НАУКА ЮГА РОССИИ 2017 Т. 13 № 4 С. 71–82 SCIENCE IN THE SOUTH OF RUSSIA 2017 VOL. 13 No 4 P. 71–82

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 504.45:528.88 DOI: 10.23885/2500-0640-2017-3-4-71-82

СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА И УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ ДОНА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

© 2017 г. Б.Л. Сухоруков^{1, 2}, В.В. Сапрыгин³, Н.В. Решетняк², С.В. Бердников⁴

Аннотация. Апробированы методы оперативного дистанционного контроля состояния водной среды Таганрогского залива и устьевой области Дона, основанные на анализе формы спектров коэффициентов спектральной яркости (СКСЯ) восходящего от воды излучения (reflectance). Выполнены дистанционные спектрометрические съемки устья р. Дон и Таганрогского залива Азовского моря с борта судна совместно с отбором проб воды на лабораторный анализ в различные гидрологические фазы. Приведены СКСЯ видимого диапазона длин волн (420-750 нм) мартовской и июньской съемок 2016 г. В марте форма СКСЯ свидетельствует об относительно однородном распределении фитопланктона по акватории западной части залива (за исключением зоны затока речных вод) при высоком содержании в водном объекте хлорофилла а фитопланктона от 33 до 65 мг/м³ и об отсутствии массового развития сине-зеленых микроводорослей. В июне концентрация хлорофилла а фитопланктона менялась в широких пределах в диапазоне от 5 до 175 мг/м³ и трофический статус экосистемы в различных частях залива изменялся от мезотрофного до эвтрофно-полиэвтрофного, причем на большинстве станций отмечено появление сине-зеленых микроводорослей. Параллельно трофический статус оценен по результатам определения концентрации хлорофилла а и фикоцианина фитопланктона по биооптическим моделям, взятым из литературы, а также по результатам определений, выполненных стандартным аналитическим методом в пробах воды. Показано, что данные спектрометрических съемок позволяют в реальном времени оценивать состояние водного объекта, его трофического статуса и служат основой для детального химико-биологического обследования водного объекта.

Ключевые слова: спектрометрия, коэффициент спектральной яркости, хлорофилл *a*, фикоцианин, трофность, оперативный контроль, Таганрогский залив, Дон.

ASSESSING THE STATE OF TAGANROG BAY AND DON ESTUARY ECOSYSTEM USING REMOTE SENSING DATA

B.L. Sukhorukov^{1, 2}, V.V. Saprygin³, N.V. Reshetnyak², S.V. Berdnikov⁴

Abstract. The methods of aquatic environment remote near real-time monitoring based on water leaving reflectance spectra shape analysis were tested in Taganrog Bay and Don Estuary. Remote spectrometric surveys of Don Estuary and Taganrog Bay of the Sea of Azov along with water sampling for laboratory analysis were carried out on board of research vessel during various hydrologic periods. We present visible reflectance spectra (420–750 nm) acquired in March and July, 2016. According to shapes of reflectance spectra acquired in March, phytoplankton was distributed quite uniformly in eastern part of the bay (excluding river inflow zone), while its chlorophyll a concentration was rather high and varied from 33 to 65 mg·m⁻³ and cyanobacterial blooms

¹ Гидрохимический отдел Института водных проблем РАН (Hydrochemical Division of Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 198

² Гидрохимический институт (Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 198

³ Институт аридных зон Южного научного центра Российской академии наук (Institute of Arid Zones, Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41

⁴ Южный научный центр Российской академии наук (Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: berdnikov@ssc-ras.ru

did not happen. In June chlorophyll *a* concentration varied in wide range of $5-175 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, ecosystem trophic state in different parts of the bay changed from mesotrophic to eutrophic–polyeutrophic (hypereutrophic) and cyanobacteria were observed on most stations. This trophic state assessment was validated by phytoplankton chlorophyll *a* and phycocyanin concentrations estimated applying published biooptic algorithms to reflectance spectra and chlorophyll *a* concentration estimated by common spectrophotometric technique in water samples. In conclusion we state that spectrometric surveying allows for near real-time assessment of water body state, its trophic state and serves as a basis for detailed chemical-biological monitoring of water bodies.

Keywords: spectrometry, reflectance, chlorophyll *a*, phycocyanin, trophic state, NRT monitoring, Taganrog Bay, Don.

ВВЕДЕНИЕ

Для контроля состояния водных экосистем эффективными являются дистанционные, неразрушающие, исключающие воздействие зонда на объект методы наблюдения, основанные на интерпретации спектрометрической информации, получаемой в различных областях электромагнитного спектра, прежде всего в диапазоне длин волн от 400 до 710 нм.

Восходящее от подстилающей поверхности трансформированное солнечное излучение является естественной результирующей процесса энерго-массообмена, происходящего на Земле, и, следовательно, спектры яркости несут в себе объективную информацию о состоянии экосистемы планеты.

Интерпретация спектрометрической информации видимого диапазона электромагнитного спектра заключается в нахождении связи между излучательными свойствами отдельных элементов экосистемы и концентрацией (общепринятой величиной оценки материальных процессов) тех из них, которые изменяют комплексный показатель преломления подстилающей поверхности. Наиболее успешно удается найти связь между этими характеристиками в том случае, когда изучаемые компоненты селективно поглощают и (или) рассеивают в относительно узких спектральных диапазонах.

