

УДК 551.465

© И. В. Гончаренко, В. В. Ростовцева, Б. В. Коновалов
 Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия
 goncharenko@ocean.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВОГО СУДОВОГО КОМПЛЕКСА ПАССИВНОГО ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПРИМЕСЕЙ В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ

Статья поступила в редакцию 28.03.2018, после доработки 07.08.2018.

Оценка экологического состояния прибрежных вод или вод внутренних морей требует оперативного получения подробных данных об акватории. Разработанный нами новый трехканальный пассивный оптический комплекс для экологического мониторинга морских акваторий позволяет получать спектры коэффициента яркости моря с борта движущегося судна. Для обработки результатов измерений с целью получения данных о концентрации имеющихся в воде естественных примесей используется оригинальный метод решения обратной задачи, основанный на учете особенностей спектра поглощения света чистой водой, — метод водной адсорбционной ступеньки. Комплекс для экологического мониторинга морских акваторий совместно с программой метода водной адсорбционной ступеньки был использован для изучения зон смешения различных типов вод в Черном море. Производя измерения с пространственным разрешением 3 метра с борта движущегося судна, он позволил получить подробную картину распределения примесей по двум исследуемым акваториям прибрежных районов Черного моря различной трофности. Данные дистанционного зондирования были верифицированы результатами измерений, полученными на станциях.

Ключевые слова: оптическое пассивное дистанционное зондирование, коэффициент спектральной яркости моря, поглощение света морской водой, концентрация взвеси и окрашенного органического вещества в морской воде, морской шельф, устье реки, внутренние моря.

I. V. Goncharenko, V. V. Rostovtseva, B. V. Konovalov
 P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

USING OF NEW SHIPBORNE COMPLEX FOR PASSIVE OPTICAL REMOTE SENSING FOR OBTAINING DISTRIBUTION OF NATURAL ADMIXTURES IN COASTAL WATERS

Received 28.03.2018, in final form 07.08.2018.

Estimation of the ecological state of shelf waters or inland seas needs to obtain detailed data over the area operatively. The new three-channel passive optical complex for ecological monitoring of marine aquatoria (EMMA), developed by us, gives the sea radiance coefficient spectra from board a moving ship. For processing of the data of measurements aiming at the water admixtures concentration assessment an original method for solving of the inverse problem is used, which is based on the intrinsic properties of the pure water absorption spectrum — water absorption step method (WASM). Complex EMMA together with the program WASM was applied for studying of the areas of different sea water types mixing in the Black Sea. Giving data at the spacial resolution of 3 meters from board a moving vessel, it enabled us to get the detailed distribution of the natural water constituents over the two coastal regions of the Black Sea with different trophicity under exploration. The obtained remote sensing data were verified with the results of measurements carried out at the stations.

Key words: optical passive remote sensing, sea radiance coefficient spectrum, sea water absorption, concentration of sea water suspended matter and coloured organic matter, sea shelf, river mouth, inland seas.

Ссылка для цитирования: Гончаренко И. В., Ростовцева В. В., Коновалов Б. В. Использование нового судового комплекса пассивного оптического зондирования для получения распределения естественных примесей в прибрежных водах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 97—101.

For citation: Goncharenko I. V., Rostovtseva V. V., Konovalov B. V. Using of New Shipborne Complex for Passive Optical Remote Sensing for Obtaining Distribution of Natural Admixtures in Coastal Waters. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 3, 97—101.

