

А.А.Мольков<sup>1</sup>, Д.В.Калинская<sup>2</sup>, И.А.Капустин<sup>1</sup>,  
Е.Н.Корчемкина<sup>2</sup>, В.А.Осокина<sup>3</sup>, В.В.Пелевин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, г.Нижний Новгород

<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

<sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П.Шириова РАН, г.Москва

### **О ПЕРСПЕКТИВАХ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ГИДРОБИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД ВНУТРЕННИХ ПРЕСНЫХ ВОДОЕМОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИЙ НА ГОРЬКОВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ В 2016 Г.**

Изложены результаты пилотных экспедиционных работ, направленных на решение задачи об оценке биопродуктивности внутренних пресноводных водоемов по данным космических сканеров цвета. Их целью были отработка методики сбора, оценка и анализ набора физических параметров водоема и атмосферы над ним, необходимых при верификации региональных алгоритмов обработки оптических спутниковых изображений. Измерения проводились на Горьковском водохранилище, входящем в каскад из 8 водохранилищ, расположенных на главной водной артерии Центральной России – р.Волга, и являющимся примером внутреннего пресноводного водоема, характеризующегося высокой биологической продуктивностью.

Представлены карты концентраций хлорофилла «а», общего органического углерода и общей взвеси с высоким пространственным разрешением в водах южной части водохранилища за три дня: 21 – 23 июня 2016 г. Зарегистрирована и проанализирована изменчивость указанных характеристик под действием дождей, ветра и течений. Впервые измерен коэффициент яркости (КЯ) водной толщи в 38 точках водохранилища при разных концентрациях сине-зеленых водорослей в период 1 – 6 августа 2016 г. и параметров атмосферы над водохранилищем. Сделан вывод о точности и особенностях восстановления биооптических характеристик воды по измеренному КЯ.

На основании полученных результатов проанализированы возможности применения спутниковых методов дистанционного мониторинга качества вод во внутренних пресноводных водоемах.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *дистанционные измерения, флуоресцентный лидар УФЛ-9, яркость моря, первичные гидрооптические характеристики воды, оптические характеристики атмосферы, пресноводный водоем, эвтрофикация*

Река Волга – главная водная артерия центральной России. Ее облик был изменен в прошлом столетии в результате организации каскада из 8 водохранилищ. Большая часть затопленных площадей охарактеризовалась малыми глубинами и слабыми течениями и, как результат, хорошо прогретыми водами, где активно стало развиваться цветение водорослей. Одновременно с этим функционирование прибрежных городов, а также активная сельскохозяйственная деятельность внесли вклад в химический состав воды и, как результат, в экологическое состояние реки. Регистрация ключевых гидрологических характеристик каждого из водохранилищ производилась регулярно с момента их основания и по 80-е гг. [1 – 3], после чего про-

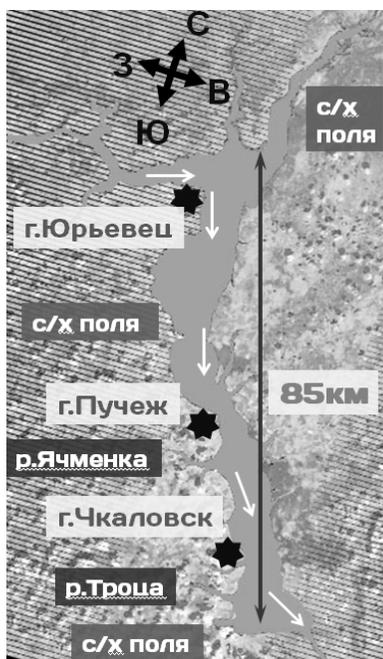


Рис. 1. Схема Горьковского водохранилища на основе снимка *Landsat 7*.

изошло существенное сокращение станций мониторинга и экспедиционных работ, а после 2000 г. последние свелись практически к нулю. Это повлекло за собой нарушение систематичности получения натуральных данных, прежняя регулярность которых позволяла не только следить за динамикой изменения экологического состояния водоема, но и решать научные задачи: искать новые и уточнять старые корреляционные связи между разными гидрологическими характеристиками, оценивать степень влияния разных факторов на протекающие в бассейне процессы и т.д.

