

37. *MUNICH RE: NATHAN - world map of natural hazards* (2016), available at: https://www.munichre.com/site/corporate/get/documents/mr/assetpool.shared/Documents/0_Corporate%20Website/_Publications/302-05972_en.pdf (Accessed 22 February 2016).

38. *National Oceanic and Atmospheric Administration* (2016), available at: <http://www.noaa.gov> (Accessed 22 February 2016).

39. Middelmann M.H. (ed.) (2007), *Natural Hazards in Australia Identifying Risk Analysis Requirements*, Geoscience Australia, Canberra, Australia.

40. *United States Department of Agriculture* (2016), available at: <http://www.usda.gov> (Accessed 24 February 2016).

41. *United States Drought Monitor* (2016), available at: <http://droughtmonitor.unl.edu/MapsAndData/MapsandDataServices/MapService.aspx> (Accessed 23 February 2016).

42. *United States Geological Survey* (2016), available at: <http://www.usgs.gov> (Accessed 24 February 2016).

43. *USA National Weather Service* (2016), available at: <http://water.weather.gov> (Accessed 24 February 2016).

44. Shi P., Kasperson R. (ed.) (2015), *World Atlas of Natural Disaster Risk*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg and Beijing Normal University Press, Germany and China.

Поступила в редакцию: 04.04.2016

Сведения об авторе

Абдуллин Ринат Камилевич

аспирант кафедры картографии и геоинформатики Пермского государственного национального исследовательского университета; Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: rinaha-26@mail.ru

About the author

Rinat K. Abdullin

Postgraduate Student, Department of Cartography and Geoinformatics, Perm State University; 15, Bukireva Str., Perm, 614990, Russia; e-mail: rinaha-26@mail.ru

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Абдуллин Р.К. Современное состояние картографирования опасных гидрометеорологических явлений // Географический вестник = Geographical bulletin. 2016. № 3(38). С. 151–160. doi 10.17072/2079-7877-2016-3-151-160.

Please cite this article in English as:

Abdullin R.K. The current state of mapping hydrometeorological hazards // Geographical bulletin. 2016. № 3(38). P. 151–160. doi 10.17072/2079-7877-2016-3-151-160

УДК 556.51:528.8

А.В. Кутузов

ОПЕРАТИВНЫЙ СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ СКОПЛЕНИЙ ПЛАНКТОННЫХ ВОДОРОСЛЕЙ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ИХ ПЛОТНОСТИ

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, пос. Борок

Представлены результаты успешной количественной оценки биомассы фитопланктона («цветение» воды) на основе данных оперативной спутниковой съёмки – спутники AQUA/TERRA (MODIS) для наземных служб мониторинга. Данные нового спутника LANDSAT-8 (OLI), с более высоким пространственным разрешением (до 15–30 м/пиксель), использовались как вспомогательные при организации оперативных подспутниковых (судовых) измерений показателей качества воды. Исследования проводились на Ладожском и Псковско-Чудском озерах и в восточной части Финского залива. При разработке и апробации алгоритма оперативного определения фитопланктона использовались также архивные материалы спутниковой и подспутниковых измерений. По

результатам обработки имеющихся данных показан высокий уровень корреляции спутниковых данных высокого и низкого пространственного разрешения, что дает возможность использовать последние в суточном мониторинге фитопланктона. Разработанные предложения по системе оперативного дистанционного мониторинга позволяют значительно снизить необходимость трудоёмких контактных (судовых) измерений в допустимых погодных условиях для спутниковой фотосъёмки. Содержатся предложения по расширению использования высокотехнологичных продуктов отечественной и европейской космической отраслей.

Ключевые слова: количественная оценка, фитопланктон, ДЗЗ, ГИС, Landsat, Modis, дистанционное зондирование.

