

УДК 504.45.064.36:574

## НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Б. Л. Сухоруков<sup>1,2,\*</sup>, член-корреспондент РАН А. М. Никаноров<sup>1,2</sup>

Поступило 25.09.2018 г.

Представлен новый способ анализа спектрометрической информации, получаемой современными спектрометрами видимого диапазона длин волн при съёмках поверхностных водных объектов. Эффективность нового способа интерпретации спектрометрической информации видимого диапазона продемонстрирована с использованием ранее предложенного нами пространства оптических образов (ПОО), образованного из экспериментальных спектров КСЯ (коэффициент спектральной яркости), совместно с модельными. Наличие спектров КСЯ, рассчитанных с показателями поглощения, измеренными в определённые гидрологические сезоны с известным структурным составом фитопланктона, позволяют выполнить градуировку ПОО по фитопланктону различного структурного состава. Построенная траектория изменения состояния р. Дон по данным дистанционной спектрометрии показывает изменение в составе фитопланктона в течение периода наблюдения.

*Ключевые слова:* дистанционная спектрометрия, фитопланктон, коэффициент спектральной яркости, пространство оптических образов.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846750-754>

На настоящем этапе развития методов интерпретации дистанционной спектрометрической информации видимого диапазона измеряемые величины яркости восходящего от воды излучения используют исключительно для определения концентраций ограниченного перечня оптически активных (видимых) компонентов (ОАК) водных объектов (ВО) путём построения биооптических моделей с последующим решением обратной задачи.

Биооптические модели строят на основе сопоставления концентрации ОАК — хлорофилл *a* фитопланктона, растворённых органических и минеральных взвешенных веществ — с комбинацией измеренных величин коэффициента спектральной яркости (КСЯ). Для поверхностных водных объектов (вод типа II: мутные, высокопродуктивные [1]) используют красную область спектра и для различных моделей две или три длины волны: 675, 705 нм или 670, 710, 740 нм [2]. Выбор этих длин волн, безусловно, верен, но при этом из рассмотрения исключают спектральный диапазон в области 620–650 нм, чувствительный к изменению пигментного состава фитопланктона, а именно к перераспределению вспомогательных пигментов, хлорофиллов *b*, *c*, и к появлению в воде фикобилинов, характерных для синезелёных водорослей [3, 4] (рис. 1). Кроме того, не учитывают изменения величины

КСЯ в диапазоне длин волн 520–580 нм, где форма спектров КСЯ (СКСЯ) также с большой долей вероятности меняется именно за счёт изменения структурного состава фитопланктона.

СКСЯ водных экосистем, полученные современной спектральной аппаратурой в видимой области с разрешением < 2 нм, несмотря на свою кажущуюся простоту и “похожесть”, заметно различаются в деталях. Наблюдаются сдвиги максимумов, появляются двойные максимумы, отличные от симметричных, и другие спектральные “особенности”. На рис. 1 приведены экспериментальные СКСЯ некоторых ВО с указанием длин волн основных особенностей СКСЯ, а также длин волн, используемых и не используемых при построении биооптических моделей.

Причину различий формы СКСЯ можно объяснить, анализируя выражения, полученные на базе работ по теории светорассеяния [5, 6].

Если не требуется точности вычисления КСЯ > 30% при фиксированных геометрических условиях съёмки и учёте аддитивности показателей поглощения, рассеяния, то для аналитического расчёта СКСЯ получены следующие уравнения [7, 8]:

$$\rho_{\lambda}(\sigma, \alpha) = \Sigma_{\lambda}(\sigma, \alpha) / K_{\lambda}(\sigma, \alpha), \quad (1)$$

$$\Sigma_{\lambda}(\sigma, \alpha) = \sigma_{\lambda, \text{МВ}}^{\gamma} \cdot C_{\text{МВ}} + \sigma_{\lambda, \text{ФП}}^{\gamma} \cdot C_{\text{ФП}} + \sigma_{\text{воды}}, \quad (2)$$