В результате более чем за 20 лет сформировался пробел в знаниях об изменчивости экологического состояния водохранилищ с одной стороны, а с другой стороны получили широкое распространение новые современные инструменты его дистанционного мониторинга, такие как спутниковые сканеры цвета. Последние открыли большие возможности для оценки биопродуктивности водоемов, но потребовали разработки

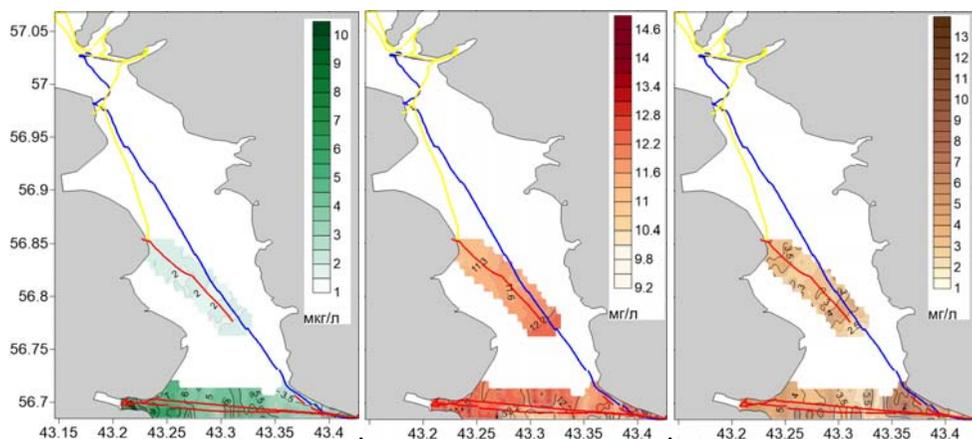
региональных алгоритмов восстановления параметров воды по спутниковым изображениям. Такие задачи давно решаются разными коллективами для некоторых морей России [4 – 8], но для внутренних водоемов, особенно для бассейнов Центральной России, такая задача ранее не ставилась. Исключение составляет работа [9], в которой прямо указано на невозможность применения стандартных алгоритмов обработки спутниковых оптических изображений для оценки концентрации хлорофилла «а» в водах эвтрофного водоема на примере Рыбинского водохранилища, входящего в каскад волжских водохранилищ. Адаптация этих алгоритмов под конкретный, в частности, волжский бассейн требует данных контактных измерений. При этом эти же данные послужили бы полезной информацией для оценки актуального состояния качества воды в верхней Волге и восполнили бы пробел в данных, о котором говорилось ранее.

Для достижения поставленной цели летом 2016 г. были выполнены экспедиционные работы на Горьковском водохранилище, расположенном ниже Рыбинского, упоминавшегося ранее. Работы проводились на озерной части водохранилища с южной его стороны и охватывали район от плотины ГЭС возле г.Заволжье до с.Сокольское, что соответствует площади порядка 50 × 15 км (рис.1). Этот район характеризуется русловым течением Волги со скоростями от 0,2 до 1 м/с под крутым правым берегом с глубинами 18 – 30 м и затопленными поймами со средней глубиной 3 – 5 м и прогретой водой под левым берегом (рис.1). Наиболее значительный сток примеси в водохранилище осуществляется с реками Ячменка, Санохта и Троца, на берегах которых размещены все крупные населенные пункты и также поля сельскохозяйственных назначений.

