

Спутниковый мониторинг интенсивного цветения водорослей в Рыбинском водохранилище

О.Ю. Лаврова¹, Д.М. Соловьев², А.Я. Строчков¹, В.Д. Шендрик³

¹*Институт космических исследований РАН, Москва
olavrova@iki.rssi.ru*

²*Морской гидрофизический институт, Севастополь*

³*Международный университет природы, общества и человека «Дубна», Дубна*

Рассматриваются возможности и ограничения использования данных дистанционного зондирования из космоса для выявления областей интенсивного цветения водорослей. Спутниковые наблюдения проводились над акваторией Рыбинского водохранилища. Исследования базировались на изображениях, полученных с помощью сенсоров спутников серии Landsat, ASAR и MERIS Envisat, SAR ERS-2. Делается вывод, что данные спутников Landsat лучше всего подходят для выявления областей цветения цианобактерий, а на радиолокационных изображениях лучше проявляются акватории, подверженные интенсивному цветению диатомовых водорослей. На основе информации, полученной сенсором MERIS Envisat строились карты концентрации хлорофилла-а и интегрального количества взвешенного вещества, для получения количественных оценок биомассы водорослей. Показано, что для случаев интенсивного цветения цианобактерий, когда на поверхности воды образуются плотные скопления водорослей, стандартные алгоритмы, разработанные NASA для данных MERIS Envisat, имеют серьезные ограничения. Результаты, полученные на основе анализа спутниковой информации, сравнивались с результатами натурных измерений с судна, которые проводились в июне и августе 2010 и 2013 г. Прослеживается хорошая корреляция на качественном уровне. Проводится сравнение с биогенным загрязнением в Балтийском море.

Ключевые слова: интенсивное цветение водорослей, цианобактерии, диатомовые водоросли, спутниковые наблюдения, радиолокационное зондирование, Рыбинское водохранилище, Балтийское море, Landsat, Envisat.

Введение

Проблема интенсивного «цветения» воды очень остро стоит для самых разных акваторий. «Цветением» воды считают массовое развитие одного или 2-3 планктонных видов, сопровождающиеся значительным ухудшением качества воды. Интенсивное и зачастую вредоносное цветение водорослей резко возросло в последние 20-30 лет и охватило как пресные, так и морские водоемы. Как считают гидробиологи, это вызвано целым комплексом факторов, таких как изменение климата, поступление в воду большого количества различных минеральных и органических веществ, связанное с интенсификацией хозяйственной деятельности человека. Вредоносное цветение может оказать угнетающее действие на водную биоту из-за кислородного голодания и выделения токсичных метаболитов. Особенно тяжелая ситуация сложилась в последние годы на Балтике. Балтийское море, как известно, подвержено интенсивному цветению цианобактерий (сине-зеленых водорослей) практически на всей его акватории. Ученые прибалтийских стран, в первую очередь из Швеции и Финляндии (Hansson, Nakansson, 2007), осуществляют ежедневный мониторинг цветения водорослей, размещают в Интернете карты цветения и составляют прогнозы развития ситуации на ближайшее время (<http://www.smhi.se>). Проводимый ими

мониторинг основывается на данных, получаемых с MODIS Terra/Aqua и на результатах измерений in-situ, получаемых на стандартных станциях. В последние годы используется также информация, которую собирают с паромов, курсирующих между портами, например Таллинн-Хельсинки, или Хельсинки-Стокгольм. Учитывая, что для района Балтийского моря характерна облачная погода, использование только спутниковых оптических данных сильно сужает возможности мониторинга, а результаты натурных измерений доступны только для ограниченного числа районов. Расширить возможности спутникового мониторинга могла бы радиолокационная съемка из космоса, которая не зависит от облачности и освещенности. Современные радиолокаторы позволяют получать информацию с высоким пространственным разрешением (от нескольких метров) и для больших территорий. Однако до сих пор не решена задача уверенного надежного обнаружения зон цветения, а тем более типа водорослей на основе данных спутниковой радиолокации. Хорошо известно, что во время интенсивного цветения водорослей на поверхности воды образуются так называемые биогенные пленки или целые «маты», которые гасят гравитационно-капиллярные волны. На радиолокационных изображениях эти пленки или «маты» проявляются в виде сликов, темных областей с пониженной интенсивностью радиолокационного сигнала. Но подобные области пониженного рассеяния могут иметь и другое происхождение. Они могут, например, соответствовать областям ветрового затишья, ветровой тени (вблизи берега), или являться нефтяными пленками. Большое влияние на состояние биогенной пленки, и, соответственно, на формирование радиолокационного сигнала оказывает ветер. При скорости ветра больше 8-10 м/с пленка разрушается, скоплений водорослей на поверхности не наблюдается, усиливается рассеяние радиолокационного сигнала. Для решения задачи определения зон и интенсивности цветения на основе спутниковых радиолокационных данных нами был предложен метод выявления зон цветения по проявлениям следов за движущимися судами в виде светлой узкой протяженной полосы (Lavrova et al., 2014). Подробно этот метод рассмотрен в статье, представленной в данном номере (Митягина, Лаврова, 2014).

Еще одна важная задача, которая должна решаться в рамках проведения мониторинга интенсивного цветения, это прогноз распространения биогенного загрязнения. Известно, что интенсивное цветение, характерно, прежде всего, для водоемов со слабыми течениями. Считается, что на перенос водорослей самое значительное влияние оказывает ветер. Однако анализ спутниковой информации показывает, что области интенсивного цветения вытягиваются вдоль течений и вовлекаются в вихревые движения. На изображениях видимого диапазона это выглядит особенно убедительно. На *рис. 1* представлен фрагмент цветосинтезированного изображения OLI Landsat-8, полученного 7 июля 2014 г.

над юго-восточной акваторией Балтийского моря. Масштабные проявления циклонического вихря и многочисленных вихревых диполей служат наглядным примером того, как под действием динамических и циркуляционных процессов распространяются биогенные загрязнения, вызванные интенсивным цветением цианобактерий.



Рис. 1. Распространение биогенных загрязнений под действием вихревых процессов. Фрагмент изображения OLI Landsat-8 (4-3-2 каналы), полученного 07.07.2014 над юго-восточной акваторией Балтийского моря

Спутниковые радиолокационные изображения, полученные в период интенсивного цветения водорослей, также содержат свидетельства переноса биогенных загрязнений вихревыми структурами. Подробно данный вопрос обсуждается в наших статьях, посвященных радиометрическим и радиолокационным наблюдениям вихревой активности в Балтийском море в период интенсивного цветения (Lavrova et al., 2010; Каримова, Лаврова и др., 2011). В данных работах показано, что на синхронных изображениях, полученных в видимом и микроволновом диапазонах электромагнитного спектра, проявление вихревых структур может различаться. Данные различия вызваны тем, что водоросли могут и не образовывать биогенную пленку, за счет которой вихри визуализируются на радиолокационных изображениях (РЛИ). Либо радиолокационная съемка была сделана в гидрометеорологических условиях, когда пленка разрушилась под влиянием ветра или волнения. А в период цветения диатомовых водорослей было установлено, что на радио-

метрических изображениях видимого диапазона проявляются только наиболее крупные вихревые структуры из тех, что могут быть обнаружены на квазисинхронных РЛИ (Каримова, Лаврова и др., 2011). Данный результат позволяет надеяться на возможность различения типов водорослей (основных их групп) с помощью совместного анализа различных спутниковых данных.