A.V. Kutuzov

OPERATIONAL SATELLITE MONITORING OF PLANKTON ALGAE ACCUMULATION AND QUANTITATIVE ESTIMATION OF THEIR DENSITY

I.D. Papanin Institute for biology of inland waters RAS, 152742, Borok

The results of the successful quantification of phytoplankton biomass ("blooming" of water) are presented, that being performed on the basis of operational satellite imagery - satellites AQUA / TERRA (MODIS), in the interests of land monitoring services. The images from the new satellite – LANDSAT-8 (OLI), with a higher spatial resolution (up to 15–30 m/pixel) than MODIS – were used additionally for taking operational shipboard measurements. Studies were carried out in the course of the project to build the system of operational environmental monitoring of Ladoga and Chudskoe (Peipsi) lakes and of the eastern part of Gulf of Finland, together with the Institute of Limnology RAS (St. Petersburg). Archive satellite and ground truth data were used for development and approbation of the algorithm of operational phytoplankton monitoring. Ground truth data from 61 stations of perennial monitoring were used in this work. Processing of the data available shows a high correlation between the satellite data of high and low resolution, which allows one to use the latter in daily monitoring of phytoplankton. The proposals developed for the operational remote monitoring system can significantly reduce the need for labor-intensive contact (ship) measurements under the acceptable weather conditions for satellite monitoring. The article contains proposals to increase the use of high-tech products of domestic and European space industry.

Keywords: quantitative estimation, phytoplankton, RSD, GIS, Landsat, Modis, remote sensing.

doi 10.17072/2079-7877-2016-3-160-168

Введение

Планктонные водоросли, вызывающие «цветение» воды и влияющие на её качество, особенно бурно развиваются вблизи берегов крупных водоёмов, где есть стоки вод, вызывающие повышенную эвтрофикацию водоёма. Фитопланктон оказывает непосредственное воздействие на качество питьевой воды: взвесь, цветность, токсичность; а при значительном развитии биомассы вызывает заморы рыб, нарушение работы очистных сооружений, загрязнение побережий и пляжей. Показатели количественного развития фитопланктона широко используются при определении трофического статуса водоемов и для принятия решений по экологической реабилитации водоёмов [11; 7]. Вместе с тем получение данных по состоянию фитопланктонного сообщества, а тем более актуальных данных – весьма трудоёмкий и затратный процесс.

Современные спутниковые снимки позволяют дистанционно осуществлять мониторинг на качественно ином уровне, дополняя и даже частично заменяя непосредственные полевые исследования. Таким образом, спутниковые данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивают полномасштабный и оперативный мониторинг состояния крупных водоёмов, а также распределение фитопланктона по всей акватории [5; 13]. Теоретические основы подобных исследований, их методические решения активно разрабатывались начиная с 80-х гг. XX в. [1; 3; 8; 12]. В последние годы эти наработки успешно применяются для глобального мониторинга продуктивности океана [2; 6], однако подавляющее большинство этих разработок относится к качественной оценке обилия фитопланктона и его пространственному распределению: в масштабах целых океанов и более масштабном уровне – зоны фитопланктонной продуктивности полушарий Земли (т.е. для территорий более 1 млн км²).

Цель настоящего исследования – разработка и апробирование алгоритма оперативного мониторинга масштабных скоплений планктонных водорослей – «фитопланктонных облаков» и методов количественной оценки их плотности на основе данных спутниковой съёмки. В ходе реализации проекта были решены следующие задачи.

1. Определены оптимальные характеристики спутниковых данных для оперативного обнаружения фитопланктона (свободно распространяемые). Были использованы снимки аппаратуры MODIS (спутники AQUA/TERRA) для оперативного мониторинга: не менее чем 1 снимок/сутки; аппаратуры OLI (спутник LANDSAT-8) – дополнительно и для апробации метода количественной оценки биомассы фитопланктона.

2. Разработан и обоснован метод получения количественных данных о плотности и распределении масс планктонных водорослей.

3. Определен алгоритм выбора оптимальных дат и участков подспутниковых измерений (т.е. синхронизированных со спутниковой съёмкой) с учётом сроков прохождения спутников над местом съёмки. Отработаны схема оперативного взаимодействия групп спутникового и подспутникового мониторинга, алгоритм передачи информации: по распределению и биомассе фитопланктона, по фронтам плотной облачности.

Материалы и методы исследования

В настоящем исследовании использованы данные подспутниковых (судовых) измерений концентрации фитопланктона на 39 станциях многолетних наблюдений оз. Ладога; 16 – на Псковском и Чудском озерах и 6 – в Финском заливе (восточная часть).

Для отобранных проб воды (ИНОЗ РАН) проводились стандартные гидробиологические описания и количественные измерения: станция; дата; горизонт; температура; взвешенные вещества, видимость белого диска. В лабораторных исследованиях определялись массовые виды фитопланктона в пробе воды (более 10% общей биомассы), количество хлорофилла «а», отмечались массовость отдельных видов – от 1 до 4 доминантных групп.

