

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.463

Биооптические свойства поверхностных вод оз. Иссык-Куль по данным оперативного зондирования с борта судна пассивным оптическим комплексом ЭММА

В.В. Ростовцева, И.В. Гончаренко, Б.В. Коновалов*

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997, Москва, пр. Нахимовский, 36*

Поступила в редакцию 8.10.2019 г.

На основе данных измерений биооптических свойств вод оз. Иссык-Куль комплексом пассивного дистанционного зондирования для экологического мониторинга морских акваторий (ЭММА) с борта судна, а также измерений на пробах воды создана и апробирована методика определения состава олиготрофных вод. Она является третьей частью метода дистанционной оценки концентраций основных природных составляющих морских и озерных вод с использованием спектра поглощения света чистой морской водой, разработанного нами ранее для мезотрофных и эвтрофных вод. С помощью этой методики получены оценки концентраций пигментов фитопланктона, окрашенного органического вещества, взвеси и распределение их по акватории озера в течение трехдневного эксперимента в июле 2018 г.

Ключевые слова: оптическое пассивное дистанционное зондирование, гиперспектрометр, природные компоненты морской и озерной воды, поглощение и рассеяние света водой, концентрации фитопланктона, окрашенного органического вещества и взвеси; optical passive remote sensing, hyperspectrometer, natural sea/lake water constituents, light absorption and scattering in water, concentration of phytoplankton, colored organic matter and suspended matter.

Введение

В настоящее время ввиду запуска спутников с пассивными оптическими мульти- и гиперспектральными сканерами с высоким пространственным разрешением особенно актуальным стало изучение связи характеристик состава морской или озерной воды — концентраций фитопланктона, окрашенного органического вещества и взвеси — с ее оптическими характеристиками. Однако при обработке спутниковых данных следует учитывать особенности состава вод прибрежных акваторий, внутренних морей и озер. Для этого в каждой исследуемой акватории проводятся подспутниковые измерения и создаются региональные алгоритмы обработки спутниковой информации [1–3]. Другой способ — предварительная классификация спектров отражения воды, полученных гиперспектральным сканером, и применение к каждому классу специального алгоритма. Здесь, однако, велики погрешности смешения классов при выделении одного из них (ошибки второго рода) [4]. Мы исходим из предположения, что вся информация о составе воды заключена в самом спектре отраженного водной толщей света [5]. Для того чтобы получить данные о концентрациях основных примесей, мы используем оптические свойства самой воды, которые проявля-

ются наиболее ярко там, где резко меняется зависимость поглощения воды от длины волны и в спектре коэффициента спектральной яркости (КСЯ) появляется «ступенька» (метод водной абсорбционной «ступеньки» ВАСМ) [6]. Первоначально этот метод был разработан для мезотрофных вод, где рассеяние водной толщей света определяется в основном взвешенным веществом, а величина «ступеньки» в спектре КСЯ зависит от поглощения света только чистой водой, т.е. водой, не содержащей ни взвешенных частиц, ни растворенного органического вещества. При переходе к эвтрофным водам ВАСМ был доработан введением поправки к величине «ступеньки», зависящей от концентраций окрашенного органического вещества и хлорофилла [7].

Озеро Иссык-Куль является глубоким (до 700 м) слабосоленым водоемом (5–6‰), воды которого принадлежат к олиготрофному типу [8], т.е. содержат мало естественных примесей (компонент); поглощение и рассеяние в таких водоемах во многом определяются свойствами самой воды. Спектры отражения света толщей воды здесь определяются не только поглощением, но и рассеянием, зависящим от длины волны. Действительно, из-за низкой концентрации взвешенного вещества существенная доля проникающего в воду излучения рассеивается на неоднородностях плотности воды. Такое рассеяние, как известно, пропорционально длине волны в минус четвертой степени и должно быть учтено в алгоритме обработки данных. Таким образом, наши задачи при обработке результатов зондирования

* Вера Владимировна Ростовцева (vera@ocean.ru);
Игорь Владимирович Гончаренко (goncharenko@ocean.ru);
Борис Васильевич Коновалов (bvkonov@yandex.ru).

