и пространственное разрешение.

Как известно, в водохранилищах производится суточное регулирование стока. Для оценки влияния режима работы Нижегородской ГЭС на структуру течений в водохранилище и на перераспределение биомассы были проанализированы предоставленные ПАО «Русгидро» данные по суточному расходу через ГЭС в период проведения экспериментов (средний расход представлен в открытом доступе: <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/>).

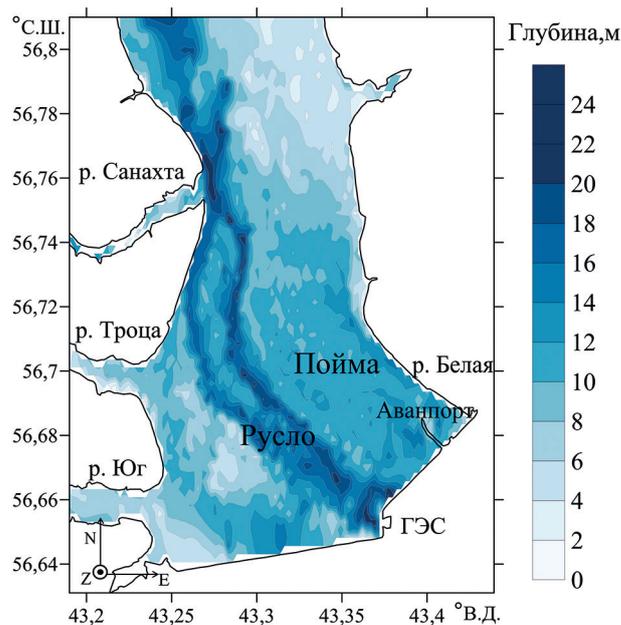


Рис. 1. Карта глубин южной части Горьковского вдхр.

На *рис. 2* показан почасовой расход через ГЭС за период с 1 по 11 августа 2018 г., красной линией обозначен период проведения измерений, зелёные точки — примерное время пролёта спутников с точностью до часа (см. *таблицу*).

Гидрометеорологические условия в период проведения экспериментов

День	Ветер, румб	Средний ветер на высоте 10 м, м/с	Осадки (Городец/Юрьевец), мм	Температура воздуха (мин./макс.), °С	Спутниковое изображение
30 июля	В, ССВ	1	—	12/25	—
31 июля	СВ, С			11/28	
1 августа	СЗ, С	штиль, 1		12/30	Sentinel-3 (300 м), 10:14:05 Landsat-8 (30 м), 11:15:19
2 августа	С, З			17/31	Sentinel-2 (10 м), 11:25:58
3 августа	З, ЗСЗ	1–2		19/30	Landsat-8 (30 м), 11:03:23
4 августа	З, ЗСЗ	1	0,7/14	18/27	Sentinel-2 (10 м), 11:16:01
5 августа	ЮЗ, ЗСЗ		5,1/0,5	16/27	Sentinel-3 (300 м), 10:10:21
6 августа	З, ЮЮЗ	1–3	1/–	18/27	—
7 августа	З, ЗСЗ	1–2	10/–	17/25	
8 августа	С, СЗ	1–3	7/–	14/21	
9 августа	С, ССЗ	2	–	12/20	
10 августа	СЗ	1		13/28	

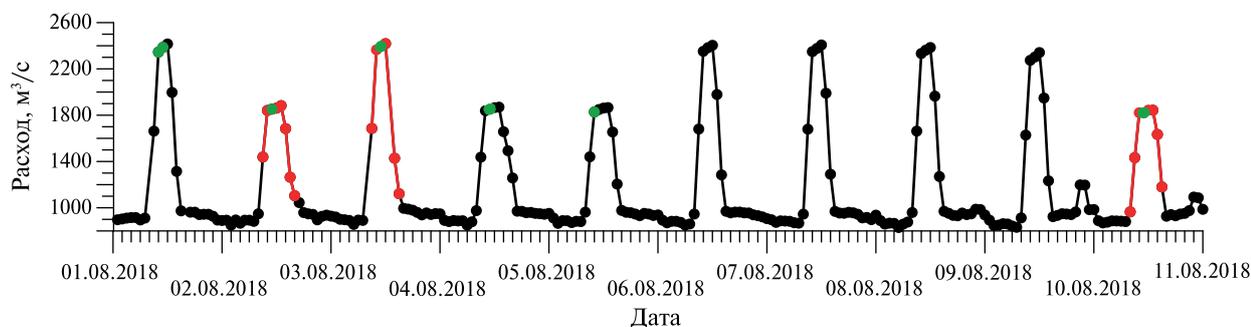


Рис. 2. Почасовые расходы через ГЭС за период с 1 по 11 августа 2018 г. Красным отмечены периоды проведения натуральных подспутниковых измерений; зелёные точки — моменты спутниковой съёмки

Как можно видеть из *рис. 2* и *таблицы*, первая декада августа 2018 г. характеризовалась устойчивой штилевой погодой, без существенных осадков, с высокой среднесуточной температурой воздуха. Температура воды в дни проведения измерений в среднем составляла 22–24 °С. При наличии ветра преобладали западные румбы. Следует отметить, что, согласно нашим многолетним наблюдениям, такие гидрометеорологические условия являются типичными для начала августа. За рассматриваемый период значения максимального, среднего дневного расхода через ГЭС (пиковые значения на *рис. 2*) и расхода в период ночного уменьшения сброса составляли 2360, 1850 и 920 м³/с соответственно. График на *рис. 2* демонстрирует чередование максимальных и средних значений расхода с 1 по 5 августа. Также на рисунке видно, что осадки с 6 по 9 августа коррелируют с увеличением пиковых значений расхода

до максимальных. Географическое положение Горьковского вдхр. обуславливает тот факт, что спутниковая съёмка и привязанные к ней натурные подспутниковые измерения проводились в моменты увеличения суточного сброса.