Самые распространённые массовые виды планктонных водорослей исследуемых водоёмов относятся к эврибионтной группе – криптофитовые водоросли (криptomonеды) (табл. 1). Внутри этой группы определение видов не проводилось.

Таблица 1

Массовые виды планктонных водорослей, более 10% общей биомассы, в исследуемых водоёмах

Группа	Виды
Синезеленые водоросли – Cyanophyta	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (L.) Rafls.
	<i>Woronichinia naegeliana</i> (Unger) Elenk.
Диатомовые водоросли – Bacillariophyta	<i>Aulacosira islandica</i> O. Müll.
	<i>Asterionella formosa</i> Hass.
	<i>Diatoma tenue</i> Ag.
	<i>Thalassiosira baltica</i> (Grun.) Ost.
	<i>Tabellaria fenestrata</i> (Lyngb.) Kütz.
	<i>Skeletonema subsalsum</i> (A. Cl.) Bethge
Криптофитовые водоросли – Cryptophyta	<i>Cryptophyta</i> sp.
Золотистые водоросли – Chrysophyta	<i>Dinobryon divergens</i> Imh.
Динофитовые водоросли – Dinophyta	<i>Gymnodinium fuscum</i> (Ehr.) Stein
Желто-зеленые водоросли – Xanthophyta	<i>Tribonema affine</i> West

Материалы спутниковой съёмки (ДЗЗ) низкого пространственного разрешения, полученные со спутников AQUA и TERRA (мультиспектральная аппаратура MODIS), обрабатывались на основе оценки отношения λ_1/λ_2 сигналов для длин волн $\lambda_1 \approx 440 \dots 490$ нм и $\lambda_2 \approx 520 \dots 560$ нм – «Индекс цвета» воды. Это связано с тем, что первый диапазон соответствует максимуму показателя поглощения хлорофилла «а», второй – его минимуму. Также хлорофилл «а» фитопланктона поглощает излучение в красной (около 675 нм) зоне спектра [1; 3; 8; 9].

Данные спектрорадиометра MODIS используются для оперативного мониторинга (до 4 раз в сутки), а данные спектрорадиометра OLI – для детального сопоставления с результатами подспутниковых измерений и как дополнительный источник данных. После проведения тематической обработки все полученные результаты, включая судовые измерения, экспортировались

в единый ГИС проект «Планктон», в котором проходил дальнейший анализ совмещённых подспутниковых и спутниковых данных (рис. 1).