doi: 10.7868/S20736673180300127

Оперативное получение данных о состоянии прибрежных морских акваторий во многих случаях является актуальной задачей. Данные со спутников, однако, часто не обеспечивают необходимого пространственного разрешения или отсутствуют из-за наличия облачности, кроме того при их обработке требуется проводить атмосферную коррекцию и подспутниковые измерения [1, 2]. Поэтому приоритетной задачей является проведение дистанционных измерений с борта движущегося судна. Пассивное оптическое зондирование поверхности моря обладает рядом преимуществ, так как измеряет такие характеристики как светопоглощение и светорассеяние, которые не зависят от состояния фитопланктона и других естественных примесей, оно не является энергоемким и позволяет получать спектры с хорошим разрешением. Однако для оценки коэффициента спектральной яркости моря (КСЯ), пропорционального рассеянному водной толщей солнечному излучению, деленному на облученность поверхности моря, требуется измерение спектров яркости моря и неба и спектра общей облученности водной поверхности [3—6]. В настоящей работе представлены характеристики разработанного нами полуавтоматического комплекса для экологического мониторинга морских акваторий (ЭММА) с тремя каналами, измеряющими соответствующие спектры в диапазоне 350—800 нм. Далее охарактеризован метод обработки полученных в Черном море спектров, основанный на особенностях спектра поглощения света чистой водой (метод водной абсорбционной ступеньки — ВАСМ [7]). Продемонстрирована работа комплекса в двух прибрежных акваториях Черного моря, где происходит смешение вод различного типа.

Аппаратура и методика обработки измерений. Комплекс ЭММА проводит измерения специально разработанной нами портативной малогабаритной аппаратурой (вес ~700 грамм, размеры хорошо видны на рис. 1). Она включает в себя три спектрометра серии STS фирмы Ocean Optics со следующими характеристиками:

- рабочий диапазон — 350 ÷ 800 нм;
- разрешение матрицы — 1024 точки;
- спектральное разрешение 3 нм (при входной щели 50 мкм);
- отношение сигнал / шум — 1500:1;
- время интегрирования — 10 мкс ÷ 10 с.

Измерения аппаратурой ЭММА проводятся в полуавтоматическом режиме с частотой 1 Гц. Результаты съемки сохраняются в базе данных управляющего компьютера, как спектры, полученные от каждого из 3-х спектрометров, плюс координаты GPS/GLONASS каждую секунду. Прибор работает

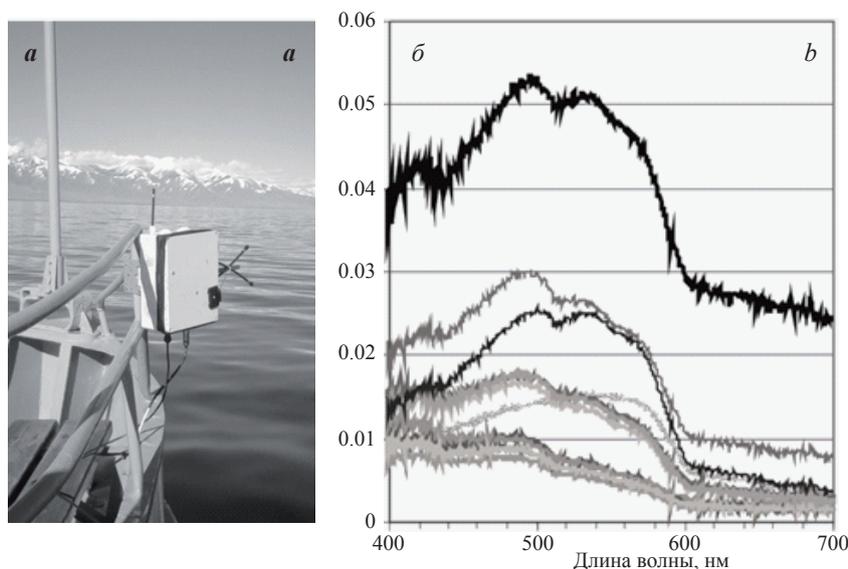


Рис. 1. Проведение измерений комплексом ЭММА с борта судна.

a — видны три световода, обеспечивающие измерение яркости моря, яркости сопряженного участка неба и облученности поверхности моря; *б* — примеры спектров КСЯ, полученных комплексом ЭММА в Черном море.

Fig. 1. Measurement with EMMA equipment from the vessel.

a — three optical fibers, which provide measuring of sea radiance, the radiance of the conjugated sky area and the irradiation of the sea surface; *b* — examples of Sea Radiance Coefficient (SRC) spectra obtained by the EMMA complex in the Black Sea.