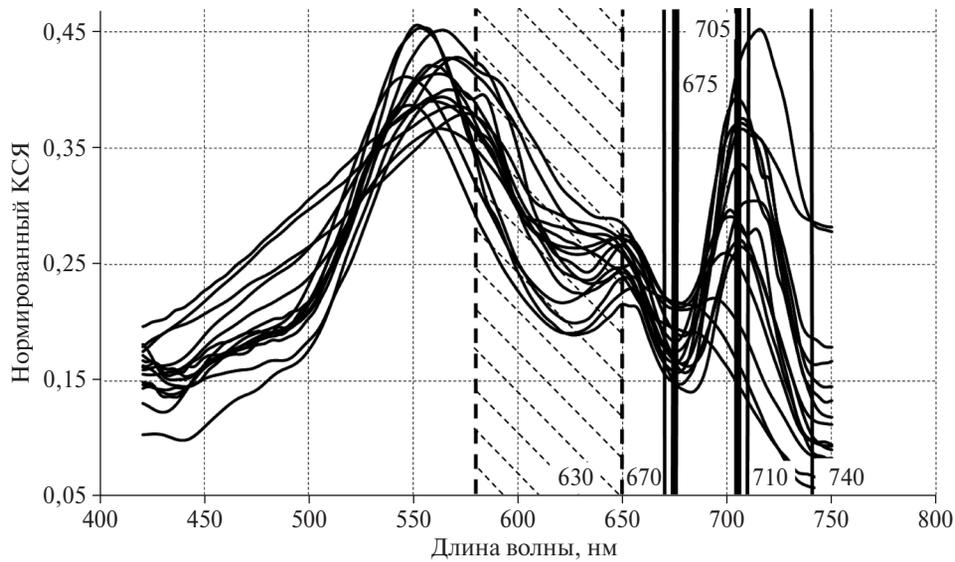
$$K_{\lambda}(\sigma, \alpha) = [\alpha_{\lambda, \text{МВ}} + (1 - \Phi_{\lambda, \text{МВ}})] \cdot C_{\text{МВ}} + \\ + [\alpha_{\lambda, \text{ФП}} + (1 - \Phi_{\lambda, \text{ФП}})] \cdot C_{\text{ФП}} + 0,5\sigma_{\lambda, \text{воды}} + \\ + \alpha_{\lambda, \text{воды}} + \alpha_{\lambda, \text{РОВ}}. \quad (3)$$

<sup>1</sup> Институт водных проблем

Российской Академии наук, Ростов-на-Дону

<sup>2</sup> Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону

\*E-mail: [bls-phys@yandex.ru](mailto:bls-phys@yandex.ru)



**Рис. 1.** Экспериментальные СКСЯ, полученные на различных водных объектах. Указаны длины волн двухволнового — 675, 705 нм и трёхволнового — 670, 710, 740 нм алгоритмов при построении биооптических моделей и область вблизи 630 нм, не используемая при построении биооптических моделей.

Здесь  $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$ ,  $\sigma_{\lambda, i}$ ,  $\sigma_{\lambda, i}^{\gamma}$  — удельные по концентрации показатели поглощения, рассеяния и рассеяния на угол  $\gamma$  компонент  $i$  ( $i$  принимает значения МВ, РОВ, ФП — минеральных взвешенных, растворённых органических веществ и фитопланктона соответственно) на длине волны  $\lambda$ ,  $C_i$  — концентрации этих компонентов,  $\Phi_{\lambda, i}$  — интеграл от индикатрисы рассеяния, который воспроизводит долю света, рассеянного в заднюю полусферу на длине волны  $\lambda$ ,  $i$ -компонентой.

Видно, что в (3) концентрации оптически активных (видимых) компонентов входят в виде произведения с удельными показателями рассеяния или поглощения частиц и/или клеток экосистемы.

Известно (например, [9]), что спектры  $\sigma_{\lambda, i}$  в видимой области не имеют селективных особенностей. Ярko выраженными селективными спектральными особенностями обладает только показатель поглощения,  $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$ , определяемый структурным составом фитопланктона и, следовательно, соотношением пигментов в его клетках. Наиболее заметно изменение  $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$  проявляется при появлении в ВО и цветении синезелёных водорослей. В этом случае на спектральные особенности вспомогательных хлорофиллов  $b$ ,  $c$  в клетках фитопланктона, характерных для зелёных и диатомовых водорослей, в области длин волн 600–650 нм накладываются особенности фикобилинов, в которых чаще всего доминирует фикоцианин.