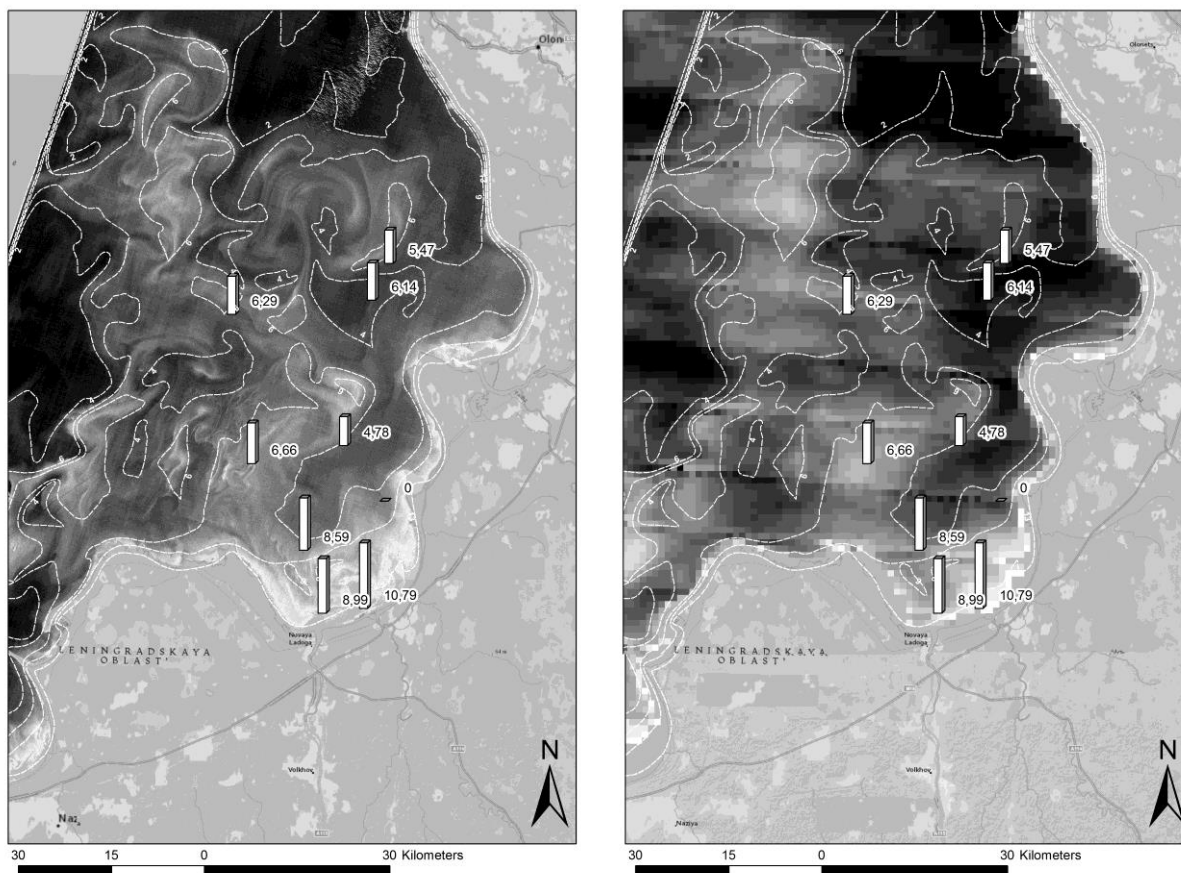


Рис. 1. Участок Ладожского озера, обследованный 4 августа 2013 г. (ГИС проект «Планктон»): слева – снимок спутника LANDSAT-8, справа – спутников AQUA / TERRA (подложка базовая топографическая карта). Столбчатые диаграммы и числа – концентрация фитопланктона по данным подспутниковых измерений.

Распределение фитопланктона и количественные показатели (столбчатая диаграмма).

Шкала индекса цвета: минимум – 0 максимум – 255



Расчёт коэффициента корреляции между полученным индексом цвета и данными судовых измерений проводился в стандартном математическом пакете LibreOffice Calc (также MSOffice Excel) (табл. 2, 3).

В ходе экспериментов по совмещённым измерениям (спутниковые и судовые) на судно оперативно передавались следующие данные: координаты, дата и время рекомендуемых промеров; качественная оценка биомассы, репрезентативность пробы (однородность распределения в диапазоне 30–1000 м для разных спутников от точки взятия пробы).

Результаты и их обсуждение

По концентрации хлорофилла «а» (3–12 мг/м³) рассматриваемые озёра могут быть отнесены к мезотрофным водоёмам [4].

Для Ладожского озера, при сопоставлении данных спутников AQUA/TERRA (MODIS) и LANDSAT-8 (OLI), получено принципиальное совпадение контуров «облаков» фитопланктона для обработанных данных ДЗЗ различного пространственного разрешения (1000м/пиксель MODIS и 30м/пиксель OLI) (рис. 1). При огрублении снимков LANDSAT-8 до 1000 м/пиксель степень совпадения этих контуров значительно возрастает. На рис. 1 показаны контуры автоматической векторизации (обрисовки) областей с разным уровнем концентрации хлорофилла «а» для огрублённого снимка LANDSAT-8. Количественные показатели для хлорофилла «а» в диаграммах приведены по данным пробы воды (судовые измерения).

Результаты обработки данных ДЗЗ Ладожского озера (спутники Aqua/Terra и Landsat-8) были ранжированы по возрастанию концентрации хлорофилла «а» (табл. 2). Значения яркости – относительные величины, так как абсолютные значения в каждом независимом наборе данных могут оказываться совершенно несопоставимыми и без специальной радиометрической калибровки и преобразований они не несут непосредственного физического смысла. Общий ход (градиент) измеренных величин концентрации хлорофилла «а» и полученных значений индекса цвета хорошо совпадает – высокий уровень корреляции.