в непрерывном режиме в течение всего рабочего времени. За 5 ч непрерывной работы формируется массив измеренных данных объемом около 700 Мбайт, для обработки этой информации нами было разработано специализированное программное обеспечение. Такого рода измерения с борта движущегося научного судна позволяют с хорошим разрешением (~ 3 м) получать геопривязанные массивы измеряемых параметров.

Комплекс управляется компьютером, что дает возможность визуализировать производимые измерения в режиме реального времени и при необходимости оперативно принимать решение об изменении траектории движения судна, например, для оконтуривания плумов. Массогабаритные характеристики и портативность комплекса ЭММА позволяют использовать его на всех видах судов, включая маломерные лодки, что полезно при решении экологических задач.

Оценка КСЯ моря производится по формуле:

$$R(\lambda) = \frac{B_{sea} - r \cdot B_{sky}}{B_{ws}}, \quad (1)$$

где B_{sea} — яркость восходящего от моря излучение, B_{sky} — яркость сопряженного участка неба, r — коэффициент отражения Френеля, принимающий значение 0.02 для штилевой погоды и при углах зондирования, близких к вертикали, B_{ws} — яркость горизонтального белого отражателя, характеризующая общую облученность поверхности воды. Поглощением и рассеянием света в воздухе пренебрегаем, так как речь идет о зондировании морской поверхности с борта судна. В комплексе ЭММА для оценки B_{sea} и B_{sky} излучение от моря и от сопряженного участка неба собирается двумя идентичными линзами с апертурным углом порядка 4 градусов и подводится к измерителю по двум одинаковым световодам. Расположение этих световодов видно на рис. 1. Для того чтобы не пересчитывать полученные значения световых потоков в яркость (световой поток в единицу телесного угла), B_{ws} также оценивается как световой поток, попадающий на приемник через «морской» канал. Для этого была проведена серия калибровочных измерений одновременно общей облученности морской поверхности, полученной в третьем канале от вертикального световода с косинусным корректором на конце, и светового потока, полученного от белого горизонтального экрана «морским» каналом. Измеренный таким образом коэффициент использовался в дальнейшем для пересчета спектров общей облученности в световой поток от белого экрана, попадающий на приемник через световод и собирающую линзу, аналогичных «морскому» каналу. В результате спектры КСЯ рассчитываются по формуле, аналогичной (1), где вместо яркости стоят значения световых потоков через используемые линзы и световоды.

Следует отметить, что КСЯ является безразмерным. Часто используемый в иностранных источниках коэффициент спектрального отражения при дистанционном зондировании (R_{rs} , см. [4]) получается путем деления разности яркостей на облученность поверхности моря. Он отличается от КСЯ наличием размерности (sr^{-1}) и постоянным коэффициентом.

Далее для решения обратной задачи оценки концентрации светорассеивающих и светопоглощающих компонентов морской воды по спектрам КСЯ был предложен оригинальный метод, использующий особенности спектров поглощения воды и ее естественных примесей [7]. Действительно, в диапазоне 540 ÷ 650 нм, поглощение света естественными примесями, а именно, фитопланктоном, «желтым веществом» и взвесью не имеет особенностей (оно постоянно или слабо убывает с увеличением длины волны), в то же время поглощение света чистой водой здесь имеет ярко выраженную «ступеньку»: слабое возрастание в интервале 540—580 нм, крутой подъем при 580—600 нм и далее опять более слабое возрастание до 650 нм, что и отражается в спектрах КСЯ (рис. 1, б). Наличие такой ступеньки и дало название методу — Метод Водной Абсорбционной Ступеньки (ВАСМ). Суть метода заключается в следующем: величина измеренного значения $R(\lambda)$ при дистанционных измерениях сильно зависит от условий наблюдения (облачности, волнения моря), поэтому мы предположили, что истинное значение в первом приближении может быть получено из измеренного с помощью двух параметров (линейное приближение):

$$\text{КСЯ} = kR(\lambda) - delR \quad (2)$$

Определить величину k (учитывает скачкообразное изменение освещенности между измерениями) и $delR$ (возникает из-за волнения при измерении яркости участка неба, соседнего с тем, который дает максимальный вклад в отраженный от поверхности сигнал) [7] можно в более узком поддиапазоне