Механизм формирования спектров коэффициентов спектральной яркости (СКСЯ) хорошо изучен. Минеральные частицы ответственны за неселективное рассеяние солнечного света. Поглощение в видимой области спектра обусловлено различными пигментами фитопланктона. В синей области неселективно поглощает растворенное органическое вещество, а в оранжевой (около 630 нм) – специфичный для сине-зеленых водорослей фикоцианин.

При изучении водных экосистем по соотношению восходящего излучения в отдельных диапазонах видимого спектра удается с хорошей точностью получать оценки концентрации биологических компонентов экосистемы, в частности содержание хлорофилла
 $a~(\mathrm{C}_{_{\mathrm{XЛa}}})$ [1] и фикоцианина ($\mathrm{C}_{_{\mathrm{ФII}}})$ [2] фитопланктона в мутных продуктивных водах. Появляются работы, где по форме СКСЯ оценивают видовой состав фитопланктона [3], интегральное состояние водной экосистемы [4; 5]. Подобные оценки могут быть получены как при выполнении судовых наблюдений (нижний уровень), так и со спутника (верхний уровень) после корректного учета воздействия атмосферы на регистрируемый сигнал. Интегральную оценку состояния водных объектов возможно выполнять по данным либо гиперспектральной аппаратуры, либо мультиспектральной со специально изготовленными каналами (например сканер цвета OLCI на борту Sentinel-3).

В качестве объекта изучения выбрана экосистема устья р. Дон и Таганрогского залива Азовского моря. Предмет изучения – СКСЯ этого водного объекта.

Общая протяженность выбранного участка составляет до 150 км по оси залива, ширина до 30 км, глубина до 10 м. На этом участке хорошо заметно и влияние речного стока, и заток морских вод. Соленость изменяется в интервале 0-10 ‰, концентрация общей взвеси до 120 г/м³, хлорофилла *а* до 150 мг/м³. Это удобный полигон для комплексной отработки различных методов и технологий изучения продуктивности вод второго типа с применением контактных аналитических и дистанционных (спектрометрических и спутниковых) методов измерения различных параметров состояния водных экосистем.

На этом участке значительны изменения уровня воды, связанные со сгонно-нагонными про-



Рис. 1. Схема станций (названия станций, выполненных в марте, начинаются с «м», в июне – с «и»). **Fig. 1.** Stations scheme (names of stations made in March begin with 'м', in June – with 'и').

цессами. Наибольшие значения сгонно-нагонных колебаний в Таганрогском заливе составляют в районе Таганрога 6 м, Ейска 4,4 м. В устье Дона уровень воды может изменяться более чем на 6 м.

Цель работы заключалась в апробации методов оперативного дистанционного контроля состояния водной среды Таганрогского залива и устьевой области Дона, основанных на анализе формы спектров коэффициентов спектральной яркости восходящего от воды излучения (reflectance).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили во время двух экспедиций на научно-исследовательском судне «Профессор Панов» Южного научного центра РАН в марте и июне 2016 г. на 50 станциях в Таганрогском заливе и дельте Дона, в основном в зоне смешения речных и морских вод (рис. 1).

Спектры яркости и коэффициента спектральной яркости получали с помощью портативного малогабаритного спектрометра S41 производства фирмы «SolarLS». Спектральный диапазон прибора 389–808 нм, спектральное разрешение 1,8 нм, яркость восходящего от воды излучения одновременно регистрируется в 512 каналах с помощью многоканального детектора фирмы «Hamamatsu». Диспергирующий элемент – дифракционная решетка. Перед объективом спектрометра расположена трубка Гершуна (коллиматор со сменными насадками, позволяющими реализовать угловое расхождение объектива от 1 до 14°).

Последовательность проведения спектрометрических измерений изложена в работе [6]. Съемку проводили в дневное время. Первичную спектрометрическую информацию считали пригодной для дальнейшей обработки в том случае, когда для эталона отношение яркости, измеренной при длине волны 665 нм, к яркости, измеренной при длине волны 533 нм, находилось в диапазоне 0,5–0,55. Для исключения случайных погрешностей в съемке каждый спектр восходящего излучения и эталона снимали не менее 5–7 раз.

Синхронно с проведением спектрометрической съемки непосредственно с участка водного объекта, попадающего в поле зрения спектрометра, с глубины около 0,5 м отбирали пробы воды. Фильтрование проб для последующего определения С_{хла} и фиксацию проб для определения состава фитопланктона проводили во время перехода между станциями.



Рис. 2. Нормированные на площадь под кривой СКСЯ, сгруппированные по категориям II–V (съемка 28–30 марта 2016 г. в соответствии с таблицей 1), в сравнении с СКСЯ, полученными в марте 2014 г. и в апреле 2016 г. на р. Дон ниже г. Ростова-на-Дону. Показаны спектральные особенности категорий согласно работе [4].

Fig. 2. Reflectances normalized to area under plot and grouped by categories from II to V (survey made on 28–30th of March 2016, in accordance with Table 1) in comparison with reflectances, aquired in March 2014 and in April 2016 on river Don downstream Rostov-on-Don. The spectral features of categories are shown according to [4].