Спутниковые изображения

На *рис. 3* представлены оптические спутниковые изображения южной части Горьковского вдхр. за 1–5 и 10 августа. Изображения на *рис. 3а–в* показывают, что период с 1 по 3 августа характеризуется следующим распределением фитопланктона: на поверхности большей части водохранилища отсутствует интенсивное цветение, существенное скопление фитопланктона наблюдается в притоках Волги (реки Юг, Троица, Санахта), по правому берегу видны речные выносы. Сквозь облачность на *рис. 3г* 4 августа видно, что выше р. Санахты поверхность, покрытая фитопланктоном, занимала приблизительно половину акватории водохранилища. Несмотря на относительно низкое разрешение Sentinel-3 (см. *рис. 3д*), на изображении за 5 августа можно различить, что в южной части водохранилища граница между относительно чистой и покрытой фитопланктоном областями сместилась от правого берега к центру и водоросли преимущественно сконцентрировались в старом русле Волги.

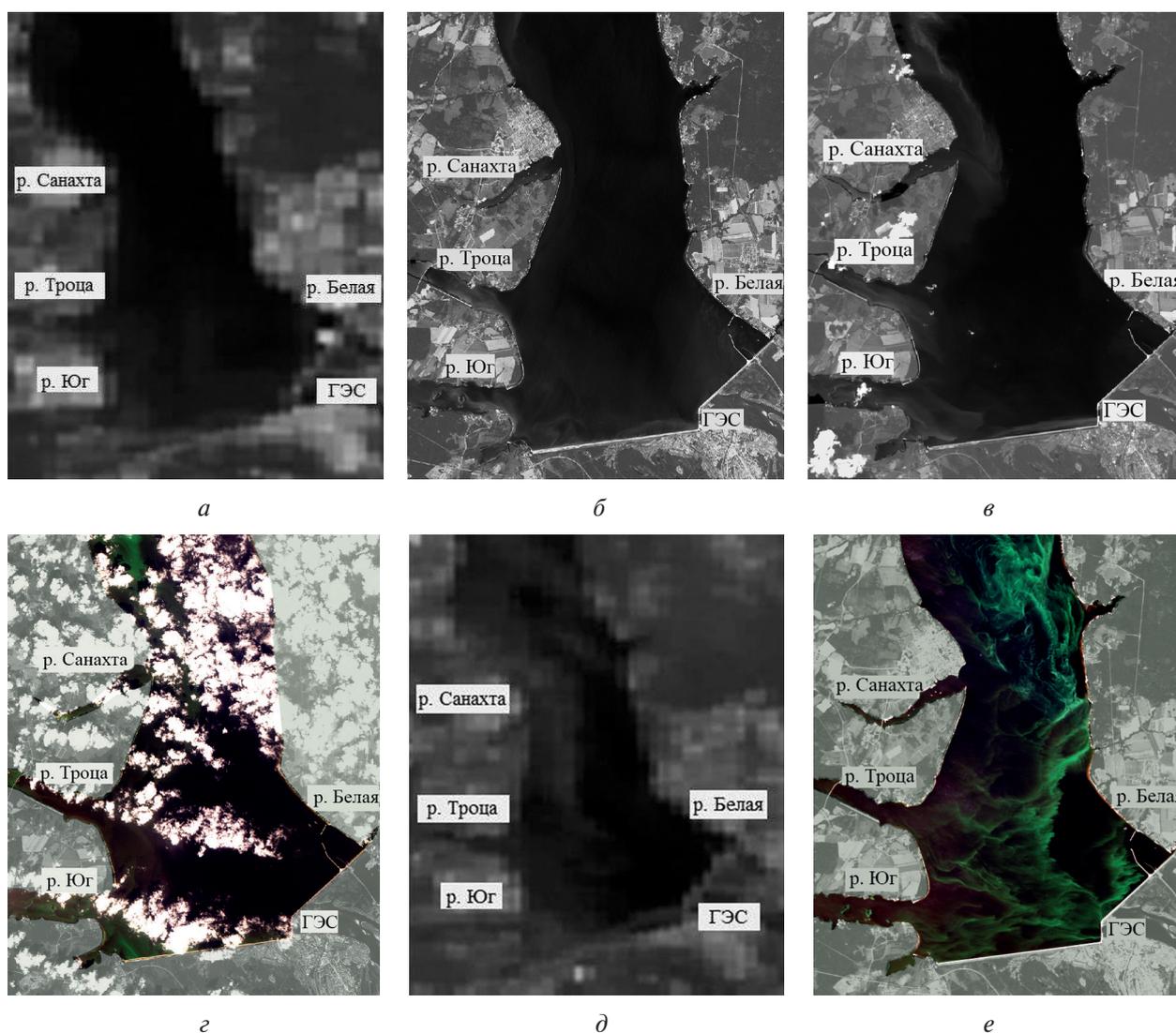


Рис. 3. Оптические спутниковые изображения южной части Горьковского вдхр. (2018): *а* — 1 августа, Sentinel-3; *б* — 2 августа, Sentinel-2; *в* — 3 августа, Landsat-8; *г* — 4 августа, Sentinel-2; *д* — 5 августа, Sentinel-3; *е* — 10 августа, Landsat-8

Под чистой поверхностью понимается тёмная область акватории на спутниковых изображениях, где процесс цветения водорослей выражен слабо. К 10 августа (см. *рис. 3е*) вся поверхность покрыта цветущим фитопланктоном, при этом визуальное сосредоточение водорослей в реках низкое. Видно, что распределение фитопланктона по акватории 10 августа сильно неоднородное. В восточной части около аванпорта образовалась область относительно чистой воды, отделённая от остальной поверхности контрастной полосой — сгустком водорослей, предположительно, как в работе (Капустин и др., 2021б), связанной с круговоротом. По правому берегу около устьев рек заметны подковообразные области с относительно чистой водой, очерченные полосовыми структурами из водорослей. Вблизи плотины полосы фитопланктона вытянуты в направлении ГЭС.

Согласно исследованию (Nalley et al., 2018), в отсутствие течений при температуре воды 22–24 °С удельная скорость роста концентрации фитопланктона составляет $0,35 \text{ сут}^{-1}$, т. е. должна удваиваться каждые двое суток. Такая оценка хороша для развития цветения в реках, находящихся в сильном подпоре, но в озёрной части водохранилища параллельно идут два процесса: вынос водорослей речным стоком и собственное цветение фитопланктона.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Межсуточная изменчивость распределения фитопланктона