спектра, где вариации значений КСЯ в основном зависят от свойств самой воды. Для трех характерных длин волн в этом спектральном поддиапазоне записываем КСЯ в двухпотоковом приближении, как обратное рассеяние, деленное на вертикальное ослабление света (поглощение плюс обратное рассеяние):

$$\frac{k_0 b_b}{aw(\lambda_i) + a(\lambda_i) + b_b} = k \cdot R(\lambda_i) - delR, i = 1, 2, 3.$$

Считая рассеяние b_b и поглощение примесями воды $a(\lambda_i) \approx a(\lambda_2)$, слабо зависящими от длины волны в этом поддиапазоне, и поделив обе части на $k_0 b_b$, получаем систему трех уравнений с тремя неизвестными. Одним из неизвестных является величина поглощения плюс рассеяния назад света взвесью на одной из выбранных длин волн $a(\lambda_2) + b_b$. С помощью двух других ($k/k_0 b_b$ и $delR/k_0 b_b$) удается восстановить спектры поглощения плюс рассеяния назад света водой в исследуемой акватории во всем оптическом диапазоне (в связи с тем, что рассеяние назад, как правило, существенно меньше поглощения, в дальнейшем эту величину будем называть оценкой поглощения). Вычитая из них известный спектр поглощения чистой водой, получаем спектры суммарного поглощения света примесями. Следует отметить, что при получении спектров абсорбции для мезотрофных и олиготрофных вод исследуемых районов Черного моря спектр коэффициента рассеяния назад считался не зависящим от длины волны от 400 до 600 нм. В более прозрачных водах необходимо будет учитывать его спектральный ход. Дальнейшая обработка спектров поглощения света примесями воды дает возможность оценить концентрации взвеси и окрашенного органического вещества (суммарного поглощения пигментами фитопланктона, детрита и «желтого вещества»), а также концентрацию пигментов фитопланктона по поглощению в синей области спектра (традиционно используемый для определения концентрации хлорофилла-а красный максимум здесь не может быть использован, так как экранируется сильным поглощением света водой). Описанный здесь метод можно применять для олиготрофных и мезотрофных вод Черного моря, для эвтрофных вод нами предложена его модификация [8]. Выбор трех длин волн определяется трофностью вод: так, для мезотрофных вод, примером которых могут служить воды вблизи устья Мзымты (Адлер), наиболее подходящими являются значения 580, 600 и 650 нм; в то же время для прозрачных вод из акватории вблизи Феодосии сигнал в канале яркости моря в красной области сравним по величине с шумом, поэтому мы использовали здесь значения 540, 580 и 600 нм.

Обсуждение результатов измерений. Измерения были проведены в 2015 и 2016 гг. в двух районах Черного моря — в районе Адлера при впадении в море реки Мзымты (рис. 2, см. вклейку) и в районе Феодосии, где происходит смешение более прозрачных и соленых вод Черного моря с водами Азовского моря, выходящими из Керченского пролива и увлекаемыми основным черноморским течением на запад (рис. 3, см. вклейку). Причем если плюм реки Мзымты достаточно хорошо виден и имеет резкие границы, то резкие переходы в Феодосийской бухте от одного вида вод к другому с корабля незаметны для глаза и фиксируются только приборами комплекса ЭММА, а также хорошо прослеживаются со спутника.

На рис. 2 представлено распределение концентрации взвеси в оптических единицах (m^{-1}) на 600 нм, полученное по спектрам КСЯ при движении судна из плюма реки Мзымты вдоль берега и обратно. В качестве подложки использован один из снимков этого района, показывающий типичный размер плюма в мае. Точное положение плюма в день съемки получить, однако, не удалось из-за частичной облачности. Стрелками отмечены места взятия проб воды и измерения глубины видимости диска Секки. В этих пробах определяли концентрацию взвеси для контроля дистанционных измерений. Концентрация взвеси оценивалась после фильтрации по величине показателя поглощения на фильтрах на длине волны 750 нм и дана в единицах поглощения (m^{-1}) [9]. Видно, что в целом для более прозрачных вод наблюдается удовлетворительное совпадение значений концентрации взвеси, оцененных дистанционно и на пробах. Значение в пробе для наиболее мутной воды ниже, чем дистанционные оценки либо в результате осаждения взвеси, либо из-за взятия пробы в более прозрачных водах из-за дрейфа судна.