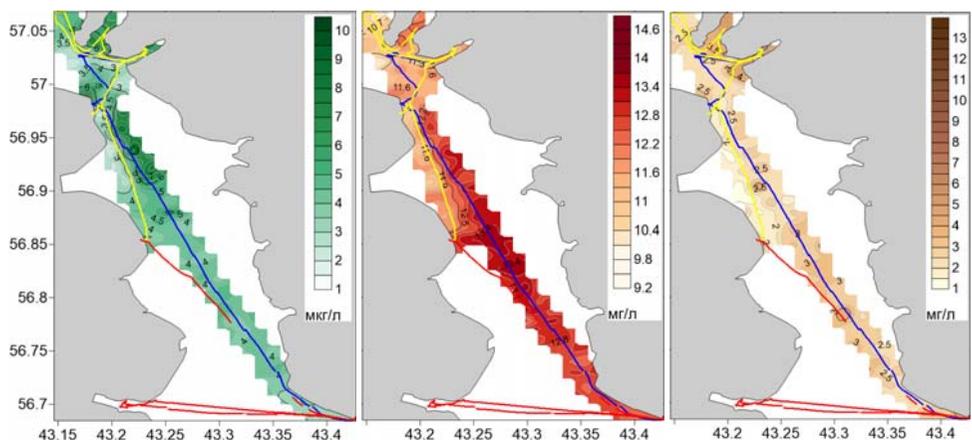
Сотрудники Института прикладной физики (ИПФ) РАН с 2008 г. ведут экологический мониторинг сине-зеленых водорослей и пленок поверхностно-активных веществ биогенного и антропогенного происхождения [10 – 14]. Однако тот набор данных, который ежегодно регистрируется ими, не достаточен для решения задачи спутникового мониторинга в силу отсутствия некоторых приборов в инструментальной базе. В связи с чем, в 2016 г. совместно с Морским гидрофизическим институтом (МГИ) РАН и Институтом океанологии (ИО) РАН были выполнены экспедиционные работы с использованием объединенного комплекса научного оборудования. В состав комплекса входили: флуоресцентный ультрафиолетовый лидар УФЛ-9 оригинальной разработки ИО для измерения концентраций хлорофилла «а», органических веществ и минеральной взвеси в приповерхностном слое, спектрофотометр, разработанный в отделе оптики моря МГИ для регистрации спектрального коэффициента яркости водной толщи, солнечный фотометр *SPM* для измерения прозрачности атмосферы, акустический доплеровский профилограф скоростей течений и сигнала обратного акустического рассеяния *ADCP WorkHorse Sentinel 1200 kHz*, СТД-зонд *YSI 6600 v2* с оптическими датчиками мутности и сине-зеленых водорослей, судовой карт-плоттер *Garmin* для регистрации географических координат судна, рельефа дна и температуры воды в приповерхностном слое, а также ультразвуковой анемометр *WindSonic*. Для калибровки лидара и верификации восстанавливаемых характеристик воды вдоль маршрута движения судна производился отбор проб воды с целью последующего лабораторного анализа.

**Лидарные измерения биооптических характеристик воды.** Первый рейс, направленный на оценку биопродуктивности вод на различных участках водохранилища, был выполнен с 21 по 23 июня 2016 г. Для получения информации со столь больших территорий с высоким пространственным разрешением и в течение короткого промежутка времени (посуточно) был использован флуоресцентный лидар УФЛ-9 [15 – 17]. Регистрация параметров водной среды и приводного ветра велась непрерывно на всем маршруте следования судна, составившем более 160 км и прошедшем по основному руслу Волги и поперек устьев впадающих в него рек. Измерения велись с движущегося судна в автоматическом режиме с частотой 2 Гц. Возбуждение флуоресценции в приповерхностном слое (1 – 10 м) происходило на длинах волн лазера 355 и 532 нм, регистрация сигналов – на 355, 404, 440, 685 нм, что позволяло измерять концентрации хлорофилла и органического вещества по сигналам флуоресценции при 685 и 440 нм, а также концентрацию взвеси по сигналу упругого рассеяния лазерного импульса при 355 нм. Для нормировки использовался сигнал комбинационного рассеяния лазерного излучения при 404 нм.

По результатам измерений построены карты распределений хлорофилла «а», общего органического углерода (ООУ), взвеси и температуры воды за 21 июня (рис.2) и за 22 – 23 июня (рис.3). Такое разделение по датам соответствует изменению погодных условий с жаркой безветренной погоды в первый день в сторону периодических дождей и северо-западного ветра (направление вдоль водохранилища, рис.1) со скоростью 3 – 6 м/с в последующие дни. Видно, что в отсутствие ветра вдоль русла наблюдаются области с от-



Р и с . 2 . Карты концентраций хлорофилла «а», ООУ и взвеси по данным лидара южной части Горьковского водохранилища 21 июня 2016 г. (красный трек).