Для оценки влияния вышеперечисленных факторов на перераспределение фитопланктона в верхнем водном слое в приплотинном участке водохранилища рассмотрим структуру течений на глубине 1 м и в вертикальном срезе водохранилища за 2 и 3 августа. На *рис. 4а, в* (см. с. 247) представлены результаты обработки данных ADCP на глубине 1 м, наложенные на спутниковые изображения. Цифрами обозначено приблизительное время измерений. *Рисунки 4б, г* демонстрируют вертикальный срез водохранилища, соответствующий выделенной голубым овалом части трека на *рис. 4а, в*. Стрелками обозначена проекция течений на направление трека. Цветовой градиент (от синего до светло-зелёного) показывает распределение концентрации сине-зелёных водорослей. Как можно видеть, в среднем в течение суток скорости в старом русле Волги варьируются от 10 до 25 см/с. В пойменной части водохранилища скорости не превышали 8 см/с. Известно, что благоприятными условиями для цветения водорослей считается скорость не выше 10 см/с (Петряхина, Селезнев, 2016), но наибольшее скопление водорослей за период с 1 по 5 августа (см. *рис. 3а–д*) находится вблизи старого русла Волги, в области высокой скорости течения, что может свидетельствовать о преобладании процесса выноса фитопланктона речным стоком над собственно цветением в данный период.

Небольшой расход через ГЭС 2 августа привёл к подпору рек (см. *рис. 4б*), который препятствовал содержащему большое количество фитопланктона речному стоку. Существенное увеличение расхода 3 августа привело к ослаблению подпора (см. *рис. 4г*), образованию речных выносов и инъекции фитопланктона из рек вблизи ГЭС. Фитопланктон под влиянием руслового потока, усиливающегося при увеличении расхода через ГЭС (см. *рис. 2*, период 6–9 августа), распределился вдоль старого русла Волги. Проточность впадающих в водохранилище рек в этот период увеличивалась, что заметно уменьшило наблюдаемое «цветение» воды в них. Под действием западного ветра и возвратных течений над поймой (Капустин, Мольков, 2019; Капустин и др., 2021б) при ночном уменьшении расхода к 10 августа фитопланктон неоднородно распределился по акватории (см. *рис. 3е*).

Внутрисуточная изменчивость распределения фитопланктона

Рассмотрим теперь более детально связь течений и ветрового воздействия со сложной структурой фитопланктона, неоднородно распределённого по акватории водохранилища 10 августа 2018 г. (см. *рис. 3е*). На *рис. 5* (см. с. 247) показан график почасового расхода через ГЭС за 10 августа.