На правом рисунке дано распределение концентрации окрашенного органического вещества («желтого вещества» и фитопланктона), как оценка его поглощения на 500 нм по данным дистанционных измерений комплексом ЭММА. Полученное распределение имеет максимумы в тех же местах, что и распределение взвеси, то есть соответствует положению плюма.

На рис. 3 представлены результаты работы комплекса ЭММА в Феодосийском заливе в 2016 г. Здесь прозрачность вод была существенно выше, чем в районе Адлера: так, глубина видимости диска Секки в северной части трека была порядка 9 м (в районе Адлера она не превышала 6 м), а при движении к югу скачком увеличилась до 21 м. При оценке концентрации взвеси по спектрам КСЯ, измеренным дистанционно, в районе этого скачка прозрачности было обнаружено существенное изменение концентрации взвеси, причем эффект наблюдался как по дороге туда, так и на обратном пути. В среднем концентрация взвеси после «скачка» уменьшилась в 8—10 раз. Измерения проводились каждую секунду, что позволило нам оценить разброс при оценке концентрации взвеси дистанционным методом — он составляет порядка 50 % в прозрачных водах и 20 % в более мутных водах. Измерения на пробах на двух станциях в прозрачных водах подтверждают оценки по дистанционным измерениям. В менее прозрачных водах сами значения на пробах возрастают в 2—4 раза, однако, они меньше, чем значения, полученные по КСЯ — это можно объяснить эффектом осаждения взвеси: пробы воды были взяты с поверхности, в то время как оценки по КСЯ производились по всей глубине проникновения света, которая в данном случае составляла более двадцати метров. В распределении концентрации окрашенного органического вещества также наблюдалось уменьшение концентрации, но несколько более плавное.

Проведенные в Черном море исследования продемонстрировали возможность использования нового полуавтоматического комплекса пассивного оптического зондирования поверхности моря ЭММА для построения распределения концентрации основных естественных примесей в морской воде. Пространственное разрешение было достаточно высоким: измерения трехканальным приемником излучения производились раз в секунду, что при средней скорости движения судна (6 узлов) позволило оценивать спектры КСЯ с пространственным разрешением ~ 3 м. Комплекс работал в автоматическом режиме несколько часов, количество измерений при этом достигло нескольких десятков тысяч. Обработка такого количества данных потребовала использования специальных программных решений. Для решения обратной задачи определения концентраций по спектрам КСЯ был программно реализован оригинальный метод, учитывающий особенности спектра поглощения света чистой водой. Полученные дистанционным методом данные были статистически обработаны, а также верифицированы результатами анализа на пробах воды, отобранными на нескольких станциях, и измерениями глубины видимости диска Секки. Проведенные исследования в акваториях Черного моря показали эффективность применения предложенных технических решений, алгоритмов и программ для вод различной тропности.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0002 — разработка методики и анализ данных) при частичной поддержке РФФ (проект № 14-05-00095 — экспедиционные исследования).