С целью исследования возможностей различных спутниковых сенсоров для решения задачи мониторинга цветения водорослей, были проведены подспутниковые наблюдения на Рыбинском водохранилище, результаты которых представлены в данной статье.

Район исследования

Рыбинское водохранилище – самое большое водохранилище на реке Волга – находится в ее верхней части и является третьим звеном волжского каскада. Площадь зеркала составляет 4580 км², длина – 150 км, максимальная ширина – 70 км, средняя глубина – 5,6 м, максимальная глубина – 30,4 м. Рыбинское водохранилище создано в 1941 году в результате перекрытия плотинами русел рек Волги и Шексны в районе Рыбинска и её притоках Шексне и Мологе. При создании этого водохранилища были затоплены 5 тыс. квадратных километров; под воду ушли древнерусский город Молога и 663 деревни. Водами Рыбинского водохранилища были затоплены также большие территории сельскохозяйственных земель и лесных массивов. Под водой оказалось 3645 квадратных километров леса. Огромный запас плодородных веществ, содержащийся в почве затопленной поймы, перерабатывался водными микроорганизмами, что привело к повышению минерализации вод и способствовало обогащению их органическими веществами. При зарегулировании стока реки Волга в водохранилище сформировался замкнутый цикл круговорота веществ, определяемый замедленным водообменом, усилением процессов аккумуляции и седиментации, дополнительным обогащением минеральными и органическими веществами, изменением температурного и гидрологического режима. Создание водохранилища привело к образованию мелководий и зон колеблющегося уровня воды, снижению содержания кислорода в толще воды. Трансформация водной среды способствовала изменениям, благоприятным для увеличения интенсивности развития фитопланктона.

По распределению глубин и морфологическим особенностям ложа в водохранилище выделяются 4 основных плёса: Волжский, Моложский, Шексинский и Главный (рис. 2). Первые три плёса располагаются по долинам соответствующих рек и представляют собой вытянутые сравнительно узкие участки. Мелководные участки с глубинами до 2 м занимают около 21% площади водохранилища, глубины до 6 м – более половины её,

свыше 8 м – 27%. По затопленным руслам рек Волги, Мологи и Шексны глубины колеблются в пределах 11–30 м (Копылов, 1993).



Рис. 2. Районирование Рыбинского водохранилища. Цифрами обозначены станции контактных измерений: 1 – Коприно; 2 – Молога; 3 – Наволок; 4 – Измайлово; 5 – Средний Двор; 6 – Брейтово

Пространственное распределение водорослей в Рыбинском водохранилище зависит главным образом от силы и направления ветра и циркуляции вод. Ветровой режим на Рыбинском водохранилище характеризуется преобладанием ветров южных и западных направлений. В годы преобладания меридиональной циркуляции значительно увеличивается роль ветров северной четверти. Средние скорости ветра над зеркалом водохранилища составляют в среднем 4,2–4,5 м/с, что на 20–30% выше, чем над побережьем (Корнева и др., 1999). В весенний период при преобладании северо-западных ветров скоростью 6 м/с формируется система из 9 циклонических и антициклонических круговоротов с размерами от 10 до 60 км, занимающих площадь до 1600 км². При усилении скорости ветра до штормовых значений число круговоротов не меняется, усиливается только интенсивность переноса между вихревыми образованиями и несколько увеличивается занимаемая ими площадь. Летняя циркуляция водных масс формируется при преобладающем действии ветра юго-западного направления и представляет собой 5 циклонических и антициклонических круговоротов с размерами по продольной оси от 5 до 90 км и суммарной площадью 2100 км² (Поддубный, 1993).

В пресных водоемах летом "цветение" воды чаще всего вызывается сине-зелеными и динофитовыми водорослями, весной и осенью - диатомовыми. Реже "цветение" воды обуславливают зеленые или желто-зеленые водоросли. Для Рыбинского водохранилища доминирующими видами фитопланктона являются:

- диатомовые водоросли - *Melosira* и *Stephanodiscus*;
- цианобактерии - *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*, *Microcystis viridis*, *Anabaena spiroides*;
- зеленые – *Pediastrum boryanum*, *Mougeotia elegantula*.

Сезонная динамика фитопланктона на водохранилище характеризуется 3 подъемами биомассы: весной, летом и осенью, которые значительно варьируются по срокам и величинам в зависимости от погодных условий и местоположения участка в водоёме. В сезонной динамике биомассы фитопланктона Рыбинского водохранилища можно выделить 4 основные стадии:

1. весенний подъем биомассы, обусловленный развитием диатомовых водорослей;
2. «летняя депрессия» - фаза чистой воды;
3. летний, самый значительный подъем биомассы, обусловленный развитием сине-зеленных и диатомовых;
4. осенний пик – выражен не всегда и обычно связан с обильной вегетацией диатомовых со значительным участием сине-зеленых.

Осенью чаще наблюдается плавное снижение биомассы за счёт спада развития летних форм диатомовых и сине-зеленых водорослей. Начиная с 1981 г., до настоящего времени летний максимум превышает величины весеннего за счёт более интенсивного развития сине-зеленых.

Систематические исследования фитопланктона в Рыбинском водохранилище проводятся Институтом биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина начиная с 50-х годов. Ежегодно в летний период сотрудниками этого института проводятся измерения биологических и физико-химических параметров воды на стандартных станциях. В июне и августе 2013 г. один из авторов данной статьи – Шендрик Виктория – принимала участие в таких измерениях, результаты которых обсуждаются ниже.

Рыбинское водохранилище было выбрано нами в качестве объекта исследования исходя из следующих причин:

- интенсивное цветение водорослей в водохранилище, в первую очередь сине-зеленых и диатомовых, схоже с цветением в других водоемах волжского бассейна, а также в Балтийском море, что позволяет сравнивать результаты наблюдений, полученные другими авторами (Reinart, Kutser, 2006; Kahru et al., 2007; Ермаков и др., 2013);

- большие размеры водохранилища позволяют проводить спутниковый мониторинг сенсорами, предоставляющими информацию со средним пространственным разрешением (150 м для ASAR и 260 м для Meris Envisat);
- наличие постоянных циклонических и антициклонических круговоротов дает возможность изучить их влияние на распространение биогенных загрязнений.

Спутниковые наблюдения

В зависимости от типа фитопланктона вода приобретает различную окраску, она может быть от сине-зеленого, ярко-зеленого, серого до желто-зеленого, каштанового или ярко-красного, кирпично-красного и красно-бурого и коричневого цвета. Изменение цветности и мутности воды в результате интенсивного цветения водорослей открывает широкие возможности для спутникового мониторинга экологического состояния водоемов, в первую очередь с помощью оптических сенсоров, предоставляющих информацию в видимом и ИК-диапазонах электромагнитного спектра.