Такое изменение в  $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$  должно проявляться и проявляется (рис. 1) в изменении формы СКСЯ. При расчёте модельных СКСЯ это приводит к не-

обходимости уточнения (3) и замене  $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$  на  $\alpha_{\lambda, \text{ФП}^j}$ , где  $j$  указывает на определённый таксономический состав фитопланктона. В общем случае  $j \rightarrow \infty$ , но при проведении расчётов удобно выделять  $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$  либо монокультур фитопланктона, либо с доминированием отдельных отделов. В этом случае  $j$  указывает на таксон известного состава.

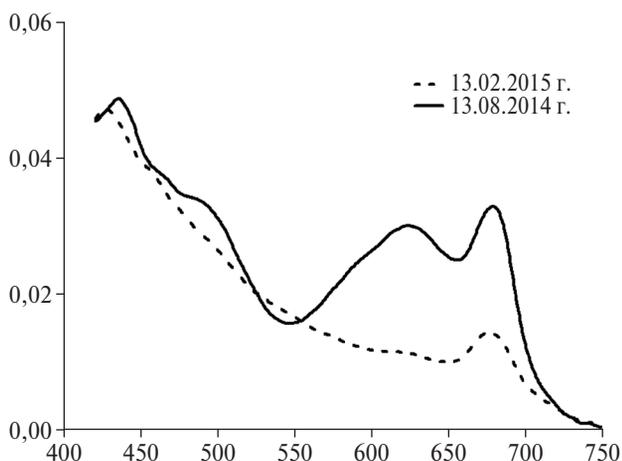
Ранее было показано, что для наблюдения за внутриводоёмными процессами по дистанционной спектрометрической информации удобно использовать такой “теоретический инструмент”, как пространство оптических образов (ПОО) [8–10]. Для получения ПОО со статистически устойчивыми свойствами его строят на базе всевозможных экспериментальных СКСЯ видимой области электромагнитного спектра, дополненных модельными, рассчитанными по (1)–(3). Общее количество спектров, использованных для построения ПОО, > 700 экспериментальных и несколько тысяч модельных.

Показано [9], что массив экспериментальных и модельных СКСЯ без значительной потери информации для вод типа II может быть преобразован в трёхмерный с обобщёнными координатами (ОК) — ОК1, ОК2, ОК3. Для поверхностных высокопродуктивных вод три обобщённые координаты описывают более 90% дисперсии СКСЯ, измеренных в течение указанного периода наблюдений. Соответственно, считая, что форма СКСЯ связана и/или определяется состоянием водной экосистемы, изменение формы СКСЯ в ПОО фактически отражает траекторию внутриводоёмного процесса ВО [8, 9].

Добавление к экспериментальным СКСЯ модельных решает две принципиально важные задачи. Во-первых, достигается статистическая устойчивость ПОО. Во-вторых, модельные СКСЯ, рассчитанные на основе известных  $\sigma_{\lambda,i}$ ,  $\sigma_{\lambda,j}^y$ ,  $\alpha_{\lambda,ФП^j}$  при известных  $C_i$ , позволяют строить изоплеты  $C_{ФП}$ ,  $C_{МВ}$  в ПОО и фактически осуществлять градуировку ПОО по известным ОАК. Появляется возможность оценивать направленность процесса изменения состояния экосистемы в реальном времени.

В нашей работе представлено развитие метода ПОО путём его градуировки не одной, а несколькими изоплетами с изменяющимся структурным составом фитопланктона  $j$ . Изоплеты  $C_{ФП^j}$ ,  $C_{МВ}$  строят по СКСЯ, рассчитанным с различными  $\alpha_{\lambda,ФП^j}$ , измеренными в различные гидрологические сезоны и, соответственно, при различном структурном составе фитопланктона. В нашей работе  $\alpha_{\lambda,ФП^j}$  измеряли по методике, описанной в [10, 11]. На рис. 2 представлены спектры  $\alpha_{\lambda,ФП^j}$ , измеренные в пробах воды, отобранных в феврале (доминирование динофитовых и диатомовых,  $\alpha_{\lambda,ФП^д}$ ) и в августе (доминирование синезелёных и эвгленовых  $\alpha_{\lambda,ФП^{с-з}}$ ).