Фильтры подсушивали, укладывали в чашку Петри и помещали в морозильную камеру для последующего анализа в лабораторных условиях.

Анализ видового состава фитопланктона проводили стандартными гидробиологическими методами. Для количественного учета планктонных водорослей пробы просматривали в камере Нажотта (0,1 см³) при увеличении ×200 и ×400. Для подсчета численности и биомассы планктонных микроводорослей использовали известные формулы [7].



Рис. 3. Нормированные на площадь под кривой СКСЯ, сгруппированные по категориям II–VI (съемка 28–30 июня 2016 г. в соответствии с таблицей 1), в сравнении с СКСЯ, полученными в июле 2016 г. на р. Дон ниже г. Ростова-на-Дону. Показаны спектральные особенности категорий согласно работе [4].

Fig. 3. Reflectances normalized to area under plot and grouped by categories from II to VI (survey made on 28–30th of June 2016, in accordance with Table 1) in comparison with reflectances, aquired in July 2016 on river Don downstream Rostov-on-Don. The spectral features of categories are shown according to [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На 50 станциях (рис. 1) получено более 300 спектров яркости восходящего излучения, по которым рассчитывали СКСЯ (рис. 2, 3). Рассмотрим, какую информацию о состоянии изучаемого водного объекта можно получить, используя различные методы интерпретации спектрометрических данных (табл. 1):

1) экспертный экспресс-метод оценки состояния водного объекта [4; 5; 8];

НАУКА ЮГА РОССИИ 2017 Том 13 № 4

 стандартный аналитический метод [9] определения С_{хпа} и видового состава фитопланктона;

3) расчетный метод по биооптической модели
(1) для оценки С_{хла} по [10]:

$$C_{XJa} = [(\rho_{708} / \rho_{665}) \times 35,75 - 19,30]^{1,124}; \qquad (1)$$

расчетный метод по биооптической модели
для оценки С_{фі} по [11]:

$$C_{\Phi II} = \left[\left(\rho_{629}^{-1} - \rho_{659}^{-1} \right) \times \rho_{724} \right] \times 476,33 + 96,16, \quad (2)$$

где ρ_{λ} – КСЯ на длине волны λ .

Перечисленные данные и СКСЯ для каждой станции отдельно представлены также на странице http://atlas.ssc-ras.ru/corgbook/biogene/trof.html [12].

В марте, используя экспертный экспресс-метод, получен следующий результат. По мере движения из устья р. Дон в залив СКСЯ изменяются от II категории до IV (рис. 4, врезка). СКСЯ II категории отмечены на станциях м4р, м3р, м1. СКСЯ III категории – на станциях смешения вод р. Дон и залива, а также м39 и м23, V категории на станциях м9, м16 и м34. На большинстве станций (14 из 24) зарегистрированы СКСЯ IV категории. По форме этих СКСЯ Таганрогский залив как водный объект относится к эвтрофному типу, хотя отмечаются участки и олиготрофно-мезотрофного типа с $C_{\rm XЛa}$ до 10 мг/м³ или, наоборот, эвтрофно-полиэвтрофного типа с $C_{\rm XЛa}$ более 60 мг/м³. Но при этом отсутствие минимума в СКСЯ на 630 нм указывает на отсутствие в фитопланктоне микроводорослей, содержащих фикоцианин, или малое количество сине-зеленых микроводорослей [13–15]. Такая форма СКСЯ типична и для экосистемы р. Дон, впадающей в Таганрогский залив и питающей его в этот гидрологический сезон (рис. 2).

Подчеркнем, что такое заключение можно сделать непосредственно во время проведения спектрометрической съемки, в реальном времени, только по форме СКСЯ.

Используя метод, основанный на биооптических моделях, получаем следующие оценки C_{xJIa} и $C_{\Phi IL}$ Низкие значения C_{xJa} (14–18 мг/м³) отмечены на станциях м3р, м4р в дельте Дона и на станциях м1 и м2 в месте впадения речных вод в залив. При этом $C_{\Phi II}$ находится в диапазоне 63–74 мг/м³.



Рис. 4. Изменение состояния экосистемы Таганрогского залива и устьевой области Дона в марте (на врезке) и июне 2016 г. по оценкам, полученным разными методами (табл. 1): 1 – станция; 2 – категория; 3 – граница зон разных категорий; 4 – концентрация хлорофилла *a*, рассчитанная по формуле (1) (высота столбика соответствует 30 мг/м³); 5 – концентрация фикоцианина, рассчитанная по формуле (2) (высота столбика соответствует 60 мг/м³).

Fig. 4. Variance of Taganrog Bay and Don estuary ecosystem state in March (in inset) and June 2016, estimated using various techniques (Table 1): 1 -station; 2 -category; 3 -border between zones of different categories; 4 -chlorophyll *a* concentration calculated using (1) (column height corresponds to 30 mg/m³); 5 -phycocyanin concentration calculated using (2) (column height corresponds to 60 mg/m³).



Рис. 5. Связь между категориями СКСЯ и аналитическими оценками $C_{XЛa}$ в марте (*a*) и июне (*б*) 2016 г. в соответствии с таблицей 1; 1 – категория СКСЯ, 2 – $C_{XЛa}$. Fig. 5. Reflectance categories related to chlorophyll *a* concentrations estimated analytically in March (*a*) and June (*б*) 2016, in accordance

Fig. 5. Reflectance categories related to chlorophyll *a* concentrations estimated analytically in March (*a*) and June (*b*) 2016, in accordance with Table 1; 1 - reflectance category, 2 - chlorophyll *a* concentration.