Исследование динамики пространственно-временного распределения пятен «цветения» на Рыбинском водохранилище проводилось нами на основе спутниковых данных, полученных следующими сенсорами: TM Landsat-5, ETM+ Landsat-7, OLI Landsat-8, MERIS Envisat и ASAR Envisat.

Данные сенсоров спутников серии Landsat были получены из архива свободного доступа с сайта glovis.usgs.gov. На их основе строились цветосинтезированные изображения, пространственное разрешение которых составляло 30 м. Данные сенсоров MERIS и ASAR спутника Envisat были предоставлены Европейским космическим агентством в рамках нескольких научных проектов. Радиолокационные изображения имели пространственное разрешение 150 м, а цветосинтезированные изображения MERIS - 260 м.

Цветосинтезированные изображения видимого диапазона лучше всего могут быть использованы для выявления областей цветения цианобактерий. В периоды с длительной теплой, солнечной и безветренной погодой цианобактерии объединяются в агрегаты, которые всплывают к поверхности, образуя поверхностные или подповерхностные скопления. На спутниковых изображениях цианобактерии проявляются в виде ярких нитевидных полос (филаментов) или целых скоплений. Причем цвет этих пятен зависит от стадии развития водорослей: от ярко-зеленых до буровато-коричневых.

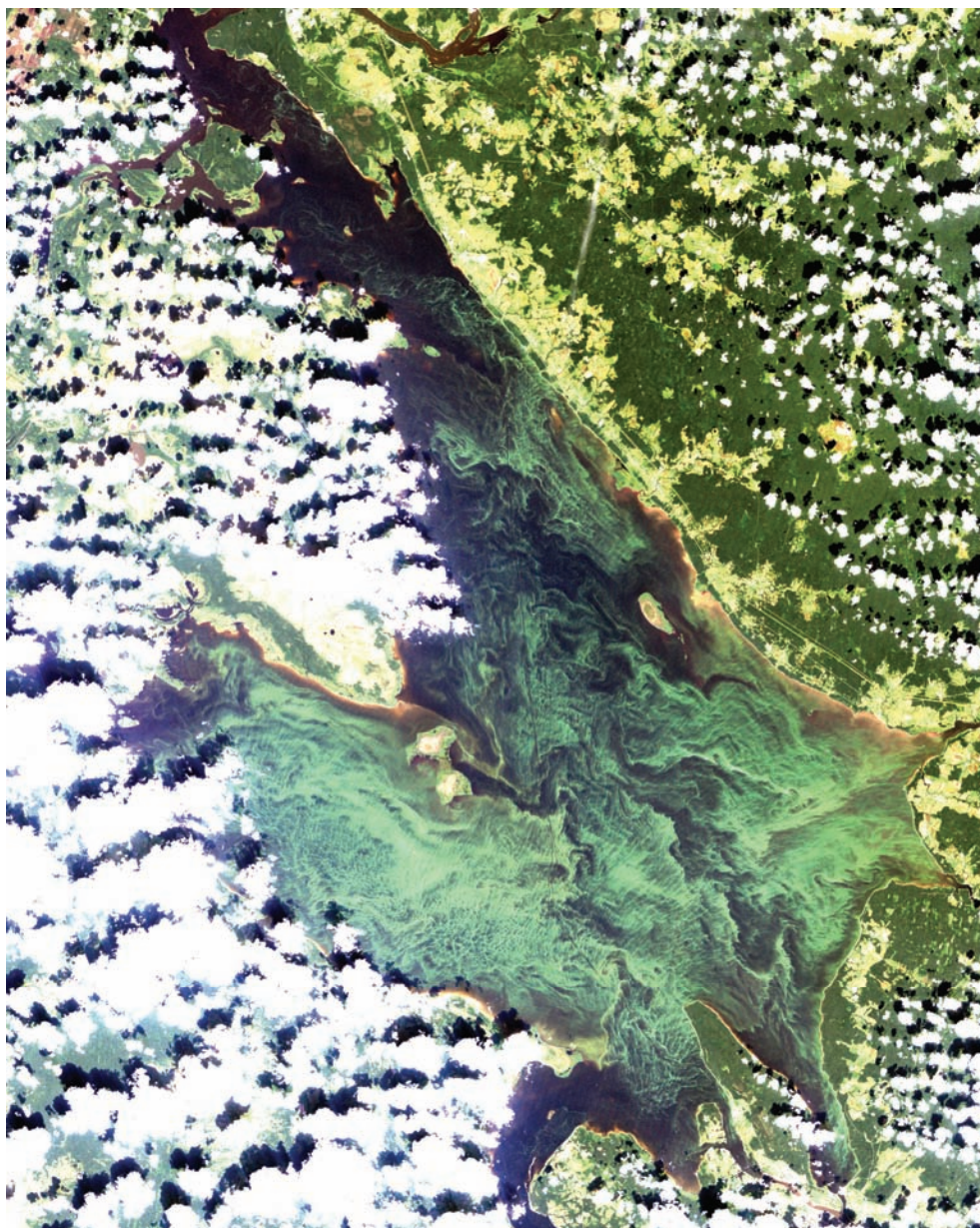


Рис. 3. Наиболее интенсивное цветение цианобактерий в Рыбинском водохранилище, 12.08.2000. Фрагмент изображения ETM+ Landsat-7 (3-2-1 каналы)

Нами были проанализированы все доступные архивные данные спутников серии Landsat, начиная с 1999 г. по настоящее время для мало облачных и безоблачных дней. Анализ показал, что цветение сине-зеленых водорослей наблюдалось каждый год, пик его приходился на конец июля – середину августа. Однако проявления интенсивности цветения на спутниковых изображениях видимого диапазона различались как по годам, так и по локализации. Судя по данным Landsat, наиболее интенсивное цветение цианобактерий наблюдалось в августе 2000 г. На изображении от 12 августа 2000 г. (рис. 3) хорошо видно, что цветение распространилось практически по всей акватории. Площадь, занимаемая водорослями составляла более 4 тыс. км². Менее интенсивное цветение было в северной части Моложского плеса и при впадении Волги в водохранилище. К концу месяца, судя

по данным ETM+ Landsat-7, площадь занятая водорослями, несколько уменьшилась, но незначительно. К районам, в которых практически во все года на спутниковых изображениях наблюдалось цветение сине-зеленых, можно отнести Главный и Шекснинский плёсы. Основными источниками загрязнения Шекснинского плеса являются комплексы объектов в районе г. Череповца, а именно:

- сточные воды городской канализации, поступающие через глубинный выпуск в русловую часть плёса;
- сточные воды промышленных предприятий Череповецка;
- поверхностные стоки сельскохозяйственных угодий.

Главный плёс - в отличие от остальных - озёровидный. Имеет глубоководную часть, мелководные прибрежные зоны и притоки рек Сить, Согожа, Ухра. В воде плёса содержится большое количество азота и фосфора, которые являются основным фактором, контролирующим развитие фитопланктона на всей акватории Главного плёса. Заметные колебания содержания биогенных элементов в летне-осенний период обусловлены также частым взмучиванием донных отложений в результате ветровых и стоковых течений.