вод оз. Иссык-Куль сводились к определению характера спектра рассеяния, созданию версии алгоритма ВАСМ для олиготрофных вод, в которой производится учет такого спектра рассеяния, а также расчету с его помощью концентраций примесей в воде озера и получению распределения их по акватории.

Измерение коэффициента спектральной яркости воды пассивным оптическим комплексом ЭММА

Все измерения КСЯ воды были проведены в дневное время с борта движущегося судна полуавтоматическим пассивным оптическим комплексом экологического мониторинга морских акваторий (ЭММА), установленным на гиросtabilизированную платформу для уменьшения погрешностей измерения из-за изменения положения измерителя (рис. 1).

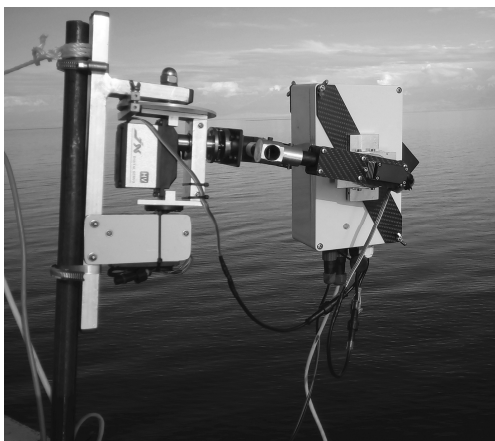


Рис. 1. Общий вид комплекса дистанционного пассивного оптического зондирования воды ЭММА, установленного на гиросtabilизированной платформе

Комплекс ЭММА включает в себя три гиперспектрометра, позволяющих проводить измерения в спектральном диапазоне $\lambda = 350\text{--}800$ нм с разрешением 3 нм в полуавтоматическом режиме, и аппаратуру для управления, записи и передачи информации для дальнейшей обработки по оригинальным алгоритмам.

Три канала комплекса ЭММА предназначены для одновременного измерения спектра яркости восходящего от моря излучения (B_{sea}), спектра яркости участка неба (B_{sky}), дающего наибольший вклад в отраженное от поверхности излучение, и общей облученности морской поверхности (E), которая после соответствующей калибровки приводится к яркости горизонтального белого экрана ($B_{\text{ws}} = K \cdot E$). По этим трем спектрам, измеренным с частотой 1 Гц, что означает получение оценок каждые 3 м при движении судна со скоростью 6 узлов, рассчитывается КСЯ исследуемой акватории:

$$R_{\lambda} = (B_{\text{sea}_{-\lambda}} - r \cdot B_{\text{sky}_{-\lambda}}) / B_{\text{ws}_{-\lambda}} \quad (1)$$

Для измерения спектров используются три гиперспектрометра STS-VIS весом 60 г и размерами $40 \times 42 \times 24$ мм каждый, два из которых присоединены к световодам с объективами и один к световоду с косинусным корректором, направленным вверх. Вес трехканального гиперспектрометра не превышает 1 кг, он установлен на гиросtabilизированной платформе. Общий вес всего комплекса ЭММА не превышает 2 кг.

Таким образом, особенности комплекса ЭММА — это малый вес и габариты (полностью портативный), работа в полуавтоматическом режиме (нужно только выставлять его так, чтобы не смотреть в блик и не попадать в область тени от мачты или борта судна), наличие гиросtabilизированной платформы, нивелирующей продольную и поперечную качку, а также оригинальный алгоритм записи и обработки большого объема данных многочасовой работы.

Создание алгоритма обработки измерений ВАСМ для олиготрофных вод

Основой для разработки алгоритма, использующего метод водной абсорбционной «ступеньки» ВАСМ [6], стал тот факт, что в любом спектре КСЯ находится диапазон длин волн, в котором наиболее сильно проявляются особенности спектра поглощения света чистой водой. Так, на рис. 2 приведены два спектра КСЯ, полученные во время измерений комплексом ЭММА на оз. Иссык-Куль, а также спектр поглощения света чистой водой.