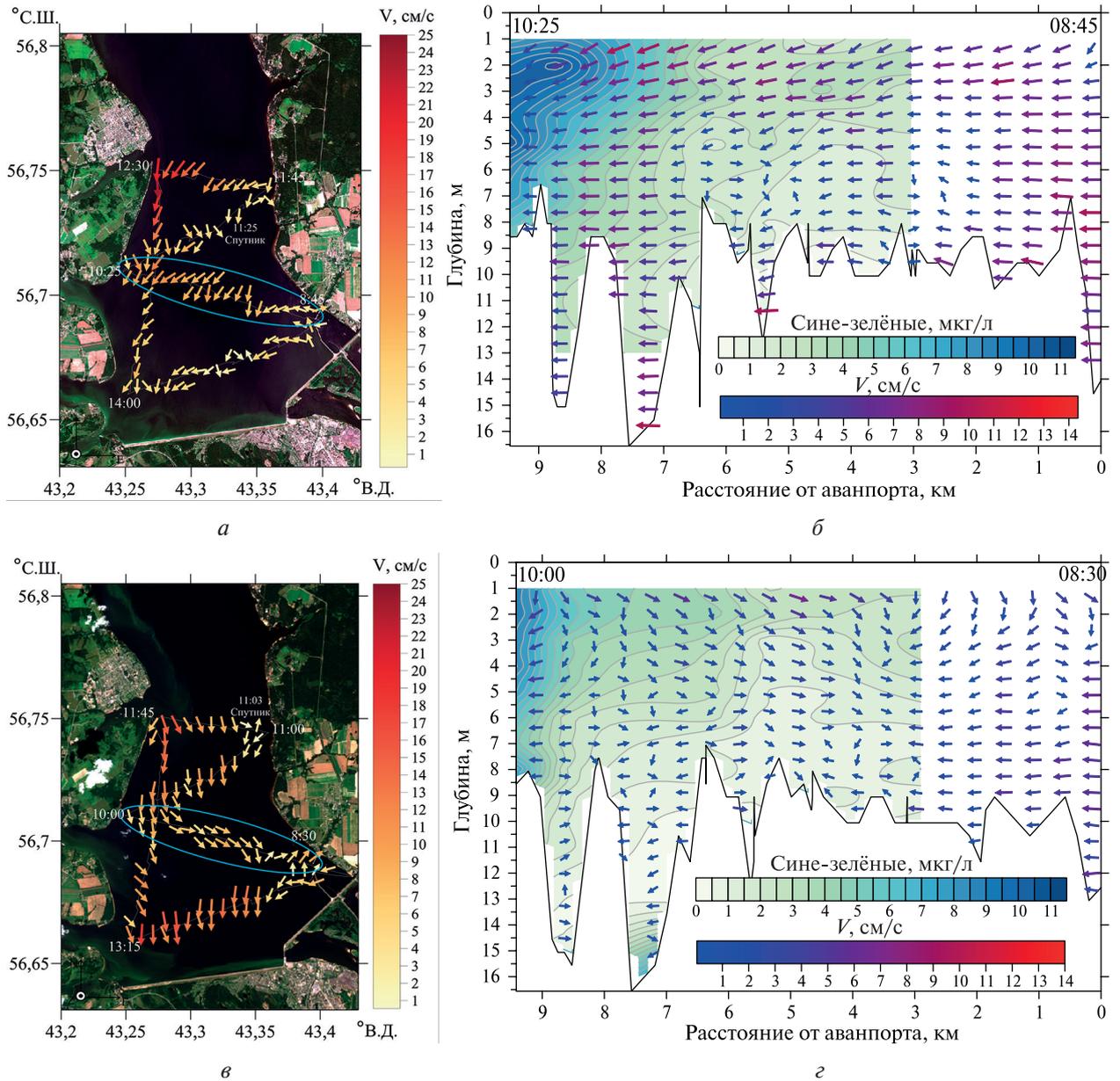


Рис. 4. Векторное поле течений: а — на глубине 1 м, наложенное на спутниковое изображение; б — в вертикальном срезе водохранилища за 02.08.2018; в — на глубине 1 м, наложенное на спутниковое изображение; г — в вертикальном срезе водохранилища за 03.08.2018