Интенсивное цветение цианобактерий наблюдается вдоль главного фарватера, проходящего через Главный и Шекснинский плёсы. В период интенсивного цветения на спутниковых изображениях хорошо видны долгоживущие следы за судами. По всей видимости, дополнительное загрязнение, способствующее интенсификации цветения сине-зеленых, происходит вдоль судовых трасс. Кстати, одним из основных районов интенсивного цветения цианобактерий на Балтике является судовая трасса вдоль о. Готланд (Larova et al., 2014).

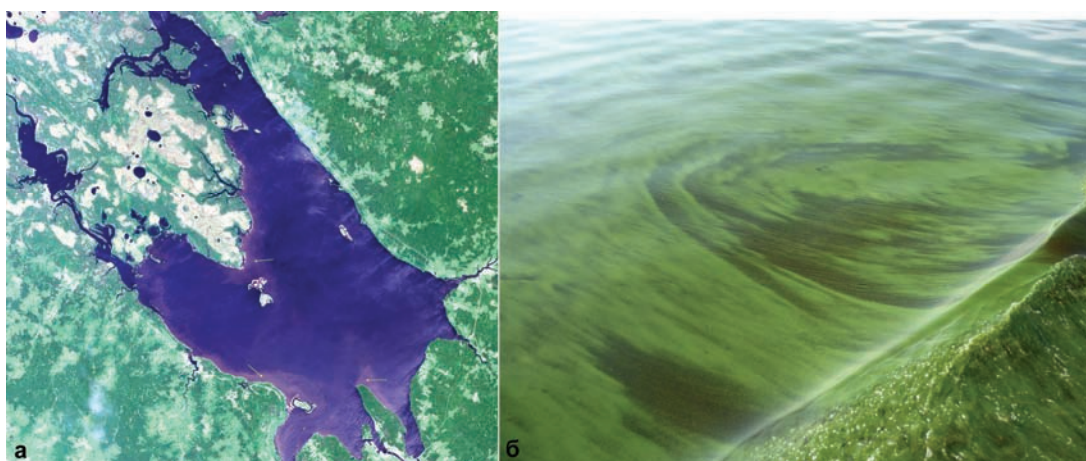


Рис. 4. Проявление цветения диатомовых водорослей на: а - цветосинтезированном изображении OLI Landsat-8 (4-3-2 каналы) от 05.06.2013. Стрелки указывают на области интенсивного цветения; б - фотографии от 24 июня 2013 г., сделанной с борта судна на станции Брейтово (фото Шендрик В.Д.)

Диатомовые водоросли, характерные для весеннего цветения, имеют совершенно другое проявление на изображениях видимого диапазона (рис. 4а). Они отображаются в виде областей более светлого тона, чем окружающая вода. Определить по цветосинтезированным изображениям проявления диатомовых водорослей значительно сложнее, поскольку схожие проявления могут быть связаны не только с цветением, а например, с выносом мутных вод рек, впадающих в Рыбинское водохранилище. На рис. 4б представлена фотография, сделанная с борта научного судна 24 июня 2013 на станции Брейтово во время интенсивного цветения диатомовых.

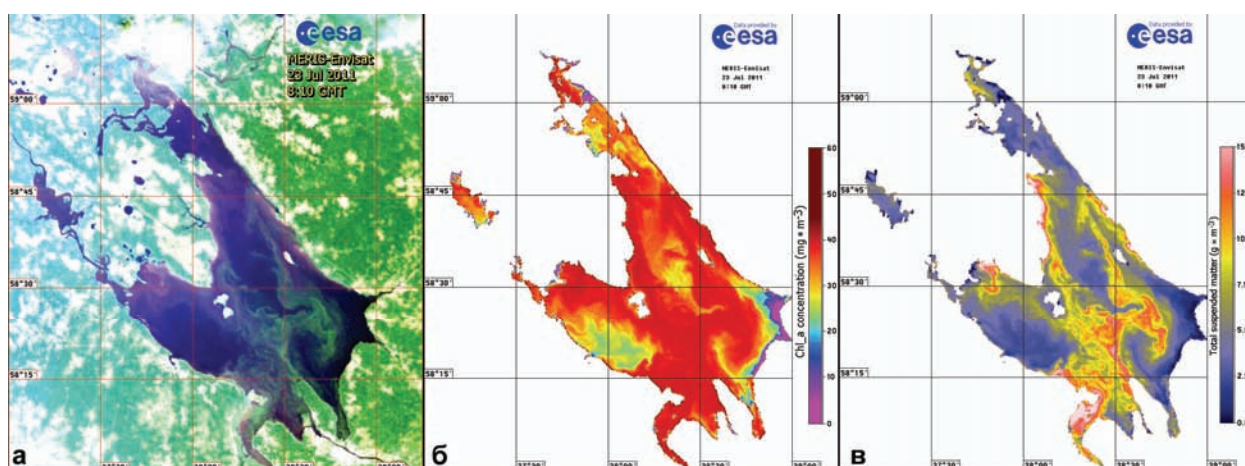


Рис. 5. Проявление цветения цианобактерий в данных MERIS Envisat от 23.07.2011: а – цветосинтезированное изображение (7-5-2 каналы); б – карта концентрации хлорофилла-а; в – карта интегрального количества взвешенного вещества

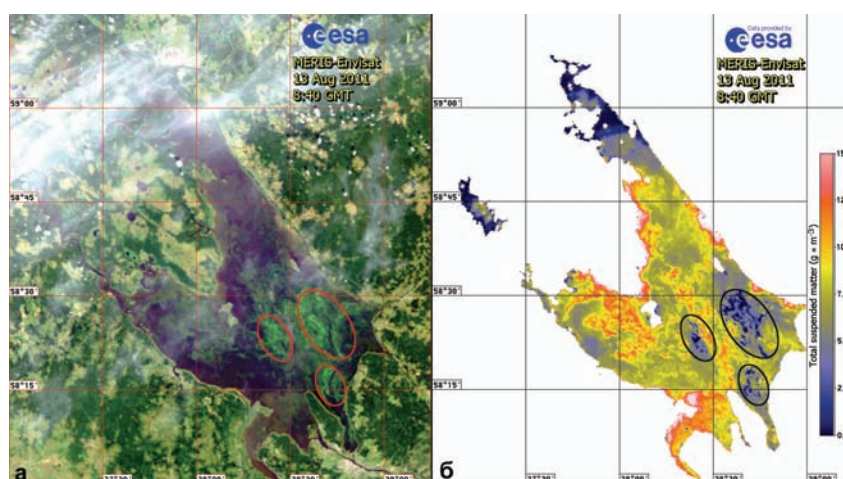


Рис. 6. Пример некорректного восстановления интегрального количества взвешенного вещества по данным MERIS Envisat от 13.08.2011 по стандартным алгоритмам (овалы)

Цветосинтезированные изображения Landsat и MERIS Envisat позволяют только качественно оценивать интенсивность цветения. Для оценки количественных характеристик на основе данных MERIS Envisat строились карты концентрации хлорофилла-а и ин-