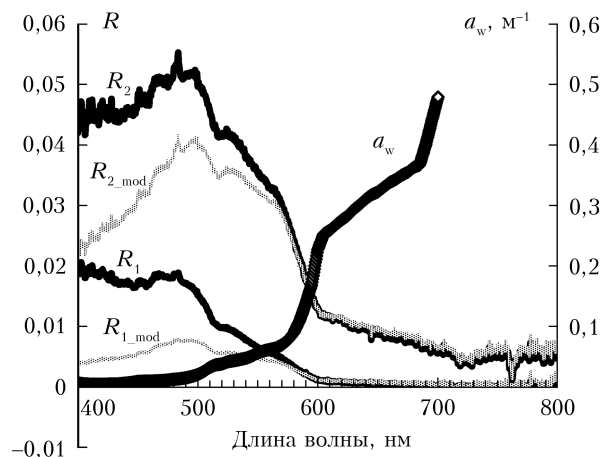


Рис. 2. Два спектра КСЯ, полученные во время измерений комплексом ЭММА в центральной части оз. Иссык-Куль (R_1 ; $p_{\text{first}} = 1,9$) и у побережья (R_2 ; $p_{\text{first}} = 1,1$); эти же спектры после приведения к независимому от длины волны рассеянию (R_{1_mod} , $p = 1,1$; R_{2_mod} , $p = 0,9$); спектр показателя поглощения света водой без примесей (чистой водой — a_w)

Видно, что характерные особенности спектров КСЯ обусловлены резкими изменениями в этом спектре поглощения (появление «ступеньки»). Выбирая три длины волн, где происходят эти изменения (например, 540, 580 и 602 нм или 580, 602

и 650 нм), считаем параметр «ступеньки» как отношение изменения R в двух ее частях:

$$p_{\text{first}} = \frac{R_{\lambda 1} - R_{\lambda 2}}{R_{\lambda 2} - R_{\lambda 3}}. \quad (2)$$

В двухпотоковом приближении КСЯ определяется как отношение индекса рассеяния назад b_{λ} к индексу вертикального ослабления:

$$R_{\lambda} = k_0 b_{\lambda} / (a_{w\lambda} + a_{\lambda} + b_{\lambda}), \quad (3)$$

где b_{λ} — индекс рассеяния света водной толщей назад; $a_{w\lambda}$ — поглощение чистой водой; a_{λ} — поглощение всеми примесями, содержащимися в воде; k_0 — коэффициент пропорциональности, определяемый свойствами пропускания и отражения границы раздела вода — воздух. Если рассеяние не зависит от длины волны, то наибольшее значение p_{first} достигает 1,47 для характерных длин волн 540, 580 и 602 нм, с появлением примесей оно уменьшается. Однако для оз. Иссык-Куль в прозрачных водах центральной части p_{first} превосходит этот максимум (для спектра КСЯ R_1 , приведенного на рис. 2, $p_{\text{first}} = 1,9$). Следовательно, для таких вод нужно учитывать зависимость рассеяния от длины волны, т.е. селективность рассеяния света водной толщей.

Для создания дополнения к алгоритму ВАСМ для олиготрофных вод необходимо задать зависимость индекса рассеяния света водной толщей от длины волны. Будем считать, что свет рассеивается как на взвешенных частицах, причем индекс рассеяния взвеси b_{sm} не зависит от длины волны, так и на неоднородностях плотности воды, индекс рассеяния которой $b_{w\lambda}$ резко возрастает с уменьшением длины волны излучения:

$$b_{\lambda} = b_{\text{sm}} + b_{w0}(\lambda_0 / \lambda)^4. \quad (4)$$

Выбирая опорную длину волны $\lambda_0 = 580$ нм (средняя из трех выбранных ранее длин волн) и нормируя на величину полного рассеяния $b_0 = b_{\text{sm}} + b_{w0}$ на этой длине волны, получаем