Литература

1. Mouw C. B., Greb S., Aurin D., DiGiacomo P. M., Lee Z-P, Twardowski M., Binding C., Hu C., Ma R., Moore T., Moses W., Craig S. E. Aquatic color radiometry remote sensing of coastal and inland waters: Challenges and recommendations for future satellite missions // *Remote Sens. Environ.* 2015. V. 160, P. 15—30.
2. Буренков В. И., Копелевич О. В., Ратькова Т. Н., Шеберстов С. В. Цветение кокколитофорид в Баренцевом море — спутниковые и судовые наблюдения // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 5. С. 1—9.
3. Матюшенко В. А., Пелевин В. Н., Ростовцева В. В. Измерение коэффициента яркости моря трехканальным спектрофотометром с борта НИС // *Оптика атмосферы и океана*. 1996. Т. 9, № 5. С. 664—669.
4. Mobley C. D. Estimation of the remote sensing reflectance from above-water methods // *Appl. Optics*. 1999. V. 38. P. 7442—7455.
5. Hunter P. D., Tyler A. N., Carvalho L., Codd G. A., Maberly S. C. Hyperspectral remote sensing of cyanobacterial pigments as indicators for cell populations and toxins in eutrophic lakes // *Remote Sens. Environ.* 2010. V. 114. P. 2705—2718.
6. Hommersom A., Kratzer S., Laanen M., Ansko I., Ligi M., Bresciani M., Giardino C., Beltrán-Abaunza J. M., Moore G., Wernand M., Peters S. Intercomparison in the field between the new WISP-3 and other radiometers (TriOS Ramses, ASD FieldSpec, and TACCS) // *J. Appl. Rem. Sens.* 2012. V. 6, N 1. P. 1—21.
7. Ростовцева В. В. Метод получения спектров поглощения морской воды по данным пассивного дистанционного зондирования с борта судна с использованием свойств чистой воды // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28, № 11. С. 1003—1011.
8. Ростовцева В. В., Гончаренко И. В., Коновалов Б. В., Алюкаева А. Ф. Оперативная оценка состояния прибрежных морских акваторий по данным пассивного оптического зондирования поверхности воды с борта судна // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30, № 12. С. 1017—1022.
9. Коновалов Б. В., Кравчишина М. Д., Беляев Н. А., Новигатский А. Н. Определение концентрации минеральной взвеси и взвешенного органического вещества по их спектральному поглощению // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 5. С. 704—711.

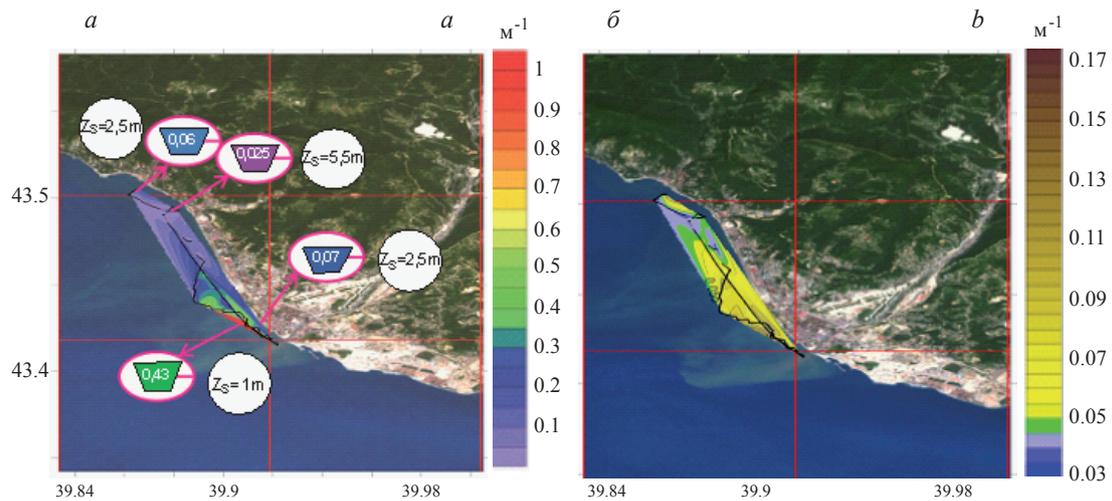


Рис. 2. Распределение естественных примесей в воде в районе устья реки Мзымты (Адлер), построенное по результатам работы комплекса ЭММА.
a – распределение взвеси, для сравнения дана концентрация взвеси в пробах и глубина видимости диска Секки;
б - распределение концентрации окрашенного органического вещества в единицах поглощения на 500 нм.

Fig. 2. Distribution of natural water admixtures in the area of the Mzymta River mouth (Adler), created by the results of EMMA complex operation .
a — distribution of suspended matter, concentration of suspended matter in the samples and the depth of visibility of Secchi disk are given for comparison;
b — distribution of coloured organic matter concentration in units of absorption at 500 nm.