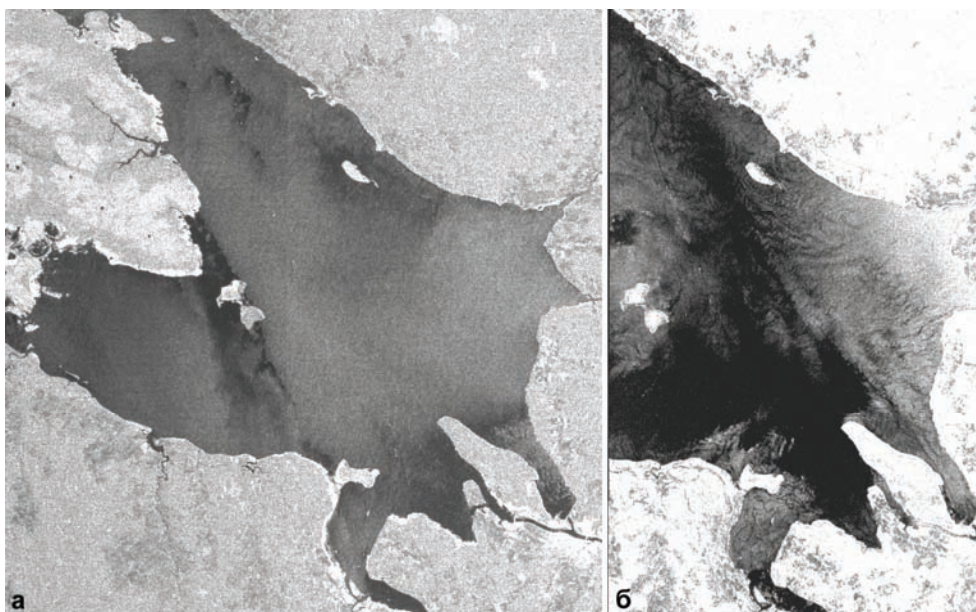
тегрального взвешенного вещества на основе стандартных алгоритмов, разработанных NASA (рис. 5). Как оказалось, стандартные карты концентрации хлорофилла-а не являются информативными с точки зрения выявления областей, подверженных интенсивному цветению водорослей во внутренних пресных водоемах, поскольку в летний период концентрация повышена практически во всем водохранилище. В то же время, на картах интегрального количества взвешенного вещества не только выявляются места цветения, которые соответствуют повышению этого параметра, но по ним достаточно точно можно определять биомассу водорослей. Это было подтверждено при отборе проб во время натурных измерений. Однако, при наличии «матов» цветущих сине-зеленых водорослей, стандартный алгоритм для выявления взвешенного вещества не работает, поскольку такие скопления уже не распознаются в качестве водного объекта. В качестве примера приведено цветосинтезированное изображение MERIS Envisat от 13 августа 2011г. и карта интегрального содержания взвешенного вещества, построенная на его основе (рис. 6). Обведенная овалом область соответствует проявлению интенсивного цветения на цветосинтезированном изображении (рис. 6а) и нулевому значению количества взвешенного вещества на соответствующей карте (рис. 6б).

К сожалению, использование оптических данных сильно ограничено из-за достаточно частой облачности, а в июле-августе 2010 г. еще и из-за смога во время лесных и торфяных пожаров. К тому же в архиве Landsat (glovis.usgs.gov) на период 1999 - 2007 г. данных, охватывающих район Рыбинского водохранилища, немного. Всего пригодных для выявления областей интенсивного цветения за весь период наблюдений (1999 – 2014 гг.) было получено, обработано и проанализировано 78 изображений Landsat-5/7/8.

Радиолокационные изображения позволяют получать информацию о водной поверхности при любых метеорологических условиях. Была предпринята попытка провести совместный анализ данных видимого диапазона и радиолокационных данных для Рыбинского водохранилища, как нами уже было проделано для Балтийского моря (Каримова, Лаврова и др., 2011). В нашем распоряжении было только 5 снимков ASAR Envisat от 15.06, 18.07, 19.07, 26.07, 14.08 2011 г. и 3 снимка SAR ERS-2 от 03.07, 19.07 2009 г., 18.06 2010 г.

Анализ показал, что лучше всего на радиолокационных изображениях проявляются в виде пятен пониженного рассеяния отраженного радиолокационного сигнала области, где интенсивно цветут диатомовые водоросли. Это связано, скорее всего, с тем, что скопления водорослей образуют так называемые маты, которые практически полностью гасят рябь. В качестве примера на рис 7а приведено РЛИ ASAR Envisat от 15.06.2011, на котором темные области соответствуют областям цветения диатомовых водорослей. Подтвер-

ждением того, что данные темные области действительно соответствуют цветению, а не являются областями ослабления ветра, может служить карта интегрального количества взвешенного вещества, построенная по данным MERIS Envisat от 12.06.2011, на которой четко видны увеличение количества взвешенного вещества в этих районах. При цветении сине-зеленых на РЛИ наблюдаются характерные слики, вызванные биогенными пленками (рис. 7б) (Лаврова и др., 2011). Однако, небольшое количество радиолокационных данных, имеющихся в нашем распоряжении, к тому же среднего разрешения, не позволяет сделать однозначный вывод о применимости спутниковых радиолокационных данных для выявления цветения водорослей.



*Рис. 7. Проявление цветения водорослей на радиолокационных изображениях:
а – темные пятна соответствуют областям цветения диатомовых водорослей (РЛИ ASAR Envisat от 15.06.2011); б – нитевидные слики, вызванные биогенными пленками отражают цветение цианобактерий (РЛИ SAR ERS-2 от 19.07.2009)*

Интересно отметить, что исходя из натурных измерений в июне, августе 2010 и 2013, результаты которых будут рассмотрены ниже, максимальное количество клеток цианобактерий и их биомасса были выявлены на станциях Наволок, Измайлово и Средний двор, которые находятся достаточно далеко от берега, тогда как на остальных станциях, которые располагаются вблизи берега, цианобактерий либо практически не выявлено, либо очень мало. Это свидетельствует о том, что прямого антропогенного влияния, как то смыв с полей, вынос загрязненных вод реками и речками на интенсивность цветения синезеленых не выявляется, не считая, конечно, влияния загрязнений г. Череповца. В то же время, цветение диатомовых наблюдается как раз вблизи берегов (рис. 4).

Было проведено также исследование влияния температуры воздуха на интенсивность цветения, определяемую по спутниковым данным. Как было сказано выше, наиболее сильное и обширное цветение наблюдалось в 2000 г. По данным многолетних наблюдений за термическим режимом Рыбинского водохранилища в период 1976-2008 г. максимальная температура воды в августе месяце 21,8⁰С была именно в 2000 г. (Литвинов, Законнова, 2012).

Результаты измерений *in-situ* в 2010 и 2013 гг.

Оценка таксономического состава сине-зеленых водорослей (цианобактерий) в Рыбинском водохранилище осуществлялась с помощью отбора проб воды на 6 наблюдательных станциях в стандартных рейсах, проводимых Институтом биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина. В данной статье приводятся результаты измерений, которые были выполнены 15 июня 2010 г., 10 августа 2010 г., 24 июня 2013 г. и 20 августа 2013 г. Отметим, что данные эксперименты были направлены на изучение именно сине-зеленых водорослей. Диатомовые водоросли в данных экспериментах не изучались. Станции располагались: в Главном плёсе - Наволок, Измайлово, Средний Двор, Брейтово; в Волжском плёсе - Коприно, Молога. Схема расположений станций наблюдений указана на *рис. 2*.