В воде залива, исключая районы затока речных (станции м3, м8, м11) и морских (м39) вод, наоборот, $C_{\chi_{\Lambda a}}$ изменяется в пределах 40–70 мг/м³, тогда как $C_{\Phi II}$ при этом не превышает 30 мг/м³. На станциях м31 и м34, расположенных вблизи песчаной банки, наблюдаются аномально высокие значения $C_{\chi_{\Lambda a}}$, а $C_{\Phi II}$ имеет отрицательные значения.

В таблице 1 отмечены отрицательные значения $C_{\phi II}$ что свидетельствует о несовершенстве биооптической модели [10], разработанной для фитопланктона прудов аквакультуры, где $C_{\phi II}$ достигало 3000 мг/м³. На СКСЯ промежуточный максимум при таких $C_{\phi II}$ находится в области длин волн около 655 нм. В СКСЯ пресноводных экосистем этот максимум находится на длине волны около 650 нм, и использование в модели длины волны 659 нм дает заниженные и не совсем корректные результаты.

Результаты анализа данных спектрометрической съемки Таганрогского залива в июне 2016 г. совместно с результатами аналитических определений отражены на рисунке 4. Форма СКСЯ, представленных на рисунке 3, показывает большое разнообразие состояний экосистемы Таганрогского залива. Отмечены состояния от олиготрофно-мезотрофного (категория II на станции и18) до гиперэвтрофного (категория VI на станциях и52 и и54). Причем, в отличие от результатов съемки в марте, минимум в СКСЯ на длине волны 630 нм в большинстве СКСЯ указывает на проявление в СКСЯ поглощения фикоцианина и появление сине-зеленых микроводорослей.

НАУКА ЮГА РОССИИ 2017 Том 13 № 4

Следовательно, Таганрогский залив в этот гидрологический сезон можно отнести к эвтрофно-полиэвтрофному типу водоемов. В то же время СКСЯ III категории, характерные для мезотрофных водных объектов, отмечены как в районе впадения р. Дон (станции и0, и1, и2), так и в районе водообмена с Азовским морем (станции и18, и19, и20, и16). Но непосредственно вблизи косы Долгой (станции и21, и22, и23) СКСЯ относятся к IV и V категориям, и этот участок можно отнести к эвтрофно-полиэвтрофному. Гиперэвтрофное состояние Таганрогского залива локализовано вблизи г. Таганрога.

Для сравнения, СКСЯ, полученные в это время на р. Дон вблизи г. Ростова-на-Дону, представлены на рисунке 3 и показывают, что «сине-зеленое цветение» в этот период еще не отмечено.

Метод, основанный на биооптических моделях, дает следующие оценки $C_{\chi Л a}$ и $C_{\phi II}$. В воде на выходе из р. Дон (станции и0, и1, и2) значения $C_{\chi Л a}$ составляют 18–25 мг/м³, $C_{\phi II}$ в воде реки на этих станциях находилось в диапазоне относительно высоких значений – 58–71 мг/м³. В воде, попавшей в Таганрогский залив из непосредственно Азовского моря (станции и16, и18, и19, и20), $C_{\chi Л a}$ минимально в этой съемке и составляет 11–20 мг/м³. При этом и $C_{\phi II}$ на этих станциях немного ниже, чем на остальных станциях в этом районе – от 43 до 56 мг/м³ (локальный минимум наблюдали в районе станций и58, и59 – 15–37 мг/м³), что свидетельствует именно о затоке относительно чистой морской воды. Высокие значения $C_{\phi II}$ практически для всех стан-