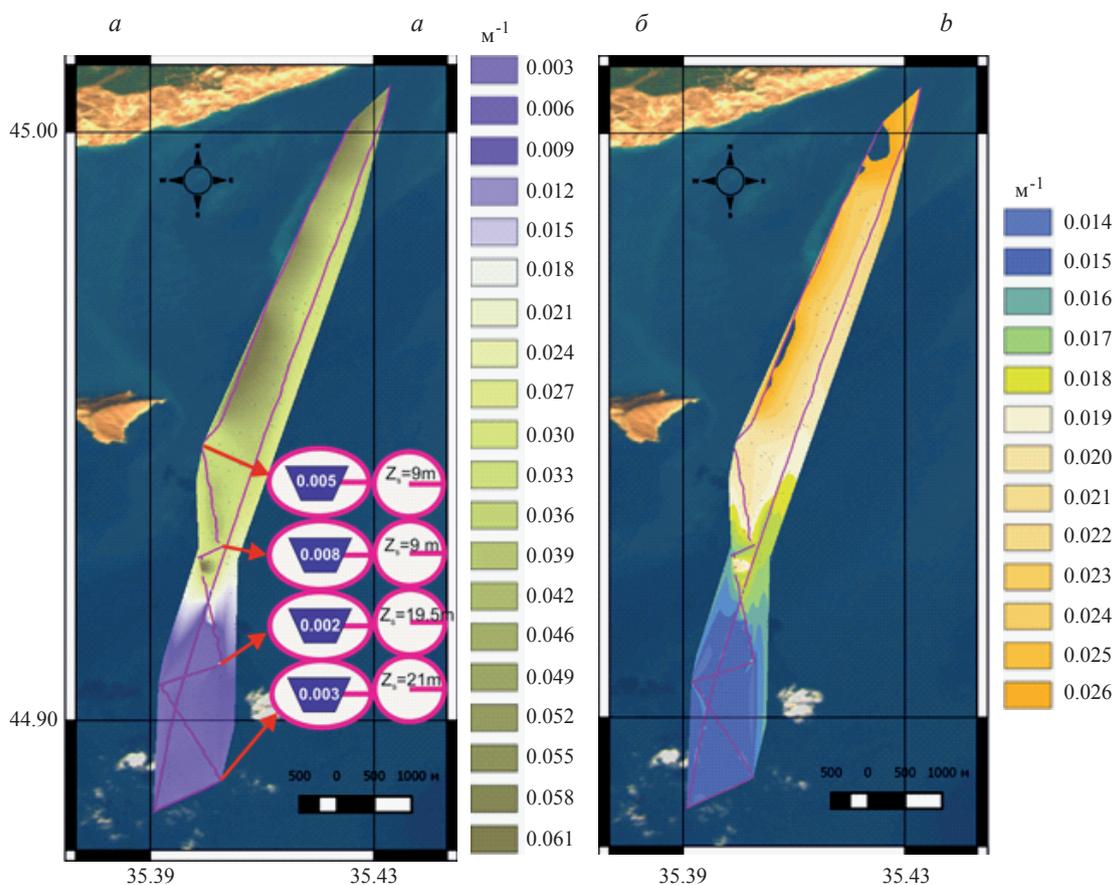


Рис. 3. Распределение естественных примесей в воде в районе Феодосийской бухты, построенное по результатам работы комплекса ЭММА. Рисунок наложен на изображение бухты, полученное мультиспектральной аппаратурой со спутника Landsat в тот же день.
 а – распределение взвеси, для сравнения дана концентрация взвеси в пробах и глубина видимости диска Секки;
 б - распределение концентрации окрашенного органического вещества в единицах поглощения на 500 нм.

Fig. 3. Distribution of natural water admixtures in the area of the Feodosiya Bay, created by the results of EMMA complex operation. The base for the figure was the image of the bay obtained by multispectral equipment from the Landsat satellite on the same day.
 a — distribution of suspended matter, concentration of suspended matter in the samples and the depth of visibility of Secchi disk are given for comparison; b — distribution of coloured organic matter concentration in units of absorption at 500 nm.