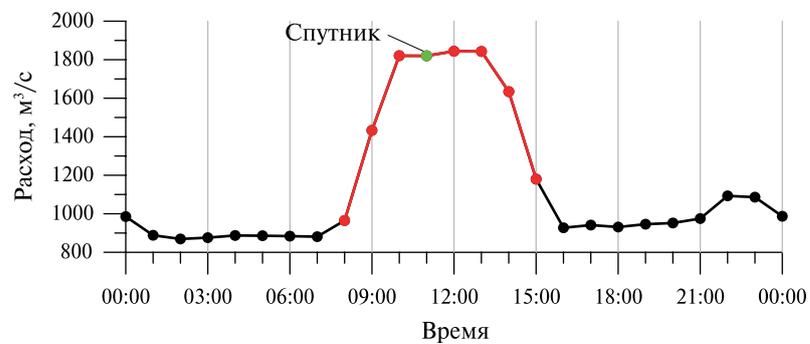


Рис. 5. Почасовой расход через ГЭС за 10.08.2018. Обозначения аналогичны рис. 2

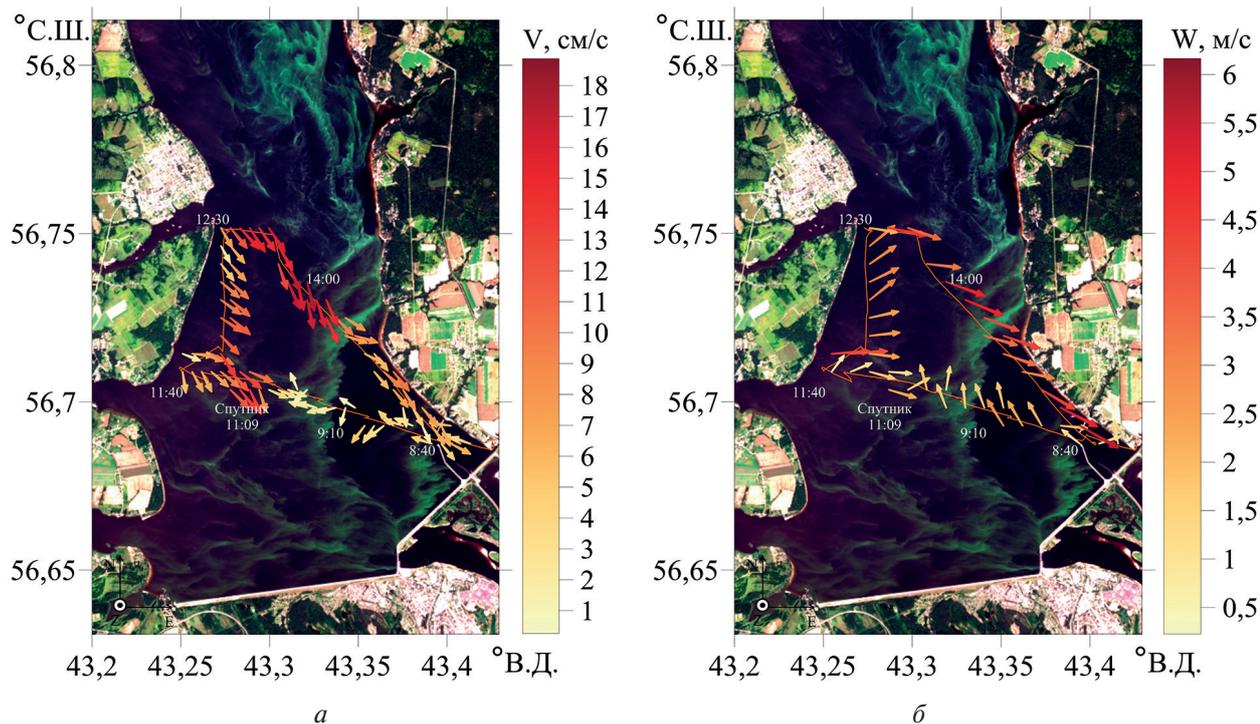


Рис. 6. Векторное поле: а — течений на глубине 1 м, наложенное на спутниковое изображение; б — скорости ветра по треку за 10.08.2018. Цифрами обозначено приблизительное время по треку

На рис. 6 представлены результаты обработки данных ADCP на глубине 1 м (см. рис. 6а) и значения скорости и направления ветра по данным WindSonic (см. рис. 6б), наложенные на спутниковое изображение. Цифрами на треке обозначено приблизительное время измерений.

Рисунок 5 демонстрирует временные периоды, в которые течение в водохранилище сильно нестационарно, а именно в период 8:00–10:00 — резкий рост расхода и с 13:00–16:00 — замедление расхода. Согласно работе (Капустин и др., 2021а), именно замедление сброса приводит к образованию возвратных течений на пойме.

На рис. 6а отчётливо видно влияние увеличения расхода через ГЭС на течения в водохранилище. Незадолго до момента спутниковой съёмки течение, измеренное на треке судна, разворачивается в сторону ГЭС, и величина его растёт до момента уменьшения сброса. Рост скорости течения прослеживается не только в русловой части водохранилища, но и над поймой. Во время уменьшения сброса с 14:00 по 15:00 на обратном галсе фиксировалось ослабление течения над поймой. В ходе измерений преобладал западный ветер (см. рис. 6б), усиливающийся до 6 м/с в конце трека, что также сказалось на течении в верхнем слое.

Наибольший интерес представляют данные по течениям и ветру в период времени, наиболее близкий к моменту спутниковой съёмки (09:00–12:00). Поскольку здесь присутствует сильная неоднородность в структуре водорослей, рассмотрим соответствующий разрез отдельно. На рис. 7 (см. с. 249) представлено распределение концентрации сине-зелёных водорослей в вертикальном сечении водохранилища. Стрелками обозначены проекции течений на направление трека. Выше линии 0 м, обозначающей поверхность, тем же цветовым градиентом показаны направления течений на горизонте 1 м (так же, как на рис. 6а на нижнем галсе в горизонтальной плоскости). Оранжевыми стрелками обозначено направление ветра. Чёрными кругами отмечены точки, где проводилось зондирование. Цифрами обозначено характерное время.

Концентрация сине-зелёных водорослей в области, отвечающей массивной полосе на спутниковом снимке (см. рис. 3е, б), достигает значений 210 мкг/л. Концентрация других групп водорослей в полосе незначительная. Вблизи скопления фитопланктона векторное поле течений демонстрирует наличие конвергентного потока.