| | | Концентрация, мг/м ³ Concentration, mg·m ⁻³ | | | | | |
|---------|----------|--|---------------------|-------------------|-----------------------------------|--|--|
| Станция | Дата | | | | | | |
| Station | Date | Категории ($\Delta C_{_{XЛa}}$)* | С _{хла} ** | С_*** | $\mathrm{C}_{_{\Phi\amalg}}$ **** | | |
| | | Categories (ΔC_{CHLa}) | C _{CHLa} | C _{CHLa} | C _{PHC} | | |
| м4р | 28.03.16 | II (3–10) | 4,3 | 16,5 | 74,1 | | |
| м3р | 28.03.16 | II (3–10) | 3,2 | 15,7 | 66,1 | | |
| м1 | 29.03.16 | II (3–10) | 3,9 | 14,3 | 72,1 | | |
| м2 | 29.03.16 | III (10–30) | 7,3 | 17,5 | 62,6 | | |
| м3 | 29.03.16 | III (10–30) | 27,9 | 26,3 | 48,1 | | |
| м8 | 29.03.16 | IV (15–57) | 13,2 | 36,7 | 42,6 | | |
| м9 | 29.03.16 | V (33–120) | 37,9 | 47,7 | 13,8 | | |
| м15 | 29.03.16 | IV (15–57) | 58,4 | 50,4 | 6,8 | | |
| м16 | 29.03.16 | V (33–120) | 64,5 | 47,2 | 22,8 | | |
| м20 | 29.03.16 | IV (15–57) | 51,6 | 43,9 | 26,9 | | |
| м21 | 29.03.16 | IV (15–57) | _ | 48,1 | 15,1 | | |
| м25 | 29.03.16 | IV (15–57) | 48,7 | 49,6 | 8,1 | | |
| м31 | 29.03.16 | IV (15–57) | 58,1 | 58,5 | -7,3 | | |
| м34 | 29.03.16 | V (33–120) | 48,1 | 68,3 | -38,1 | | |
| м40 | 29.03.16 | IV (15–57) | 38,9 | 45,0 | 17,3 | | |
| м39 | 29.03.16 | III (10–30) | 64,2 | 35,8 | 33,9 | | |
| м23 | 30.03.16 | III (10–30) | _ | 48,7 | 0,5 | | |
| м19 | 30.03.16 | IV (15–57) | _ | 53,2 | 8,9 | | |
| м17 | 30.03.16 | IV (15–57) | _ | 49,3 | 8,6 | | |
| м18 | 30.03.16 | IV (15–57) | 32,7 | 48,1 | 21,1 | | |
| м14 | 30.03.16 | IV (15–57) | _ | 48,1 | 3,2 | | |
| м13 | 30.03.16 | IV (15–57) | _ | 48,4 | 8,4 | | |
| м11 | 30.03.16 | IV (15–57) | _ | 35,5 | 29,3 | | |
| м12 | 30.03.16 | IV (15–57) | 42,1 | 39,7 | 22,8 | | |
| р. Дон | 26.03.14 | III (10–30) | 22,8 | 22,8 | 47,3 | | |
| р. Дон | 05.04.16 | III (10–30) | 24,3 | 21,3 | 46,6 | | |
| и0 | 28.06.16 | III (10–30) | _ | 21,9 | 64,1 | | |
| и1 | 28.06.16 | III (10–30) | 23,0 | 25,1 | 71,1 | | |
| и2 | 28.06.16 | III (10–30) | 14,1 | 17,9 | 58,0 | | |
| и3 | 28.06.16 | V (33–120) | _ | 45,7 | 68,8 | | |
| и4 | 28.06.16 | V (33–120) | 54,7 | 48,2 | 50,4 | | |
| и59 | 28.06.16 | V (33–120) | _ | 54,6 | 14,9 | | |
| и58 | 28.06.16 | V (33–120) | _ | 47,8 | 37,0 | | |
| и57 | 28.06.16 | IV (15–57) | _ | 27,5 | 58,9 | | |
| и54 | 28.06.16 | VI (>75) | 174,5 | 76,6 | 98,2 | | |
| и52 | 28.06.16 | VI (>75) | _ | 48,9 | 65,1 | | |
| и33 | 29.06.16 | IV (15–57) | 36,1 | 34,0 | 69,7 | | |
| и32 | 29.06.16 | V (33–120) | _ | 43,2 | 74,6 | | |
| и31 | 29.06.16 | IV (15–57) | _ | 39,6 | 61,6 | | |

Таблица 1. Оценки концентрации хлорофилла *a* и фикоцианина фитопланктона, полученные разными методами Table 1. Phytoplankton chlorophyll *a* and phycocyanin concentrations estimated using various techniques

| и15 | 29.06.16 | IV (15–57) | 17,7 | 23,3 | 55,8 |
|--------|----------|-------------|------|------|-------|
| и16 | 29.06.16 | III (10–30) | _ | 12,3 | 42,9 |
| и18 | 29.06.16 | II (3–10) | _ | 11,2 | 51,4 |
| и19 | 29.06.16 | III (10–30) | 8,3 | 13,5 | 46,6 |
| и20 | 29.06.16 | III (10–30) | _ | 19,6 | 56,4 |
| и21 | 29.06.16 | IV (15–57) | 18,5 | 30,0 | 64,5 |
| и22 | 29.06.16 | IV (15–57) | _ | 36,4 | 74,8 |
| и23 | 29.06.16 | V (33–120) | 46,2 | 58,7 | 123,6 |
| и41 | 30.06.16 | V (33–120) | 62,6 | 59,3 | 139,0 |
| и40 | 30.06.16 | V (33–120) | _ | 45,7 | 71,2 |
| и10 | 30.06.16 | V (33–120) | _ | 39,9 | 83,1 |
| и37 | 30.06.16 | V (33–120) | _ | 42,7 | 73,5 |
| и7 | 30.06.16 | V (33–120) | 66,3 | 66,5 | 95,8 |
| р. Дон | 06.07.16 | III (10–30) | 5,1 | 12,5 | 71,8 |
| р. Дон | 06.07.16 | III (10–30) | 15,2 | 28,6 | 56,7 |

Окончание табл. 1

Примечание. * – категории СКСЯ по [4], в скобках указан диапазон изменения $C_{XЛa}$; ** – $C_{XЛa}$, определенное аналитическим методом; *** – $C_{XЛa}$, рассчитанное по формуле (1); **** – $C_{\phi_{II}}$, рассчитанное по формуле (2). Номера станций соответствуют таковым на рисунке 1.