Таблица 2

Результаты обработки снимков (MODIS) и натурные измерения по данным Ладожской экспедиции

№ станции	Chl-a, мг/м ³	Индекс цвета	Корреляция
<u>4</u>	<u>4,78</u>	<u>63</u>	0,876
<u>2</u>	<u>5,47</u>	<u>31</u>	
<u>1</u>	<u>6,14</u>	<u>20</u>	
5	6,29	76	
7	6,66	131	
6	8,59	120	
8	8,99	151	
9	10,79	201	

Примечание: за 4 августа ряды ранжированы по возрастанию концентрации хлорофилла «а» (Chl-a). Подчёркнуты несоответствия с общим ходом величин.

На основе разработанной методики в качестве апробации были проведены аналогичные работы для Псковско-Чудской озёрной системы (рис. 2).

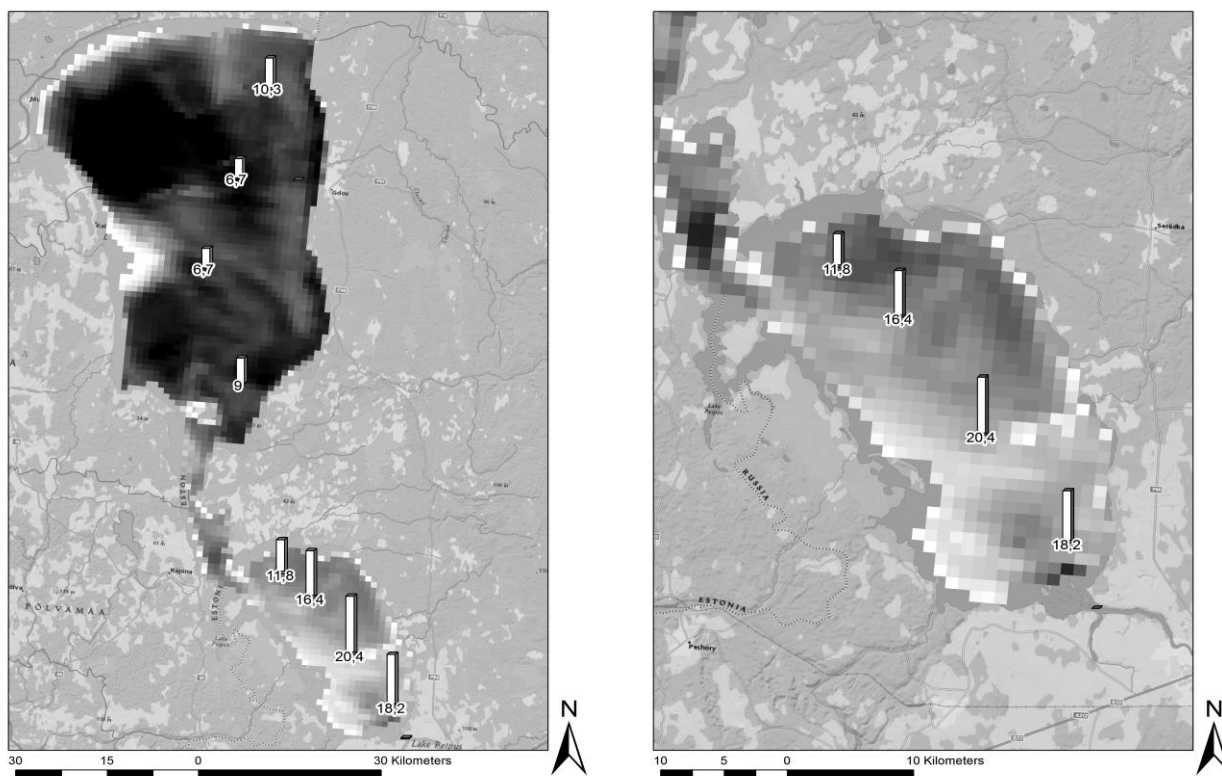


Рис. 2. Псковское озеро (слева) и Псковско-Чудская озёрная система (справа).

Снимки спутников AQUA/TERRA (подложка базовая топографическая карта). Пример распределения фитопланктона и количественные показатели (столбчатая диаграмма) на 13.09.2013 (ГИС проект «Планктон»).