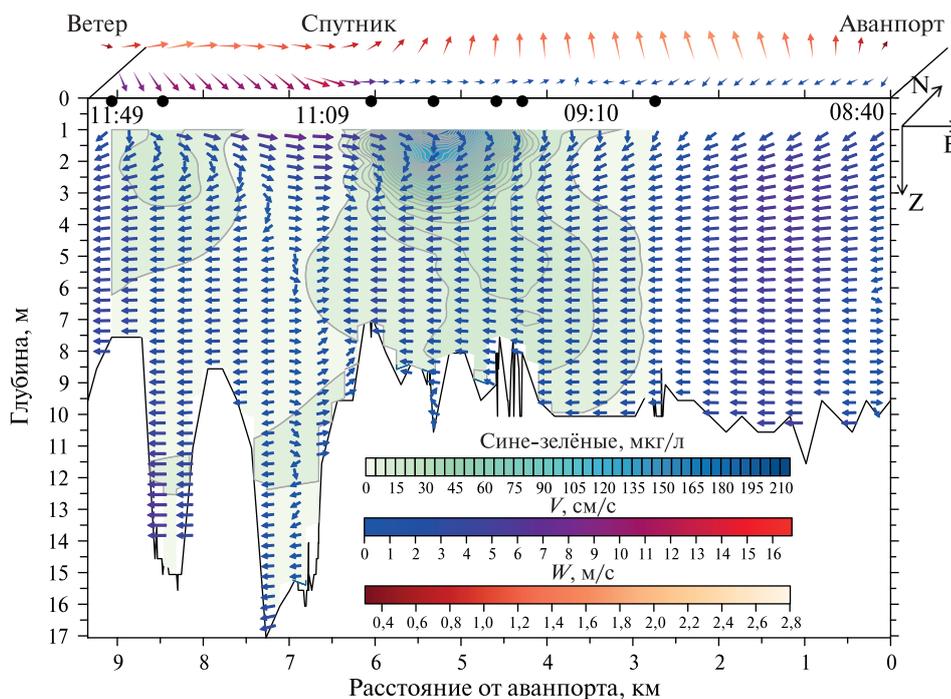


Рис. 7. Векторное поле течений 10.08.2018 в вертикальном срезе водохранилища, наложенное на цветное поле концентрации сине-зелёных водорослей. Верхняя шкала — направления ветра и течения на данном разрезе на поверхности

Горизонтальный размер конвергентной области составляет порядка 2 км, а вертикальный совпадает с глубиной сгустка и составляет порядка 3 м. Ниже этого горизонта вертикальная компонента течения отсутствует. На поверхности в области столкновения потоков, рядом с границей между полосой и относительно чистой водой, наблюдается обратное течение. Над старым руслом течение направлено к ГЭС. Над областью встречных течений наблюдался юго-восточный ветер, который к моменту пролёта спутника сменил направление на западное. Отметим, что область максимальной концентрации сине-зелёных водорослей смещена к центру водохранилища по сравнению со скоплением фитопланктона на спутниковом изображении. Согласно оценке исследования (Капустин и др., 2019), это расстояние при средней скорости сноса 0,75 см/с «сгусток» водорослей преодолевает за 1,5 ч, что соответствует разнице во времени между измерениями максимальной концентрации фитопланктона в области встречных течений и моментом спутниковой съёмки. Как видно из рис. 7, локализация фитопланктона в виде наиболее массивной полосы в центре водохранилища стала результатом взаимодействия руслового и обратного встречных потоков. Образованное ими конвергентное течение поджимает водоросли в верхнем слое воды.

Выводы

В типичный период первой декады августа 2018 г. на основе натурных подспутниковых экспериментов рассмотрен процесс перераспределения фитопланктона в приповерхностном слое воды вследствие изменения течений, связанного с режимом работы ГЭС. Последовательность спутниковых изображений показала, что переход между участками водной поверхности со слабо выраженным и интенсивным цветением сине-зелёных водорослей происходит резко — в течение нескольких суток. Реки, впадающие в водохранилище, большую часть времени находятся в сильном подпоре, и их сток регулируется режимом ГЭС. Фитопланктон выносится из рек в периоды ежедневного пикового сброса через ГЭС и концентрируется преимущественно в русловой части водохранилища — в области наиболее быстрого течения. Последующее распределение фитопланктона по акватории определяется совместным

действием описанных выше факторов, вносящим совокупный вклад как в общее распределение фитопланктона по акватории, так и в локальное перераспределение, а именно:

- режимом работы ГЭС и неравномерными речными выносами;
- неоднородными течениями (зарегулированный русловой поток, обратные течения и круговороты);
- изменчивостью поля ветра;
- собственным развитием фитопланктона.

К локальному перераспределению фитопланктона, в частности, могут приводить особенности течений, связанные с ростом и уменьшением расхода через ГЭС. На основе прямых измерений течений в толще воды установлено, что массивные скопления фитопланктона образуются в результате столкновения прямого и возвратного потоков с последующим образованием конвергентных зон. Около устьев рек под влиянием речных выносов в период пикового сброса фитопланктон выстраивается в виде дугообразных полос, очерчивая эти выносы.