Note. * – reflectance categories according to [4], C_{CHLa} range is specified in parentheses; ** – C_{CHLa} estimated analytically; *** – C_{CHLa} calculated using (1); **** – C_{PHC} calculated using (2). Stations numbers correspond to those, specified in Fig. 1.

ций в районе затока морских вод (станции и15–и23, табл. 1) указывают на начало «сине-зеленого цветения» в Таганрогском заливе уже начиная с июня. Наибольшие значения и $C_{\chi Л a}$ и $C_{\phi II}$ зафиксированы в разных частях залива на мелководье (станции и7, и23, и41, и54).

Подобные оценки состояния (трофического статуса) водного объекта с использованием биооптических моделей выполняли также в реальном времени после окончания съемки.

Результаты аналитического определения С_{хла} (табл. 1, рис. 5) с учетом видового состава фитопланктона, выполненного через 3 недели (время, необходимое для подготовки проб и проведения измерений) после выполнения спектрометрической съемки (рис. 6), в целом подтвердили результаты оперативного экспертного заключения о цветении сине-зеленых водорослей и трофическом статусе Таганрогского залива в этот гидрологический сезон, выполненного по результатам спектрометрической съемки.

Данные аналитических определений, представленные в таблицах 1 и 2, подтверждают оценки состояния Таганрогского залива, выполненные по спектрометрическим данным и, кроме того, дополняют эти оценки. Так, определение видового соста-

НАУКА ЮГА РОССИИ 2017 Том 13 № 4

ва фитопланктона показывает не только долю сине-зеленых водорослей в общей массе фитопланктона, но и долю потенциально токсичных видов в составе цианобактерий, что невозможно установить дистанционно. Например, экосистему значительно загрязняют токсичные виды фитопланктона: на станции и54 *Anabena flos-aquae*, *Merismopedia*, а на станции и21 *Microcystis aeruginosa*.

Отмеченные расхождения в определениях С_{хла} можно отнести к хорошо известной проблеме неизбежной несинхронности проведения спектрометрической съемки и отбора проб воды, а также к нерепрезентативности отобранной пробы воды по отношению к объему воды, формирующему восходящее от воды излучение.

выводы

Получено более 300 спектров яркости и СКСЯ восходящего от воды излучения в видимом диапазоне длин волн 420–750 нм со спектральным разрешением менее 2 нм на 50 станциях в устьевом участке р. Дон и Таганрогском заливе в марте и июне 2016 г. Полученные в виде таблиц СКСЯ составили основу базы данных спектрометрических измерений этих водных объектов.



Рис. 6. Биомасса основных отделов водорослей фитопланктона Таганрогского залива в марте (на врезке) и июне 2016 г. **Fig. 6**. Biomass of main phytoplankton groups of Taganrog Bay in March (in inset) and June 2016.

| Дата Date | Станция Station | Биомасса фитопланктона, г/м ³ Phytoplankton biomass, g·m ⁻³ | | | | | |
|--------------|--------------------|--|---|-----------------------------------|--------------------|----------------|--|
| | | Сине-зеленые водоросли / Blue-green algae | Диатомовые водоросли / Diatomic algae | Зеленые водоросли* Green algae | Прочие** Others | Bcero Total | |
| 29.03.2016 | м21 | 0,09 | 1,04 | 0,09 | 0,18 | 1,40 | |
| 29.03.2016 | м15 | 0,17 | 1,05 | 0,33 | 0,65 | 2,20 | |
| 29.03.2016 | м9 | 0,39 | 0,45 | 0,48 | 0,97 | 2,29 | |
| 30.03.2016 | м18 | 0,42 | 10,2 | 0,15 | 1,07 | 11,9 | |
| 30.03.2016 | м12 | 0,06 | 5,11 | 0,76 | 7,21 | 13,1 | |
| 28.06.2016 | и1 | 0,14 | 4,24 | 0,05 | 0,11 | 4,53 | |
| 28.06.2016 | и2 | 1,70 | 1,67 | 2,63 | 0,73 | 6,73 | |
| 28.06.2016 | и4 | 3,49 | 5,86 | 2,72 | 2,34 | 14,4 | |
| 28.06.2016 | и54 | 12,4 | 1,74 | 1,00 | 3,34 | 18,5 | |
| 29.06.2016 | и19 | 0,25 | 0,40 | 0,03 | 0,75 | 1,44 | |
| 29.06.2016 | и15 | 1,92 | 0,16 | 0,05 | 1,59 | 3,72 | |
| 29.06.2016 | и21 | 10,4 | 1,69 | 0,21 | 2,47 | 14,8 | |
| 29.06.2016 | и33 | 26,4 | 0,44 | 0,24 | 2,80 | 29,8 | |
| 30.06.2016 | и41 | 75,6 | 4,08 | 1,17 | 13,58 | 94,4 | |

Таблица 2. Соотношение основных отделов водорослей фитопланктона в акватории Таганрогского залива в марте и июне 2016 г. **Table 2.** Main phytoplankton groups composition in Taganrog Bay in March and June 2016

Примечание. * – десмидиевые, вольвоксовые, хлорококковые водоросли; ** – эвгленовые, динофитовые, криптофитовые водоросли.

Note. * – desmids, volvocales, chlorococcales; ** – euglenales, dynophysis, cryptophyte algae.