Р и с . 3 . Карты концентраций хлорофилла «а», ООУ и взвеси по данным лидара в южной части Горьковского водохранилища 22 (желтый трек) и 23 июня (синий трек) 2016 г.

носителем однородной концентрации минеральной и органической примеси, в то время как перед плотиной и под левым берегом их однородность нарушается вследствие переменного рельефа дна и нестационарных течений, в том числе и вихревых. На картах хорошо прослеживается повышение концентрации примесей, особенно водорослей и, как результат, хлорофилла «а» в устьях рек, в частности, в р.Троца. Атмосферные осадки и перемешивание вод под действием ветрового волнения оказывают значительное влияние на содержание органического компонента примеси в приповерхностном водном слое. Согласно карте за 23 июня концентрации хлорофилла «а» и ООУ выросли в центре водохранилища, а сами области стали вытянуты вдоль него. Такой эффект связан с тем, что под действием сильного продолжительного дождя накануне (22 июня) произошел обильный сток удобрений с полей в малые реки, а позже – сток этой воды вместе с водорослями и береговой взвесью в водохранилище. Однако увеличения концентрации взвеси в центре

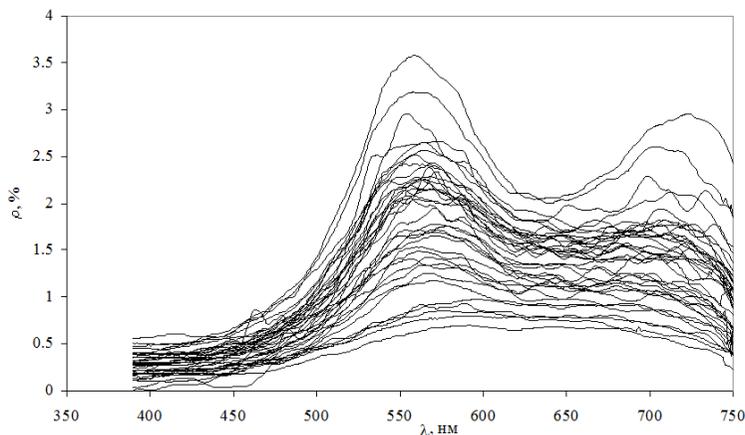
водоема не наблюдалось, что обусловлено, по-видимому, быстрым осаждением взвеси и самоочищением вод. Одновременный сброс воды с водохранилища через ГЭС для поддержания среднего уровня воды ускорил процесс стока «новой» воды с малых рек и обеспечил интенсивный ее «вброс» в русловое течение, однородность и стационарность которого привела к вытянутости полей органики, находящейся в растворенном и взвешенном состоянии, основным маркером которой является ООУ.

Совместный анализ карт разных гидрологических характеристик несет в себе информацию не только о динамике изменения этих характеристик, связях между ними и скоростях протекания процессов, но и о пространственных особенностях, связанных со стоком рек, антропогенным влиянием и т.д. В процитированной ранее литературе [1 – 3] приводятся данные за 90-е и 2000-е гг. только одного параметра, который напрямую можно сравнить с измеренным нами параметром, а именно, хлорофилла «а» как индикатора биопродуктивности водоема. Согласно указанным источникам в фотическом слое толщиной 2 м средние по годам концентрации хлорофилла «а» в июне составляют 5 – 6 мкг/л, что совпадает с его средними по пространству значениями, полученными по данным лидарных измерений. Это, вообще говоря, не является признаком неизменности качества воды за 20 лет, поскольку указанные в [1 – 3] значения привязаны лишь к одной станции водохранилища – рядом с г. Чкаловск, в то время как в других его точках могут происходить существенные изменения концентраций биооптических параметров воды, и полученные карты распределений за 21 – 23 июня 2016 г. подтверждают высокую как пространственную, так и временную изменчивость этих параметров.