Шкала индекса цвета: минимум – 0 максимум – 255



Полученные результаты обработки данных в ГИС сведены в табл. 3, где они ранжированы по рассчитанному индексу цвета.

Таблица 3

Ряды данных по результатам спутниковых изображений (MODIS – утренний и дневной снимки), подспутниковых измерений концентрации хлорофилл "а" (Chl-a) и коэффициент корреляция данных (13.09.2013)

N станций	Широта, град.	Долгота, град.	09-13ч Chl_a, мг/м ³	15-17ч Chl_a, мг/м ³	Индекс цвета	Коэффициент корреляция
1a	57,85898	28,15036	–	0,0	5	0,950
2a	58,75	27,55278	–	6,7	21	
3a	58,6	27,48333	–	6,7	57	
4a	58,9	27,61667	–	10,3	77	
5a	58,41561	27,60925	–	9,0	78	
6a	58,11217	27,76756	11,8	–	143	
7a	58,07631	27,85528	16,4	–	161	
8a	57,90883	28,10489	18,2	–	168	
9a	57,98833	27,97933	20,4	–	175	

Примечание: прочерки – отсутствие судовых измерений на данном озере.

Таким образом, для Псковского и Чудского озер также получен высокий коэффициент корреляции суммарно ранжированных в столбце «Индекс цвета» рядов данных.

В результате обработки данных ДЗЗ рассчитывается индекс цвета воды, который, в свою очередь, коррелирует с концентрацией фитопланктона. На основе оценки зависимости между индексом цвета и концентрацией фитопланктона данные ДЗЗ можно использовать для оперативного контроля состояния водоема. В приведённых примерах интерпретации данных показано, что разработанный метод количественной оценки универсален для всех рассмотренных водоёмов с различным гидрологическим режимом.

Разработки дистанционных методов количественного определения плотности и биомассы скоплений фитопланктона, обнаружения таких скоплений достаточно широко обсуждаются и предлагаются соответствующие решения. Полученные в данной работе результаты количественной оценки и анализа пространственного распределения позволяют в значительной степени заменить традиционные судовые измерения анализом данных ДЗЗ и одновременно на порядок увеличить количество определений этих экологических параметров акваторий. Упоминания о разработке методов непрерывного оперативного (в том числе суточного) мониторинга фитопланктона, которые здесь излагаются, редко встречаются в литературе.

Новый уровень качества и более широкий спектр возможностей может быть обеспечен использованием платных многоспектральных снимков более высокой актуальности и высокого пространственного разрешения. Такие данные могут быть весьма полезными и для ещё одного направления в дистанционных исследованиях – разработка методов дистанционного определения массовых видов в скоплениях фитопланктона, в частности, потенциально токсичных для человека *Aphanizomenon flos-aquae* и *Woronichinia naegelianana*. Перспективным в этом направлении видится использование снимков со спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства (ESA) – Sentinel-1A, 2A или аналогичных российских – корпорация «Роскосмос» («Ресурс-П», Ресурс-ДК1 и др.). На борту спутника «Sentinel-1» установлена радиолокационная станция (РЛС) с синтезированной апертурой/C-SAR, которая обеспечивает всепогодную спутниковую съёмку. Съёмка выполняется в C-радиодиапазоне (длина волны 6 см). Однако способы распознавания зон концентрации фитопланктона в радиодиапазоне мало разработаны: определение идёт в основном по косвенным признакам.

При сопоставлении пространственно-временных характеристик данных по концентрации хлорофилла «а», измеренных контактным и дистанционным способом, для корректного сравнения данных выяснилась необходимость учитывать следующие существенные моменты.

1. Космический снимок даёт картину полей распределения фитопланктона действительную только на момент съёмки, в это время отмечается максимальное совпадение данных подспутниковых измерений, производимых в течение дня.

2. Огрубление изображения аппаратурой может привести к пространственному смещению в пикселях зоны плотности «облака» фитопланктона, что может привести к расхождению с данными судовых измерений, проведённых на границе «фитопланктонного облака».

3. Следует отдельно учитывать и отдельно обрабатывать различные аномалии. Например, очевидные полосы инверсии – отражений: эффект «пилы» (от англ. saw effect) на изображении.

Данные снимка могут отличаться от полевых исследований, если:

- время забора проб сильно отличается от времени снимка,
- пробы взяты близ границ «облака» фитопланктона и время значительно отличается. Нужно учитывать, что данные снимка не точечные (как судовые замеры), а осреднены на площадь 1 км².