По форме СКСЯ (reflectance) Таганрогский залив отличается и от центральной части Азовского моря, и от устья р. Дон. В целом это экосистема эвтрофно-полиэвтрофного водного объекта с высокой динамикой регистрируемых показателей. На отдельных участках наблюдаются СКСЯ II и VI категорий, характерные как для мезотрофных, так и для гиперэвтрофных водных объектов. Использование биооптических моделей для определения концентраций хлорофилла *а* и фикоцианина фитопланктона дает аналогичную оценку состояния этих водных объектов.

Спектрометрическая информация в виде спектров КСЯ нижнего уровня служит объективным оперативным индикатором состояния продуктив-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Saprygin V., Povazhnyi V. 2012. Operational MERIS-based NIR-red algorithms for estimating chlorophyll-a concentrations in coastal waters – The Azov Sea case study. *Remote Sensing of Environment.* 121: 118–124. doi: 10.1016/j.rse.2012.01.024
- Mishra S., Mishra D.R., Lee Z., Tucker C.S., 2013. Quantifying cyanobacterial phycocyanin concentration in turbid productive waters: A quasi-analytical approach. *Remote Sensing of Environment*. 133: 141–151. doi: 10.1016/j.rse.2013.02.004
- Moisan T.A.H., Sathyendranath S., Bouman H.A. 2012. Ocean color remote sensing of phytoplankton functional types. In: *Remote Sensing of Biomass-Principles and Applications*. Rijeka, InTech: 101–122.
- Сухоруков Б.Л., Ковалева Г.Е., Новиков И.В. 2017. Оценка трофности водных объектов по данным дистанционной спектрометрии высокого разрешения видимого диапазона электромагнитного спектра. Водные ресурсы. 44(1): 79–90. doi: 10.7868/S0321059617010199
- P 52.24.844-2016. Оценка трофического статуса водных объектов по дистанционной спектрометрической информации видимого диапазона электромагнитного спектра. 2016. Ростов н/Д: 12 с.
- РД 52.24.729-2010. Дистанционная спектрометрическая съемка водных объектов в видимом диапазоне волн с мостовых переходов. 2010. Ростов н/Д: 23 с.
- Вассер С.П., Кондратьева Р.В., Масюк Р.П., Паламарь-Мордвинцева Г.М., Ветрова З.И., Кордюм Е.Л., Мошкова Н.А., Приходькова Л.П., Коваленко О.В., Ступина В.В., Царенко П.М., Юнгер В.П., Радченко М.И., Виноградова О.Н., Бухтиярова Л.Н., Разумна Л.Ф. 1989. Водоросли. Справочник. Киев, Наукова думка: 608 с.
- Сухоруков Б.Л., Ковалева Г.Е., Никаноров А.М. Способ оценки трофности водных объектов: Патент на изобретение № 2632720 Российской Федерации. Заявители и правообладатели ФГБУ Гидрохимический институт и ФГБУН Институт водных проблем РАН, № заявки 2016115903. Заявл. 22.04.2016, опубл. 09.10.2017. Бюл. № 28.
- 9. Ritchie R.J. 2008. Universal chlorophyll equations for estimating chlorophylls *a*, *b*, *c*, and *d* and total chlorophylls in natural

НАУКА ЮГА РОССИИ 2017 Том 13 № 4

ных мутных водных объектов и достаточна для оценки их трофического статуса.

Работа начата при выполнении проекта RFMEFI60714X0059 (2014–2016 гг.) в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (полевые исследования), продолжена (обработка, интерпретация результатов) при выполнении гранта РФФИ № 15-05-08547, а также в рамках государственных заданий Южного научного центра РАН (№ госрегистрации 01201450487) и Института аридных зон ЮНЦ РАН (№ госрегистрации 01201363188).

assemblages of photosynthetic organisms using acetone, methanol, or ethanol solvents. *Photosynthetica*. 46(1): 115–126. doi: 10.1007/s11099-008-0019-7

- Gilerson A.A., Gitelson A.A., Zhou J., Gurlin D., Moses W.J., Ioannou I., Ahmed S.A. 2010. Algorithms for Remote Estimation of Chlorophyll-a in Coastal and Inland Waters using Red and Near Infrared Bands. *Optics Express*. 18(23): 24109– 24125. doi: 10.1364/OE.18.024109
- Mishra S., Mishra D.R. 2014. A novel remote sensing algorithm to quantify phycocyanin in cyanobacterial algal blooms. *Environmental Research Letters*. 9(11): 114003–114011. doi: 10.1088/1748-9326/9/11/114003
- Справочник «Органическое вещество Азовского моря и прилегающих районов Чёрного моря». 2017. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария. URL: http://atlas.ssc-ras.ru/corgbook/ biogene/trof.html.
- Jupp D.L.B., Kirk J.T.O., Harris G.P. 1994. Detection, identification and mapping of cyanobacteria – Using remotesensing to measure the optical-quality of turbid inland waters. *Austral. J. Mar. Freshwater Res.* 45: 801–828. doi: 10.1071/ MF9940801
- Gitelson A.A., Schalles J.F., Rundquist D.C., Schiebe F.R., Yacobi Y.Z. 1999. Comparative reflectance properties of algal cultures with manipulated densities. *J. Appl. Phycol.* 11: 345– 354. doi: 10.1023/A:1008143902418
- Schalles J.F., Yacobi Y.Z. 2000. Remote detection and seasonal patterns of phycocyanin, carotenoid and chlorophyll pigments in eutrophic waters. *Ergebnisse Der Limnologie*. 55: 153–168.