Для проведения количественного анализа цианобактерий использовалась поверхностная вода с глубины 0 - 2 м. Для количественного определения фитопланктона применялась стандартная методика, разработанная в Институте биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина. Определение биомассы цианобактерий велось стандартным объёмно-весовым методом.

При анализе проб воды на 6-ти станциях Рыбинского водохранилища были выделены следующие доминирующие в наблюдаемый период цианобактерии: *Aphanizomenon flos-aquae*; *Anabaena flos-aquae*; *Microsystes aureginosa*; *Microsystes wesenbergii*.

Полученные результаты позволили провести количественную оценку биомассы сине-зеленых водорослей, сравнительный анализ видового состава и уровня развития сине-зеленых водорослей на различных участках Рыбинского водохранилища в период спада биомассы (фаза «чистой воды») фитопланктона в июне 2010 и 2013 гг. и в период его максимального развития в августе 2010 и 2013 гг.

Анализ данных измерений *in-situ* показывает, что численность и биомасса цианобактерий в пробах за 15.06.2010 невелика на всех станциях. Таксономический состав цианобактерий в этот период беден, на всех станциях в основном выделяют два вида сине-

зеленых водорослей: *Aphanizomenon flos-aquae* и *Anabaena*. На станции Наволок не было обнаружено ни одного вида сине-зеленых водорослей.

10 августа 2010 года наблюдается значительный рост численности и соответственно биомассы цианобактерий. На станции Наволок отмечена самая высокая численность цианобактерий 265 900 тыс. кл. в 1 л., биомасса соответственно составила 13,5 мг/л. Отметим, что по данным MERIS Envisat были получены близкие значения (рис. 5). Как известно, лето 2010 г. характеризовалось продолжительным периодом аномально жаркой погоды в России в последней декаде июня - первой половине августа. Температура воды в Рыбинском водохранилище прогрелась до 26⁰С, что способствовало интенсификации цветения цианобактерий. Таксономический состав сине-зеленых водорослей в августе месяце стал шире, чем в июне и представлен 6-ю доминирующими видами: *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*, *Microcystis viridis*, *Anabaena spiroides*, *Microcystis holsatica*, *Aphanizomenon elenkinii*.

24 июня 2013 г. видовой состав цианобактерий был богаче, чем 15 июня 2010 г. Доминировало 6 видов сине-зеленых водорослей: *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*, *Microcystis wesenberge*, *Anabaena spiroides*, *Anabaena flos-aquae*, *Anabaena shermantsevae*. Максимальная численность сине-зеленых водорослей в этот день была обнаружена на станции Брейтово (6787 тыс. кл. в 1 л). При этом биомасса цианобактерий на всех станциях наблюдения превысила значения, полученные 15 июня 2010 г.

Результаты обработки проб воды Рыбинского водохранилища от 20 августа 2013 г., свидетельствуют о том, что по сравнению с 24 июнем 2013 г. на всех станциях наблюдалась большая численность цианобактерий, и соответственно, их биомасса. При этом максимальная численность и биомасса цианобактерий наблюдалась на станции Средний Двор, Наволок и прибрежных станциях Брейтово и Измайлово. В августе доминирующими видами сине-зеленых водорослей были: *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*, *Microcystis wesenberge*. Именно эти доминирующие виды сине-зеленых водорослей являются основными возбудителями «цветения» воды в Рыбинском водохранилище в летний период.

На рис. 8 (а-г) представлены графические материалы, свидетельствующие об уровне развития сине-зеленых водорослей на 6-ти станциях в июне и августе 2010 г. и 2013 г., позволяющие провести сравнительный анализ. Анализ показывает, что в июне и 2010 и 2013 г. цветение сине-зеленых водорослей было очень слабым, хотя и различающимся в эти годы (рис. 8а). В этот период происходит цветение диатомовых, которые не изучались в данных рейсах, но которые хорошо проявлялись как на радиолокационных изображениях (рис. 7а), так и на картах интегрального количества взвешенного вещества, построен-

ных по данным MERIS Envisat (рис. 5). Качественный анализ цветения воды, выполненный на станции Молога в июне 2013 г. с помощью планктонной сетки, свидетельствовал о наличии значительного количества диатомовых водорослей в пробах воды.

На рис. 8г графически показано распределение биомассы цианобактерий за июнь, август 2010 и 2013 гг. на 6-ти станциях наблюдений. Видно, что наибольшая биомасса цианобактерий 10 августа 2010 г. выявлена на станции Наволок (около 14 мг/л) и 20 августа 2013 г. на станции Средний Двор (около 6 мг/л).

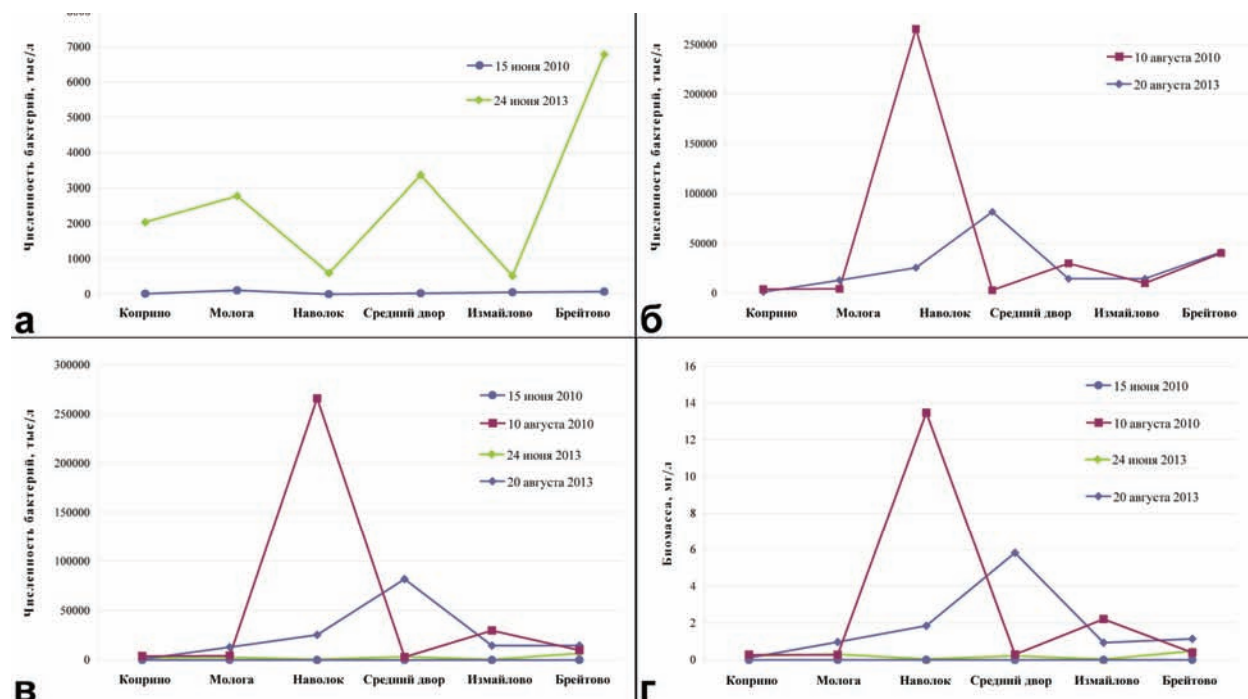


Рис. 8. Измеренные на 6-ти станциях количественные характеристики цианобактерий в Рыбинском водохранилище. Численность: а - июнь 2010 и 2013 гг.; б – август 2010 и 2013 гг.; в - июнь, август 2010 и 2013 гг.; г - биомасса июнь, август 2010 и 2013 гг.