#### **Подспутниковые эксперименты на Горьковском водохранилище.**

Целью второго рейса, прошедшего 1 – 6 августа 2016 г. в том же районе водохранилища, было измерение коэффициента яркости (КЯ) водной толщи и параметров атмосферы, то есть тех параметров, которые необходимы при разработке региональных алгоритмов оценки качества воды по спутниковым изображениям. Для этого были задействованы солнечный фотометр *SPM* и спектрофотометр МГИ [18, 19]. Измерения проводились в солнечную погоду при чистом небосводе каждые полчаса во время дрейфа судна (на станциях), в то время как измерения параметров течения, ветра, температуры и мутности воды, водорослей, а также рельефа дна велись непрерывно на всем маршруте следования судна, который составил более 220 км. Одновременно с этим на станциях проводился отбор проб воды для последующего их лабораторного анализа с целью определения концентраций хлорофилла «а», растворенного органического вещества (РОВ) и взвеси в воде. Всего было сделано 36 станций, равномерно покрывающих исследуемый район плавания. КЯ определялся с шагом 1 нм в полосе 390 – 750 нм и с погрешностью в среднем по спектру 3 % (рис.4).

Спектры имеют сходную форму с более или менее ярко выраженным провалом в области 570 нм, соответствующим поглощению фикоэритрина – вспомогательного пигмента сине-зеленых водорослей. Максимумы всех спектров лежат в диапазоне 0,77 – 3,7 % на длине волны  $560 \pm 7$  нм. Такой разброс говорит о большой количественной, но не качественной изменчивости

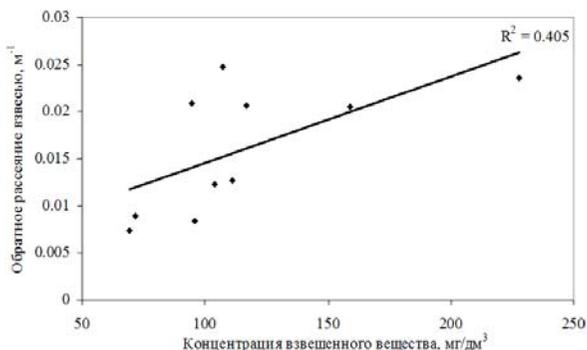


Р и с . 4 . Спектры КЯ, полученные в период с 1 по 6 августа 2016 г.

первичных гидрооптических характеристик. Однако в целом форма спектров показывает, что основным компонентом воды является неживая органика, доминирование которой позволило оценить спектральный наклон ее поглощения по коротковолновой части измеренного спектра КЯ. Наклон получился равным в среднем 0,021, что говорит о преобладающем вкладе растворенного органического вещества в поглощение неживой органикой по сравнению с поглощением органической взвесью.

Для определения концентраций примесей был адаптирован существующий аналитический алгоритм, предназначенный для обработки данных КЯ морской воды и позволяющий рассчитывать концентрации оптически значимых примесей: хлорофилла «а», РОВ и минеральной взвеси. Сопоставления данных об обратном рассеянии с данными проб показывает неплохую корреляцию между ними  $R \approx 0,63$  (рис.5), в то время как восстановленные значения хлорофилла «а» плохо коррелируют с пробами. Достижение лучших показателей требует большей статистики и более глубокой адаптации стандартного алгоритма к условиям пресноводного эвтрофного водоема.

Кроме оценки КЯ за время экспедиции впервые были выполнены измерения спектральной прозрачности атмосферы над акваторией Горьковского водохранилища, необходимые для будущих работ по атмосферной коррекции спутниковых данных. Стоит отметить, что преобладающая безоблачная погода, позволила получить неплохое количество спутниковых оптических изображений района плавания, на основе которых в дальнейшем планирует-



Р и с . 5 . Результат восстановления концентрации взвешенного вещества по коэффициенту яркости моря в сопоставлении с результатами лабораторного анализа проб воды на Горьковском водохранилище 1 – 6 августа 2016 г.

ся отработать методику разработки региональных алгоритмов оценки биопродуктивности внутренних пресноводных водоемов.