На данном этапе исследований на основе полученных данных пока не удалось сделать однозначного вывода относительно соотношений вклада типичного для начала августа слабого приводного ветра и нестационарных течений, связанных с режимом работы ГЭС, в перераспределение фитопланктона. Однако эти предварительные результаты позволили сформулировать методику сбора и обработки данных. На её основе в 2022 г. был собран значительно расширенный массив данных, охватывающий период с мая по октябрь. Мы надеемся, что его анализ позволит более полно описать эффекты перераспределения фитопланктона в водохранилище.

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (тема № Н-468-99_2021-2023).

Авторы выражают благодарность директору филиала ПАО «РусГидро» «Нижегородская ГЭС» А. А. Гойзенбанду и доценту Волжского государственного университета водного транспорта Е. Ю. Чебану за предоставление данных по расходу воды через ГЭС.

Литература

1. *Алеев М. Ю.* Биоконвекция у морских планктонных водорослей // *Экология моря*. 1991. Т. 38. С. 99–107.
2. *Буторин Н. В.* Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969. 322 с.
3. *Капустин И. А., Мольков А. А.* Структура течений и глубины в озерной части Горьковского водохранилища // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 7. С. 110–117.
4. *Капустин И. А., Ермошкин А. В., Богатов Н. А., Мольков А. А.* Об оценке вклада приводного ветра в кинематику сликов на морской поверхности в условиях ограниченных разгонов волнения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 2. С. 63–172. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-163-172.
5. *Капустин И. А., Вострякова Д. В., Мольков А. А., Даниличева О. А., Лещёв Г. В., Ермаков С. А.* (2021a) Натурные подспутниковые наблюдения конвергентных течений в приповерхностном слое воды по их пенным образам // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 1. С. 188–196. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-188-196.
6. *Капустин И. А., Ермаков С. А., Смирнова М. В., Вострякова Д. В., Мольков А. А., Чебан Е. Ю., Лещёв Г. В.* (2021b) О формировании изолированной линзы речного стока круговоротом в Горьковском водохранилище // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 6. С. 214–221. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-214-221.
7. *Корнева Л. Г.* Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатный дом, 2015. 284 с.
8. *Лаврова О. Ю., Соловьев Д. М., Строчков А. Я., Шендрик В. Д.* Спутниковый мониторинг интенсивного цветения водорослей в Рыбинском водохранилище // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 3. С. 54–72.

9. Мольков А. А., Капустин И. А., Ермаков С. А., Сергиевская И. А., Шомина О. В., Лазарева Т. Н., Даниличева О. А., Лещев Г. В. Гидрофизическая лаборатория ИПФ РАН «Геофизик» как эффективный инструмент лимнологического мониторинга // Науч. проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. ст. 2019. С. 214–218.
10. Мольков А. А., Пелевин В. В., Федоров С. В., Корчёмкина Е. Н. Новый метод спутникового мониторинга оптически сложных внутренних водоемов с высокой пространственно-временной изменчивостью оптических свойств воды // Докл. Российской акад. наук. Физика, техн. науки. 2020. Т. 492. № 1. С. 33–34.
11. Петряхина Е. В., Селезнев В. А. Влияние недельного режима регулирования водного стока Волги на массовое развитие фитопланктона // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2016. Т. 25. № 1. С. 170–175.
12. Эдельштейн К. К. Водные массы озерной части Горьковского водохранилища // Динамика вод. масс водохранилищ: сб. ст. М.; Л.: Наука, 1965. С. 29–38.
13. Экологические проблемы верхней Волги. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2001. 427 с.
14. Anspér A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes // Remote Sensing. 2018. V. 11. No. 1. Art. No. 64.
15. Ermakov S. A., Kapustin I. A., Lazareva T. N., Sergievskaya I. A., Andriyanova N. V. On the Possibilities of Radar Probing of Eutrophication Zones in Water Reservoir // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2013. V. 49. No. 3. P. 307–314. DOI: 10.1134/S0001433813030055.
16. Nalley J. O., O'Donnell D. R., Litchman E. Temperature effects on growth rates and fatty acid content in freshwater algae and cyanobacteria // Algal Research. 2018. V. 35. P. 500–507. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.09.018>.
17. Stal L. J. Cyanobacterial mats and stromatolites // Ecology of Cyanobacteria II. 2012. P. 65–125. DOI: 10.1007/978-94-007-3855-3.

A study of the effect of hydropower operation regime on the redistribution of phytoplankton in the upper water layer in the dam section of the Gorki Reservoir