Рассчитанные на основе экспериментально измеренных  $\alpha_{\lambda,ФП^j}$  СКСЯ позволили в трёхмерном ПОО одновременно построить изоплеты,  $C_{ФП^д}$ ,  $C_{МВ}$ , и  $C_{ФП^{с-з}}$ ,  $C_{МВ}$  (рис. 3). На выносках рис. 3 показаны характерные экспериментальные СКСЯ, попадающие в различные области проградуированного ПОО.



**Рис. 2.** Спектры удельного показателя поглощения фитопланктона, измеренные на р. Дон в феврале (доминирование динофитовых, диатомовых) и в августе (доминирование синезелёных, эвгленовых). Отмечена спектральная область максимума поглощения синезелёных микроводорослей.

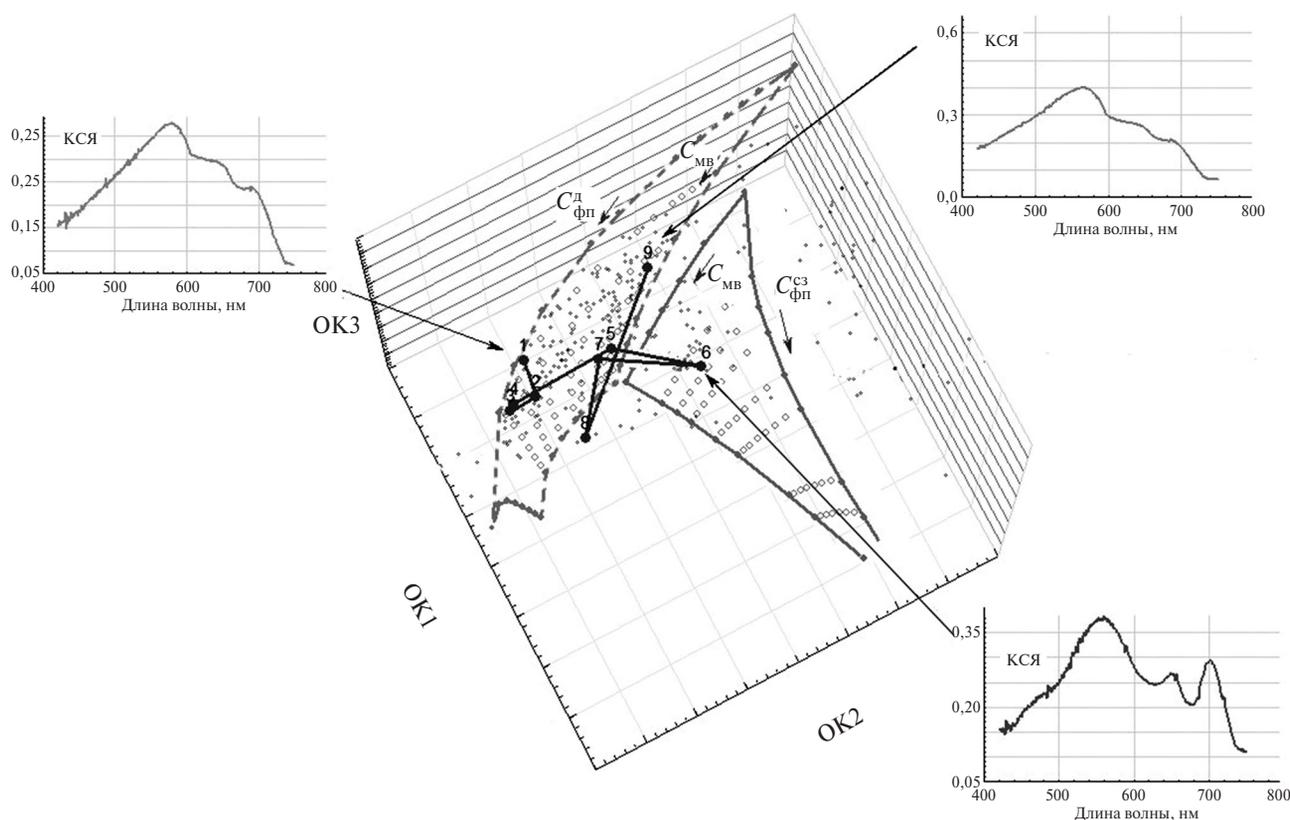
Отметим, что изоплета  $C_{ФП^з}$ ,  $C_{МВ}$ , рассчитанная для такого важного состояния развития фитопланктона, при котором доминируют зелёные микроводоросли, с  $\alpha_{\lambda,ФП^з}$ , находится между указанными и на рис. 3 не нанесена, чтобы не загромождать его).