Сравнение результатов спутниковых наблюдения и измерений in-situ

Для проведения совместного анализа спутниковой информации и натурных измерений было отобрано 6 спутниковых изображений Landsat, близкие по времени и полученные в малооблачную погоду. Сравнивались результаты измерений in-situ:

- 15.06.2010 с изображением ETM+ Landsat-7 от 21.06.2010;
- 10.08.2010 с изображением TM Landsat-5 от 31.07.2010;
- 24.06.2013 с изображениями OLI Landsat-8 от 05.06.2013 и ETM+ Landsat-7 от 29.06.2013;
- 20.08.2013 с изображениями OLI Landsat-8 от 08.08.2013 и OLI Landsat-8 от 09.09.2013.

Рассмотрим изображения, полученные 05.06.2013 OLI Landsat-8 и 29.06.2013 ETM+ Landsat-7 и сравним их с данными измерений с судна 24.06.2013. Характерных ярко-зеленых филаментов, которые соответствуют проявлениям сине-зеленых на первом снимке (рис. 4) не выявлено. На втором снимке от 29.06.2013, близком по времени к моменту измерений, отдельные проявления сине-зеленых уже наблюдаются, но в районе станций измерений их по-прежнему нет. О ничтожно малом количестве цианобактерий свидетельствуют и натурные измерения.

При сравнении измеренных параметров цианобактерий в пробах, взятых 20.08.2013, со цветосинтезированными изображения OLI Landsat-8 от 08.08.2013 и 09.09.2013 (более близких малооблачных данных не было) видно, что качественное совпадение имеет место (рис. 9). Области с ярко-зелеными филаментами, соответствующие интенсивному цветению бактерий занимают практически всю центральную часть Главного плёса, где и расположены станции Наволок, Средний Двор и Измайлово, на которых биомасса цианобактерий была повышена. К сожалению, более точного сравнения провести не удалось из-за наличия облачности на снимках августа и серьезным несовпадением по времени спутниковой съемки и измерений.

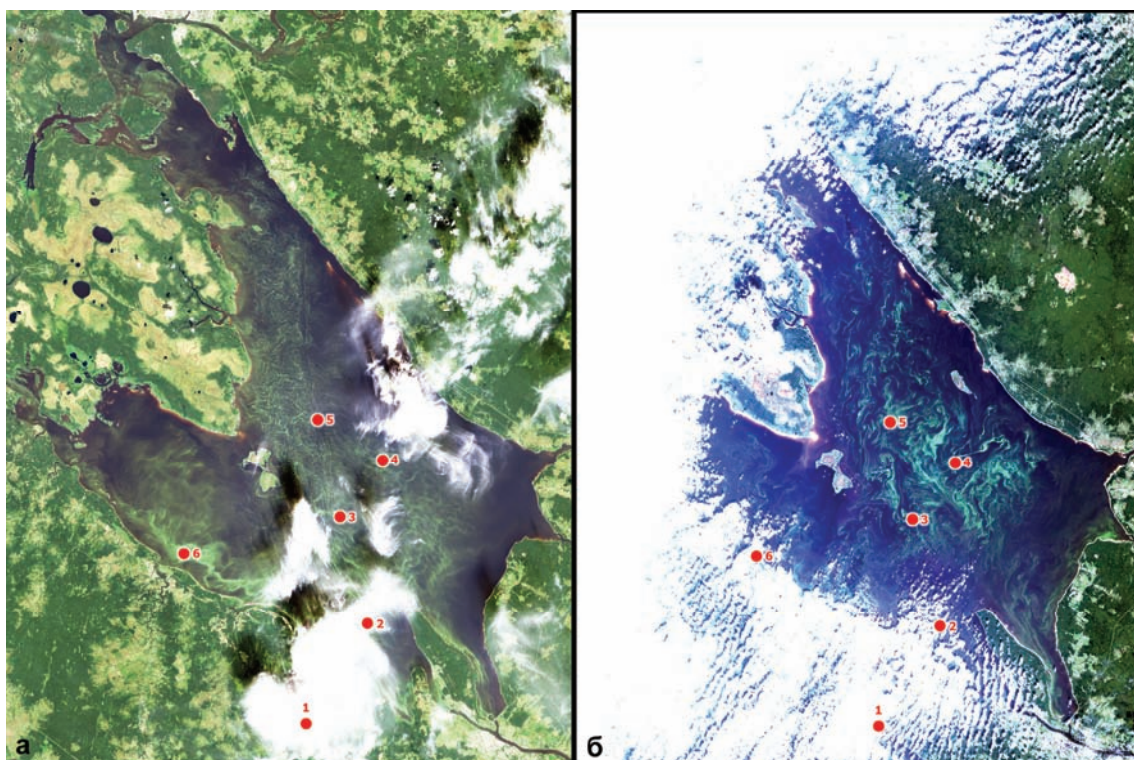


Рис. 9. Проявление цветения на изображениях OLI Landsat-8:
а - 08.08.2013; б - 09.09.2013.

Цифрами обозначены станции контактных измерений:

1 – Коприно; 2 – Молога; 3 – Наволок; 4 – Измайлово; 5 – Средний Двор; 6 – Брейтово

Заключение

Многолетний спутниковый мониторинг акватории Рыбинского водохранилища показал, что биогенное загрязнение, выражающееся в интенсивном цветении водорослей, наблюдается каждый год. Наибольшая интенсивность цветения диатомовых наблюдается вдоль берегов. Пик их цветения приходится на конец мая – первую половину июня. Цветению цианобактерий подвержен Главный плёс, особенно в его центральной части. Наблюдается межгодовая изменчивость интенсивности цветения сине-зеленых. Наибольшие площади занятые ими выявлены на спутниковых изображениях, полученных в августе 2000 и 2010 гг., когда прогрев воды был максимальным.

Данные сенсоров спутника Landsat, особенно OLI Landsat-8, наиболее подходят для выявления областей цветения цианобактерий и для качественной оценки его интенсивности. Для получения количественных характеристик на основе данных спутникового зондирования необходимо развивать региональные алгоритмы, поскольку стандартные алгоритмы не всегда пригодны для внутренних пресных водоемов.

На радиолокационных изображениях Рыбинского водохранилища лучше всего отображаются скопления диатомовых водорослей в виде темных пятен пониженного рассеяния. Интенсивное цветение сине-зеленых водорослей проявляется на радиолокационных изображениях в виде многочисленных сликов за счет наличия на поверхности воды биогенных пленок.