REFERENCES

- Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Saprygin V., Povazhnyi V. 2012. Operational MERIS-based NIR-red algorithms for estimating chlorophyll-a concentrations in coastal waters – The Azov Sea case study. *Remote Sensing of Environment*. 121: 118–124. doi: 10.1016/j.rse.2012.01.024
- Mishra S., Mishra D.R., Lee Z., Tucker C.S. 2013. Quantifying cyanobacterial phycocyanin concentration in turbid productive waters: A quasi-analytical approach. *Remote Sensing of Environment*. 133: 141–151. doi: 10.1016/j.rse.2013.02.004

- Moisan T.A.H., Sathyendranath S., Bouman H.A. 2012. Ocean color remote sensing of phytoplankton functional types. In: *Remote Sensing of Biomass-Principles and Applications*. Rijeka, InTech: 101–122.
- Sukhorukov B.L., Kovaleva G.E., Novikov I.V. 2017. Assessing the Trophic State of Water Bodies by High-Resolution Remote Spectrometry in Visible Band. *Water Resources*. 44(1): 117– 127. doi: 10.1134/S0097807817010183
- R 52.24.844-2016. Otsenka troficheskogo statusa vodnykh ob"ektov po distantsionnoy spektrometricheskoy informatsii vidimogo diapazona elektromagnitnogo spektra. [Recommendation 52.24.844-2016. Assessing the trophic state of water bodies by remote spectrometry in visible band]. 2016. Rostov-on-Don: 12 p. (In Russian).
- RD 52.24.729-2010. Distantsionnaya spektrometricheskaya s"emka vodnykh ob"ektov v vidimom diapazone voln s mostovykh perekhodov. [Ruling Document 52.24.729-2010. Remote spectrometry of water bodies in visible band from river crossings]. 2010. Rostov-on-Don: 23 p. (In Russian).
- Vasser S.P., Kondrat'eva R.V., Masyuk R.P., Palamar-Mordvintseva G.M., Vetrova Z.I., Kordyum E.L., Moshkova N.A., Prikhod'kova L.P., Kovalenko O.V., Stupina V.V., Tsarenko P.M., Yunger V.P., Radchenko M.I., Vinogradova O.N., Bukhtiyarova L.N., Razumna L.F. 1989. *Vodorosli. Spravochnik.* [*Algae. Reference Book*]. Kiev, Naukova dumka: 608 p. (In Russian).
- 8. Sukhorukov B.L., Kovaleva G.E., Nikanorov A.M. Sposob otsenki trofnosti vodnykh ob"ektov: Patent na izobretenie № 2632720 Rossiyskoy Federatsii. [Method for assessing the trophicity of water bodies: Patent No 2632720, Russian Federation]. Applicants and rights holders Hydrochemical Institute and Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, application number 2016115903. The date of application 22 April 2016, published 9 October 2017. (In Russian).

- 9. Ritchie R.J. 2008. Universal chlorophyll equations for estimating chlorophylls *a*, *b*, *c*, and *d* and total chlorophylls in natural assemblages of photosynthetic organisms using acetone, methanol, or ethanol solvents. *Photosynthetica*. 46(1): 115–126. doi: 10.1007/s11099-008-0019-7
- Gilerson A.A., Gitelson A.A., Zhou J., Gurlin D., Moses W.J., Ioannou I., Ahmed S.A. 2010. Algorithms for Remote Estimation of Chlorophyll-a in Coastal and Inland Waters using Red and Near Infrared Bands. *Optics Express*. 18(23): 24109–24125. doi: 10.1364/OE.18.024109
- Mishra S., Mishra D.R. 2014. A novel remote sensing algorithm to quantify phycocyanin in cyanobacterial algal blooms. *Environmental Research Letters*. 9(11): 114003–114011. doi: 10.1088/1748-9326/9/11/114003
- [Handbook "Organic matter of the Sea of Azov and adjacent areas of the Black Sea"]. 2017. Atlas klimaticheskikh izmeneniy v bol'shikh morskikh ekosistemakh Severnogo polushariya. [Atlas of climatic changes in large marine ecosystems of the Northern Hemisphere]. Available at: http://atlas.ssc-ras.ru/ corgbook/biogene/trof.html.
- Jupp D.L.B., Kirk J.T.O., Harris G.P. 1994. Detection, identification and mapping of cyanobacteria – Using remotesensing to measure the optical-quality of turbid inland waters. *Austral. J. Mar. Freshwater Res.* 45: 801–828. doi: 10.1071/ MF9940801
- Gitelson A.A., Schalles J.F., Rundquist D.C., Schiebe F.R., Yacobi Y.Z. 1999. Comparative reflectance properties of algal cultures with manipulated densities. *J. Appl. Phycol.* 11: 345– 354. doi: 10.1023/A:1008143902418
- Schalles J.F., Yacobi Y.Z. 2000. Remote detection and seasonal patterns of phycocyanin, carotenoid and chlorophyll pigments in eutrophic waters. *Ergebnisse Der Limnologie*. 55: 153–168.

Поступила 02.08.2017