**Выводы.** Научным коллективом трех институтов (ИПФ, МГИ и ИО) проведены пилотные экспедиционные работы, направленные на решение задачи о развитии метода оценки биопродуктивности внутренних пресноводных водоемов по данным космических сканеров цвета. В качестве рабочего полигона было выбрано Горьковское водохранилище, как яркий пример эвтрофного водоема, расположенного на главной водной артерии Центральной России – р.Волга. Экологическое состояние реки в целом ухудшается вследствие постоянно растущей антропогенной нагрузки, а потому требует развития методов регулярного мониторинга, в частности, спутниковых.

Выполненные экспедиционные работы новы для водоемов Центральной России: лидарные измерения концентрации оптически активных примесей фотического слоя воды, измерения коэффициента яркости водной толщи и параметров атмосферы над водохранилищем при сопутствующих измерениях ветра, течений, оптических свойств воды и концентрации водорослей выполнены впервые. С одной стороны, это позволило определить абсолютные значения наиболее важных гидрологических характеристик водоема и проследить их пространственно-временную изменчивость под действием стока рек, антропогенного влияния городов и атмосферных осадков. С другой стороны, в результате измерений собраны данные именно тех параметров водной толщи и атмосферы, которые необходимы для разработки и верификации региональных алгоритмов оценки биопродуктивности водоема по спутниковым данным.

Выполненные работы подтвердили как возможность и необходимость проведения такого рода экспедиционных работ, так и перспективность выполнения связанных многофакторных гидрологических измерений параметров водохранилища для решения целого круга как научных, так и прикладных задач. В частности, создание регионального алгоритма обработки спутниковых данных для Горьковского водохранилища позволило бы в будущем провести его адаптацию к другим водохранилищам р.Волга, обладающих схожими чертами по части экологического состояния, тем самым существенно развить возможности дистанционного мониторинга качеств вод и на внутренние водоемы страны.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 14-45-01049, 15-35-20992, 15-45-02610, 15-45-02531, 16-35-00179 и Министерства образования и науки (соглашение 14.613.21.0050, код RFMEFI61315X0050).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Охапкин А.Г., Микульчик И.А., Корнева Л.Г., Минеева Н.М.* Фитопланктон Горьковского водохранилища.– Тольятти, 1997.– 156 с.
2. *Минеева Н.М.* Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ.– М.: Наука, 2004.– 156 с.
3. *Минеева Н.М.* Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги.– Ярославль: Принтхаус, 2007.– 279 с.
4. *Буканова Т.В., Вазюля С.В., Копелевич О.В., Буренков В.И., Григорьев А.В., Храпко А.Н., Шеберстов С.В., Александров С.В.* Региональные алгоритмы оцен-