Построенные при различном видовом составе фитопланктона  $j$  изоплеты рис. 2 выделяют в ПОО своеобразные, не перекрывающиеся между собой поверхности, “лепестки”, практически сходящиеся в точке с  $OK1 = 1,5$ ;  $OK2 = -1,5$ ,  $OK3 = 1,5$ . В этой точке ПОО  $C_{ФП} = 1$  мг/дм<sup>3</sup>,  $C_{МВ} = 0$ , и при таких концентрациях ОАК форма модельных СКСЯ для различного  $\alpha_{\lambda,ФП^j}$  практически совпадает.

В ПОО, проградуированном вышеприведёнными изоплетами, построили траекторию изменения СКСЯ р. Дон в 2012 г. (рис. 3). Первую съёмку проводили 4 мая, последующие — с периодичностью около двух недель. Большинство СКСЯ (в ПОО — точки) попадают на лепесток изоплеты  $C_{ФП^д}$ ,  $C_{МВ}$ , построенный по полученному в феврале  $\alpha_{\lambda,ФП^д}$ , что указывает на преобладание в экосистеме диатомовых и динофитовых микроводорослей с незначительной примесью синезелёных, зелёных в течение длительного промежутка времени. Однако СКСЯ, полученный 23 августа, переходит на поверхность лепестка, построенного по изоплете  $C_{ФП^{с-з}}$ ,  $C_{МВ}$ , что говорит о резком изменении состояния экосистемы в этот промежуток времени. Форма СКСЯ на выноске (рис. 3) показывает, что в этот промежуток времени наблюдалось цветение синезелёных: появление минимума в СКСЯ на длине волны 630 нм, соответствующее увеличению максимума в  $\alpha_{630,ФП^j}$ . По данным аналитических определений структурный (таксономический) состав фитопланктона в 2012 г. отличался тем, что “сине-зелёное” цветение воды было очень позднее (обычно наблюдается в конце июля—начале августа) и чрезвычайно кратковременное. Имеющиеся в нашем распоряжении отдельные ограниченные по таксонометрическому (с точностью до отдела) составу фитопланктона данные в табл. 1.

Уже в следующей после 23.08.2012 г. съёмке наблюдается возврат траектории в область ПОО, вблизи изоплеты  $C_{ФП^д}$ ,  $C_{МВ}$ .

Таким образом, показано, что впервые по дистанционно измеряемой спектрометрической информации высокого спектрального разрешения видимой области спектра, используя метод ПОО, возможно в реальном времени на качественном уровне отслеживать изменение структурного состава фитопланктона. Траектория оптического образа либо меняется



**Рис. 3.** Трёхмерное пространство оптических образов. Точки — экспериментальные СКСЯ, треугольники — модельные СКСЯ с доминированием синезелёных, эвгленовых, квадраты — диатомовых, динофитовых микроводорослей. Выделены поверхности, полученные на основе модельных СКСЯ с известным структурным составом. Сплошная линия, проходящая через измеренные СКСЯ (заполненные кружки), — траектория изменения состояния водной экосистемы р. Дон в 2012 г. по СКСЯ. Цифры — порядковые номера спектрометрических съёмок. Врезки — график СКСЯ, полученные в 1-, 6-, 9-й съёмке соответственно.

**Таблица 1.** Процентное соотношение (по биомассе) синезелёных, зелёных, диатомовых и прочих водорослей фитопланктона в р. Дон в 2012 г.