В ходе испытаний показано, что для повышения оперативности и качества совмещённых измерений (спутникового и подспутникового мониторинга) необходимо устанавливать оперативную обратную связь с участниками судовых исследований.

Наличие облачности более 10% сильно ограничивает возможность использования полученных спутниковых изображений для определения планктонных водорослей по данным ДЗЗ. Вместе с тем показано, что в оперативном мониторинге возможно использование и таких снимков путём определения и последующей обработки маски облачности и выделения участков с малой плотностью облаков.

Выводы

Разработан и обоснован новый метод мониторинга и получения количественных данных о плотности и пространственном распределении планктонных водорослей на основе «индекса цвета» воды.

По результатам обработки имеющихся данных показана высокая корреляция данных ДЗЗ высокого и низкого пространственного разрешения – между собой и с результатами судовых измерений, что позволяет использовать данные ДЗЗ низкого разрешения в суточном мониторинге фитопланктона.

Показан высокий уровень совпадения количественной оценки контактными методами: подспутниковые (судовые) измерения и дистанционные методы: спутниковые определения (концентрация и пространственное распределение фитопланктона).

Таким образом, разрабатываемые предложения по системе оперативного дистанционного мониторинга позволяют значительно снизить необходимость контактных (судовых) измерений в допустимых погодных условиях спутникового мониторинга.

Библиографический список

1. Буканова Т.В., Вазюля С.В., Копелевич О.В., Буренков В.И. и др. Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. №2. С. 64–73.
2. Виноградов М.Е., Шушкина Э.А., Ведерников В.И. Характеристика эпипелагических экосистем Тихого океана на основе спутниковых и экспедиционных данных. Первичная продукция и ее сезонные изменения // Океанология. 1996. Т. 36. №2. С. 241–249.
3. Ерлов Н.Г. Оптика моря. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 242 с.
4. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207 с.
5. Курузов А.В. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга систем «вода–суша» на равнинных водохранилищах (на примере Цимлянского водохранилища) // Исследование Земли из космоса. 2011. №6. С. 64–72.
6. 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.
7. Логинова Е.В., Лопух П.С. Гидроэкология: курс лекций. Минск: Изд-во БГУ, 2011. 300 с.
8. Оптика океана. Т.1. Физическая оптика океана / под ред. А.С. Монины. М.: Наука, 1983. 372 с.
9. Пелевин В.Н., Рутковская В.А. О классификации океанских вод по спектральному ослаблению солнечного света // Океанология. 1977. Т. 17. №1. С. 50–54.
10. Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер. Т.1. Гидрофизика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 276 с.
11. Сластина Ю.Л., Клочкова М.А. Сезонная динамика фитопланктона оз. Четырехверстного // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. С. 121–123.
12. Физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана / под ред. А.С. Монины. М.: Наука, 1978. 455 с.

13. Balyuk T.V., Kutuzov A.V., Nazarenko O.G. Ecotone system of the southeastern coast of the Tsimlyansk Reservoir // *Water Resources*. 2007. Vol. 34, part 1. P. 95–102.

14. Woźniak B., Krężel A., Darecki M., Woźniak S.B., Majchrowski R., Ostrowska M., Kozłowski Ł., Ficek D., Olszewski J., Dera J. Algorithm for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM) // *Oceanologia*. 2008. 50(4), part 1: Mathematical apparatus. P. 451–508.

References

1. Bukanova, T.V., Wasula, S.V., Kopelevich, O.V., Burenkov, V.I., Grigoriev, A.V., Khrapko, A.N., Sheberstov, S.V., Aleksandrov, S.V. (2011), “Regional'nye algoritmy otsenki kontsentratsii khlorofilla i vzvesi v yugo-vostochnoy Baltike po dannym sputnikovykh skanerov tsвета” [Regional algorithms for estimating concentration of chlorophyll and suspended matter in the South-Eastern part of the Baltic sea according to satellite colour scanners], *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, vol. 8, no. 2, pp. 64–73.