Попытка сравнения данных натурных измерений и спутникового зондирования показала, что измерения *in-situ* необходимо проводить синхронно со спутниковой съемкой. Желательно расширить сеть измерительных станций и проводить дополнительные измерения в тех местах, где на спутниковых изображениях наблюдается повышенное цветение.

Авторы надеются, что дальнейшая совместная работа, первый опыт которой представлен в данной статье, позволит получить новые интересные результаты.

Авторы выражают свою благодарность проф. Корневой Людмиле Генриховне (Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина) за помощь в проведении натурных измерений, их анализе и интерпретации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда в рамках гранта № 14-17-00555. Развитие методов дистанционной диагностики биогенных загрязнений внутренних водоемов проводилось при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта 13-05-97043 р_поволжье_а. Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проектов C1P.6342, C1P.5004, AОВЕ 2775 и C1P.1027.

Литература

1. Каримова С.С., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М. Наблюдение вихревых структур Балтийского моря с помощью радиолокационных и радиометрических спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. 2011. №5. С. 15–23.
2. Копылов А.И. Современное состояние экосистемы Рыбинского водохранилища. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. С. 1–254.
3. Корнева Л.Г., Минеева Н.М., Елизарова В.А. и др. Экология фитопланктона Рыбинского водохранилища. Тольятти: 1999. 264 с.
4. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 472 с.
5. Литвинов А. С., Законнова А. В. Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении // Метеорология и гидрология. 2012. № 9. С. 91–96.
6. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Особенности проявления на спутниковых радиолокационных изображениях корабельных следов в областях интенсивного цветения фитопланктона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т.11. № 3. С. 73–87.
7. Поддубный С. А. Комплексный метод верификации гидродинамических моделей. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1993. С. 47–64.
8. Ermakov S. A., Kapustin I. A., Lazareva T. N., Sergievskaya I. A., and N. V. Andriyanova. On the Possibilities of Radar Probing of Eutrophication Zones in Water Reservoirs // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2013. V. 49. No. 3. pp. 307–314.
9. Hansson M., Hakansson B. The Baltic Algae Watch System - a remote sensing application for monitoring cyanobacterial blooms in the Baltic Sea // Journal of Applied Remote Sensing. 2007. 1(1):011507.
10. Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R. Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability // Marine Ecology-Progress Series. 207. 343. P.15–23.
11. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu. Manifestation of ship wakes in satellite images in periods of intense algae bloom // Proc. of IEEE/OES Baltic Symposium 2014: Measuring and Modeling of Multi-Scale Interactions in the Marine Environment. Tallinn. 2014. 6 p.
12. Lavrova O., Karimova S., Mityagina M. Eddy activity in the Baltic Sea retrieved from satellite SAR and optical data // Proc. 3rd Intern. Workshop SeaSAR 2010. Ed.: ESA. 2010. Special Publication ESA-SP-679. 5 p.
13. Reinart A., Kutser T. Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 102(1-2). P. 74–85.

Satellite monitoring of harmful algae bloom in Rybinsk Reservoir

O.Yu. Lavrova¹, D.M. Soloviev², A.Ya. Storchkov¹, V.D. Shendrick³

¹Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow

²Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol

³Dubna International University for Nature, Society and Man, Dubna,
olavrova@iki.rssi.ru

The capabilities and limitations of using satellite remote sensing data to detect areas of intense algae bloom are investigated. The study region was the Rybinsk Reservoir, the satellite data were obtained by Landsat, Envisat ASAR and MERIS, and ERS-2 SAR. We conclude that the Landsat data are best suited for the detection of cyanobacteria blooms, while SAR data better reveal areas of intense diatom bloom. From Envisat MERIS data, chlorophyll-a concentration and total suspended matter maps were compiled to estimate the algae biomass. It is shown, that in cases of intense cyanobacteria bloom, when algae form dense clumps on the water surface, standard algorithms developed by NASA for Envisat MERIS data have important limitations. Satellite data analysis results were compared with ship measurement data obtained in June and August months of 2010 and 2013. A good qualitative agreement was demonstrated. The biogenic pollution state of the Rybinsk Reservoir was compared to that of the Baltic Sea.

Keywords: harmful algae bloom, cyanobacteria, diatoms, satellite observations, radar remote sensing, the Rybinsk Reservoir, the Baltic Sea, Landsat, Envisat.

References

1. Karimova S.S., Lavrova O.Yu., Solov'ev D.M., Nabljudenie vihrevykh struktur Baltijskogo morja s pomoshh'ju radiolokacionnyh i radiometricheskikh sputnikovyh dannyh (Observation of eddy structures in the Baltic Sea with the use of radiolocation and radiometric satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 5, pp.15–23.
2. Kopylov A.I., *Sovremennoe sostojanie jekosistemy Rybinskogo vodohranilishha* (The current state of the ecosystem of the Rybinsk Reservoir), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993, 254 p.
3. Korneva L.G., Mineeva N.M., Elizarova V.A., et al., *Jekologija fitoplanktona Rybinskogo vodohranilishha* (Phytoplankton ecology of the Rybinsk Reservoir), Tol'jatti, 1999, 264 p.
4. Lavrova O. Yu., Kostyanoi A. G., Lebedev S. A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex satellite monitoring of the Russian Seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 472 p.
5. Litvinov, A.S., Zakonnova, A.V. Termicheskij rezhim Rybinskogo vodohranilishha pri global'nom poteplenii (Thermal regime in the Rybinsk Reservoir under global warming), *Meteorologija i gidrologija*, 2012, No. 9, pp. 91–96.
6. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., Osobennosti projavlenija na sputnikovyh radiolokacionnyh izobrazhenijah korabel'nyh sledov v oblastjah intensivnogo cvetenija fitoplanktona (Radar manifestations of ship wakes in areas of intense phytoplankton bloom), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3. pp. 73–87.
7. Poddubnyi, S.A. *Kompleksnyj metod verifikacii gidrodinamicheskikh modelej* (Complex method of verification of hydrodynamic models), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993, pp. 47–64.
8. Ermakov, S.A., Kapustin I.A., Lazareva T.N., Sergievskaya I.A., and N.V. Andriyanova., On the possibilities of radar probing of eutrophication zones in water reservoirs, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013, Vol. 49, No. 3, pp. 307–314.
9. Hansson M., Hakansson B., The Baltic Algae Watch System - a remote sensing application for monitoring cyanobacterial blooms in the Baltic Sea, *Journal of Applied Remote Sensing*, 2007, 1(1):011507.
10. Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R., Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability, *Marine Ecology-Progress Series*. 2007, 343, pp.15–23.
11. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu., Manifestation of ship wakes in satellite images in periods of intense algae bloom, *Proc. of IEEE/OES Baltic Symposium 2014: Measuring and Modeling of Multi-Scale Interactions in the Marine Environment*, Tallinn, 2014. 6 p.
12. Lavrova O., Karimova S., Mityagina M., Eddy activity in the Baltic Sea retrieved from satellite SAR and optical data, *Proc. 3rd Intern. Workshop SeaSAR 2010*, 2010, Special Publication ESA-SP-679, 5 p.
13. Reinart A., Kutser T., Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 102(1-2), pp. 74–85.