Дата съёмки	Отделы фитопланктона			
	Синезелёные	Зелёные	Диатомовые	Прочие
4.05	15,0	н/обн	65,6	19,4
16.07	40,5	36,1	23,4	н/обн
23.08	84,9	6,1	9,0	н/обн
13.09	31,1	21,5	6,0	41,4
12.11	5,4	0,1	94,5	н/обн

Примечание. К прочим относили не идентифицируемые до отдела частично разрушенные и разложившиеся клетки фитопланктона.

вблизи плоскости определённого лепестка  $C_{ФПj}$ ,  $C_{МВ}$ , определяемого  $\alpha_{\lambda,ФПj}$ , показывая изменение лишь концентрации ОАК водной экосистемы, либо переходит с одного лепестка на другой, указывая на изменение структуры фитопланктона. Попадание СКСЯ между лепестками говорит о смешанном составе фитопланктона во время проведения съёмки.

Предложенный способ интерпретации данных дистанционной спектроскопии видимого диапазона

применим для съёмок с нижнего (с борта судна или любого низколетящего аппарата) и со спутникового уровней. Ограничение способа связано с необходимостью получения информации современной спектральной аппаратурой с большим (> 100) количеством каналов с разрешением не хуже 5 нм. Реализация способа меняет представление о возможностях дистанционного изучения ВО, расширяет перечень оптически активных (видимых) компонентов и понятийный базис метода ПОО.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Morel A., Prieur L. // Limnol. and Oceanogr. 1977. V. 22. № 4. P. 709–722.
2. Odermatt D., Gitelson A., Brando V.E., Schaepman M. // Remote Sensing Environ. 2012. T. 118. С. 116–126.
3. Jupp D.L.B., Kirk J.T.O., Harris G.P. // Austral. J. Mar. Freshwater Res. 1994. V. 45. P. 801–828.
4. Gitelson A.A., Schalles J.F., Rundquist D.C., Schiebe F.R., Yacobi Y.Z. // J. Appl. Phycol. 1999. V. 11. P. 345–354.
5. Голубицкий Б.М., Левин И.М., Танташев М.В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1974. Т. 10. № 11. С. 1235–1238.

6. Зеє Э.П. В кн.: Распространение света в дисперсной среде. Минск: Наука и техника, 1982. С. 84–105.
7. Sukhorukov B.L., Garbuzov G.P., Akawiec A.A. 7th Int. Symp. "Atm. and Ocean Optics" // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. P. 503–510.
8. Сухоруков Б.Л., Гарбузов Г.П., Никаноров А.М. // Вод. ресурсы. 2000. № 5. С. 579–588.
9. Никаноров А.М., Трофимчук М.М., Сухоруков Б.Л. Методы экспериментальной гидроэкологии: монография. Ростов н/Д.: НОК, 2012. 309 с.
10. Garbuzov G.P., Sukhorukov B.L. Proc. 1st Int. Airborne Remote Sensing Conf. and Exhibit. // Strasbourg, 1994. Vol. 3. P. 37–45.
11. Tassan S., Ferrari G.M. // Limnol. and Oceanogr. 1995. V. 40. № 8. P. 1358–1368.
12. Чурилова Т.Я., Финенко З.З., Акимов А.И. Микроводоросли Черного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 301–319.

## NEW POSSIBILITIES OF REMOTE SPECTROMETRY OF SURFACE WATER BODIES

**B. L. Sukhorukov, Corresponding Member of the RAS A. M. Nikanorov**

Received September 25, 2018

Article presents a new approach to the analysis of spectrometric data obtained by modern spectrometers in the visible range of wavelengths for surveys of surface water bodies. The efficiency of the new approach in the interpretation of spectrometric data in the visible range is shown with the use, proposed by us, of the space of optical images (SOI) formed by a combination of experimental and model ranges of the remote sensing reflectance (RS). The RS ranges calculated parallel to measuring the absorbance indexes in particular hydrological seasons with a known structural composition of phytoplankton permit us to gradate the SOI with respect to the structural composition of phytoplankton. The curve of the status of the ecosystem of the Don River constructed by the data of remote spectrometry shows changes in the structure of phytoplankton during the observation period.

*Keywords:* remote spectrometry, phytoplankton, remote sensing reflectance, space of optical images.