- ки концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.– 2011.– 8, 2.– С.64-73.
5. *Финенко З.З., Суслин В.В., Чурилова Т.Я.* Оценка продуктивности фитопланктона Черного моря по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.– 2010.– 432, 6.– С.845-848.
  6. *Салюк П.А., Степочкин И.Е., Голик И.А., Букин О.А., Павлов А.Н., Алексанин А.И.* Разработка эмпирических алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла а и окрашенных растворенных органических веществ для дальневосточных морей из дистанционных данных по цвету водной поверхности // Исследование Земли из космоса.– 2013.– 3.– С.45.
  7. *Ли М.Е., Шибанов Е.Б., Корчемкина Е.Н., Мартынов О.В.* Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // Морской гидрофизический журнал.– 2015.– 6.– С.17-33.
  8. *Корчемкина Е.Н., Ли М.Е.* Аномальные оптические характеристики прибрежных вод Черного моря в июле 2012г. и их связь с концентрацией минеральной взвеси в воде // Фундаментальная и прикладная гидрофизика.– 2015.– 10-1.– С.39-43.
  9. *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.– 11, 3.– С.54-72.
  10. *Ермаков С.А., Капустин И.А., Лазарева Т.Н., Сергиевская И.А., Андриянова Н.В.* О возможностях радиолокационной диагностики зон эвтрофирования водоемов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2013.– 49, 3.– С.336-343.
  11. *Ермошкин А.В., Капустин И.А.* Исследование особенностей растекания пленок поверхностно-активных веществ на поверхности внутренних водоемов морским навигационным радиолокатором // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.– 2015.– 12, 6.– С.136-142.
  12. *Леднёв В.Н., Гришин М.Я., Першин С.М., Бункин А.Ф., Капустин И.А., Мольков А.А., Ермаков С.А.* Лидарное зондирование пресноводной акватории с высокой концентрацией фитопланктона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.– 2016.– 13, 1.– С.119-134.
  13. *Ермаков С.А., Лаврова О.Ю., Капустин И.А., Макаров Е.В., Сергиевская И.А.* Исследование особенностей геометрии пленочных сликов на морской поверхности по данным спутниковых радиолокационных наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.– 2016.– 13, 3.– С.97-105.
  14. *Ермаков С.А., Купаев А.В., Капустин И.А., Мольков А.А., Сергиевская И.А., Шомина О.В.* Эксперименты по дистанционному зондированию органических пленок с использованием многочастотного радиолокатора микроволнового диапазона // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта.– 2016.– 48.– С.111-121.
  15. *Айбулатов Н.А., Завьялов П.О., Пелевин В.В.* Особенности гидрофизического самоочищения российской прибрежной зоны Черного моря близ устьев рек // Геоэкология.– 2008.– 4.– С.301-310.
  16. *Пелевин В.В., Завьялов П.О., Беляев Н.А., Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Мошаров С.А.* Пространственная изменчивость концентраций хлорофилла «а», растворенного органического вещества и взвеси в поверхностном слое Карского моря в сентябре 2011 г. по лидарным данным // Океанология.– 2017.– 57, 1.– С.1-11.

17. *Palmer S.C., Pelevin V.V., Goncharenko I.V., et al. Ultraviolet Fluorescence LiDAR (UFL) as a Measurement Tool for Water Quality Parameters in Turbid Lake Conditions // Remote Sens.– 2013.– 5.– С.4405-4422.*
18. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Князев В.В. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях // Оптика атмосферы и океана.– 2012.– 25, 12.– С.1112-1117.*
19. *Ли М.Е., Мартынов О.В. Измеритель коэффициентов яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2000.– С.163-173.*

Материал поступил в редакцию 01.12.2016 г.  
После доработки 20.04.2017 г.

A.A.Mol'kov, D.V.Kalinskaya, I.A.Kapustin,  
E.N.Korchemkina, V.A.Osokina, V.V.Pelevin

ABOUT THE PERSPECTIVES OF REMOTE ASSESSMENT OF HYDROBIOOPTIC WATER PARAMETERS OF INTERNAL FRESH WATER RESOURCES ACORDING RESULTS OF EXPEDITIONS ON GORKOVSKY WATER RESERVOIR IN 2016

The presented results of pilot expedition work are aimed to assess the bioproductivity of inland fresh water areas based on data from space color scanners. The goal was to develop the methodology of gathering, evaluation and analyze the set of physical parameters of reservoir and atmosphere above it, which are necessary to verify the regional algorithms for processing of optical satellite images. The measurements were carried out at the Gorky water reservoir, which is part of eight reservoirs cascade located on the main waterway of Central Russia the Volga River, and is an example of an internal freshwater reservoir characterized by high biological productivity.

The maps of concentration of chlorophyll "a", total organic carbon and total suspended matter with high spatial resolution in the waters of the south reservoir are presented for three days: June 21 – 23, 2016. The variability of these parameters under the influence of rains, wind and currents is recorded and analyzed. The luminance coefficient of the water column was measured at 38 points of the reservoir at different concentrations of blue-green algae from August 1 to 6, 2016 and the parameters of the atmosphere above for the first time. A conclusion about the accuracy and features of the restoration of biooptical water parameters from the measured luminance coefficient was drawn.

Based on the results obtained, the possibilities of using satellite methods for remote monitoring of water quality in inland freshwater reservoirs are analyzed.

**KEYWORDS:** remote measurements, fluorescent lidar UFL-9, brightness of the sea, water inherent optical properties, optical parameters of the atmosphere, freshwater reservoir, eutrophication