D. V. Dobrokhotova, I. A. Kapustin, A. A. Molkov, G. V. Leshchev

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod 603022, Russia

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia

E-mail: vostryakova@ipfran.ru

During the period from July to September, cascade active “blooming” of waters is observed in water reservoirs of Volga, with phytoplankton being distributed non-uniformly in the water area. In the present work, based on a series of concurrent satellite and field measurements in the southern part of the Gorki Reservoir, a qualitative assessment of the contribution of some geophysical factors to algal redistribution was first carried out. The geophysical factors considered include the operating regime of the hydropower plant and the irregular flows occurring under conditions of variable water discharge. The experiments were carried out on 1, 2 and 10 August 2018 and included measurements of flow fields, wind and chlorophyll *a* concentrations. Based on experimental data, optical satellite images from Sentinel-2/MSI, Sentinel-3/OLCI and Landsat-8/OLI (August 1–5, 10) and hourly water discharge data from the hydropower plant, a preliminary description of the effect of phytoplankton redistribution was proposed, taking into account the currents in the Reservoir. During the peak daily discharge, phytoplankton is carried out from the rivers flowing into the Reservoir and concentrated in the old riverbed of Volga. In low wind conditions, further phytoplankton distribution and local redistribution are influenced by irregular currents occurring under conditions of variable discharge through the hydropower plant, namely regulated channel flow, reverse currents and gyres. Preliminary results show that during a typical period of the first ten-day period in August the distribution of phytoplankton has a high space-time variability.

Keywords: phytoplankton, heterogeneous currents, river discharge, fluid flow through the hydroelectric power station, optical satellite images, Gorki Reservoir

Accepted: 09.02.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-242-252

References

1. Aleyev M. Yu., Bioconvection in planktonic sea algae, *Ekologiya morya*, 1991, Vol. 38, pp. 99–107 (in Russian).
2. Butorin N. V., *Gidrologicheskie protsessy i dinamika vodnykh mass v vodokhranilishchakh Volzhskogo kaskada* (Hydrological processes and water mass dynamics in the Volga cascade reservoirs), Leningrad: Nauka, 1969, 322 p. (in Russian).
3. Kapustin I. A., Molkov A. A., Structure of currents and depth in the lake part of the Gorky Reservoir, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, No. 7, pp. 110–117 (in Russian).
4. Kapustin I. A., Ermoshkin A. V., Bogatov N. A., Molkov A. A., On the estimation of the contribution of near-surface wind to the kinematics of slicks on the sea surface under conditions of finite wave fetch, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 163–172 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-163-172.
5. Kapustin I. A., Vostryakova D. V., Molkov A. A., Danilicheva O. A., Leshchev G. V., Ermakov S. A. (2021a), Field observations of convergent currents in the near-surface layer of water using foam patterns in quasi-synchronous satellite optical images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 188–196 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-188-196.
6. Kapustin I. A., Ermakov S. A., Smirnova M. V., Vostryakova D. V., Molkov A. A., Cheban E. Yu., Leshchev G. V. (2021b), On the formation of an isolated lens of a river runoff by a whirlpool in the Gorky reservoir, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 6, pp. 214–221 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-214-221.
7. Korneva L. G., *Fitoplankton vodokhranilishch basseina Volgi* (Phytoplankton of Volga River basin reservoirs), Kostroma: Kostromskoi pechatnyi dom, 2015, 284 p. (in Russian).
8. Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Strochkov A. Ya., Shendrik V. D., Satellite monitoring of harmful algae bloom in Rybinsk reservoir, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 54–72 (in Russian).
9. Molkov A. A., Kapustin I. A., Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Shomina O. V., Lazareva T. N., Danilicheva O. A., Leshchev G. V., Hydrophysical laboratory of IAP RAS “Geophysicist” as an effective tool for limnological monitoring, *Nauchnye problemy ozdorovleniya Rossiiskikh rek i puti ikh resheniya* (Scientific problems of the health of Russian rivers and ways of solving them: Proc. Conf.), 2019, pp. 214–218 (in Russian).
10. Molkov A. A., Pelevin V. V., Fedorov S. V., Korchemkina E. N., A new method for satellite monitoring of optically complex inland water bodies with high spatial and temporal variability in optical water properties, *Doklady Physics*, 2020, Vol. 492, No. 1, pp. 33–34 (in Russian).
11. Petryakhina E. V., Seleznev V. A., The effect of a one-week regime of water discharge of the Volga on the mass development of phytoplankton, *Samarskaya Luka: problemy regional'noi i global'noi ekologii*, 2016, Vol. 25, No. 1, pp. 170–175 (in Russian).
12. Edelshtein K. K., Water masses in the lakeside part of the Gorki Reservoir, *Dinamika vodnykh mass vodokhranilishch*, 1965, pp. 29–38 (in Russian).
13. *Ekologicheskie problemy verkhnei Volgi* (Environmental problems of the upper Volga), Yaroslavl: Izd. YaGTU, 2001, 427 p. (in Russian).
14. Ansper A., Alikas K., Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 11, No. 1, Art. No. 64.
15. Ermakov S. A., Kapustin I. A., Lazareva T. N., Sergievskaya I. A., Andriyanova N. V., On the Possibilities of Radar Probing of Eutrophication Zones in Water Reservoir, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, No. 3, pp. 307–314, DOI: 10.1134/S0001433813030055.
16. Nalley J. O., O'Donnell D. R., Litchman E., Temperature effects on growth rates and fatty acid content in freshwater algae and cyanobacteria, *Algal Research*, 2018, Vol. 35, pp. 500–507, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.09.018>.
17. Stal L. J., Cyanobacterial mats and stromatolites, *Ecology of Cyanobacteria II*, 2012, pp. 65–125, DOI: 10.1007/978-94-007-3855-3.