2. Vinogradov, M.E., Shushkina, E.A., Vedernikov, V.I. (1996), “Kharakteristika epipelagicheskikh ekosistem Tikhogo okeana na osnove sputnikovykh i ekspeditsionnykh dannykh. Pervichnaya produktsiya i ee sezonnye izmeneniya”. [Characteristics of epipelagic ecosystems of the Pacific ocean based on satellite and expeditionary data. Primary production and its seasonal changes]. *Okeanologiya* [Oceanology], vol. 36, no. 2, pp. 241–249.

3. Erlov, N.G. (1980), *Optika morya* [Marine Optics]: transl. from English., Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR.

4. Kitaev, S.P. (1984), *Ekologicheskie osnovy bioproduktivnosti ozer raznykh prirodnykh zon* [Ecological basis of biological productivity of lakes of different natural zones], Nauka, Moscow, USSR.

5. Kutuzov, A.V. (2011), “The use of remote sensing data to monitor the systems “water–land” in lowland reservoirs (on the example of the Tsimlyansk reservoir)”, *Issledovaniye Zemli iz Kosmosa* [Earth Research from Space], no. 6. pp. 64–72.

6. Lavrova, O.Yu., Soloviev, D.M., Strochkov, A.Ya. and Shendrik, V.D. (2014), “Satellite monitoring of intensive algae bloom in Rybinsk reservoir”, *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, vol. 11. no. 3. pp. 54–72.

7. Loginova, E.V. and Hoser C.P. (2011), *Gidroekologiya: kurs lekcij* [Hydroecology: a course of lectures]. BSU, Minsk, Belarus.

8. Monin, A.S.(ed.) (1983), “Physical optics of ocean”, *Optika okeana* [Ocean optics]. vol. 1. Nauka, Moscow, USSR.

9. Pelevin, V.N. and Rutkovskaya, V.A. (1977), “On the classification of ocean waters from spectral attenuation of solar light”, *Okeanologiya* [Oceanology], vol. 17, no. 1, pp. 50–54.

10. Pokazeev, K.V. and Filatov, N.N. (2002), “*Gidrofizika i ekologiya ozer*” [Hydrophysics and ecology of lakes], *Tom 1 Gidrofizika* [Vol. 1 Hydrophysics], Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

11. Slastina, Y.L. and Klochkova, M.A. (2011), “Seasonal dynamics of phytoplankton in the lake Chetyrehverstnoe”, *Water environment and spatial natural complexes: research, use, protection. Proceedings of the IV School conference of young scientists with international participation*, Karelian research center of Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia, pp. 121–123.

12. Monin, A.S (ed.) (1978), “*Fizika okeana*” [Physics of the ocean], *Tom 1 Gidrofizika okeana* [Vol. 1 Hydrophysics of the ocean], Nauka, Moscow, USSR.

13. Balyuk, T.V., Kutuzov, A.V. and Nazarenko, O.G. (2007), “Ecotone system of the southeastern coast of the Tsimlyansk Reservoir”, *Water Resources*, MAIK Nauka/Interperiodika, vol. 34, pt. 1, pp. 95–102.

14. Woźniak, B., Krężel, A., Darecki, M., Woźniak, S.B., Majchrowski, R., Ostrowska, M., Kozłowski, Ł., Ficek, D., Olszewski, J., Dera, J. (2008), Algorithm for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM), “*Oceanologia*” [Oceanology], 50(4), part 1: Mathematical apparatus, pp. 451–508.

Поступила в редакцию: 13.05.2016

Кутузов Алексей Валерьевич

научный сотрудник Института биологии
внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН;
Россия, 152742, Ярославская обл.,
Некоузский р-н, пос. Борок;
e-mail: kutuzov-st@yandex.ru

Alexey V. Kutuzov

Researcher, I.D. Papanin Institute for Biology of
Inland Waters RAS;
Borok, Nekouz district, Yaroslavl region, 152742,
Russia;
e-mail: kutuzov-st@yandex.ru

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Кутузов А.В. Оперативный спутниковый мониторинг скоплений планктонных водорослей и количественная оценка их плотности // Географический вестник = Geographical bulletin. 2016. № 3(38). С. 160–168. doi 10.17072/2079-7877-2016-3-160-168

Please cite this article in English as:

Kutuzov A.V. Operational satellite monitoring of plankton algae accumulation and quantitative estimation of their density // Geographical bulletin. 2016. № 3(38). P. 160–168. doi 10.17072/2079-7877-2016-3-160-168