$$b_{\lambda} / b_0 = 1 + \beta((\lambda_0 / \lambda)^4 - 1), \quad (5)$$

где $\beta = b_{w0} / b_0$ — параметр селективности рассеяния, определяющий долю рассеяния на неоднородностях плотности воды в общем рассеянии (принимает значения от 0 до 1). Разделив (3) на (5), находим спектр R_{mod} , т.е. спектр, получающийся после приведения к независимому от длины волны рассеянию в числителе (см. рис. 2), далее к нему можно применять метод расчета концентраций содержащихся в воде примесей ВАСМ, разработанный ранее.

Остается определить величину параметра селективности рассеяния β . Для его оценки по спектру КСЯ были выбраны несколько спектров с разными начальными значениями параметра «ступеньки» p_{first} . Для каждого спектра КСЯ параметр спектральной селективности рассеяния изменяли от нуля и до того значения, при котором модельный спектр, построенный по оценкам концентрации примесей, совпадал с исходным на $\lambda = 500$ нм. На рис. 3 приведены полученные значения β для исходных p_{first} .

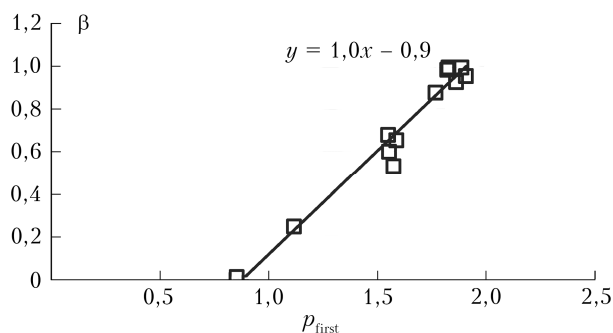


Рис. 3. Оценка значений параметра селективности рассеяния для разных значений параметра «ступеньки» и линейная аппроксимация этой зависимости

Видно, что β отличается от 0, то есть рассеяние на флуктуациях плотности воды становится заметным, для $p_{\text{first}} > 0,9$. При дальнейшем увеличении p_{first} параметр β стремится к единице. Линейно аппроксимируя эту зависимость, получаем оценку β для любого p_{first} :

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{при } p_{\text{first}} < 0,9; \\ p_{\text{first}} - 0,9 & \text{при } 0,9 < p_{\text{first}} < 1,9; \\ 1 & \text{при } p_{\text{first}} > 1,9. \end{cases} \quad (6)$$

В результате алгоритм оценки содержания примесей в водах Иссык-Куля по спектру КСЯ состоит из оценки p_{first} по значениям R на трех длинах волн по (2), оценки β по (6), расчета нормированного спектра рассеяния (5) и деления на него спектра КСЯ. На рис. 2 показаны модифицированные спектры КСЯ. К каждому полученному таким образом модифицированному спектру КСЯ применяется ранее разработанный алгоритм ВАСМ для вод с неселективным, то есть не зависящим от длины волны, рассеянием. Были получены оценки концентраций взвешенного вещества, окрашенного органического вещества и пигментов фитопланктона.

Результаты измерений. Сравнение с данными, полученными при обработке проб воды

Измерения проводились в начале июля 2018 г. в течение трех дней в светлое время суток. В первый день за 5 ч измерений в общей сложности была получена информация о более чем 18000 точек, в каждой из которых были измерены три спектра. Во второй день были измерены спектры примерно в 23000 точек (6,5 ч измерений), в третий день — в 18500 точках. Для оценки изменения яркости излучения во времени на рис. 4 приведены значения во всех трех спектрах на $\lambda = 540$ нм для второго дня. Видно, что с 8:00 до 18:00 общая освещенность плавно возрастает и затем убывает к закату, причем благодаря наличию гиросtabilизированной платформы погрешность измерения не превышает 10% в начале и конце дня, в середине дня она меньше нескольких процентов. Сигналы от воды и сопряженного участка неба, дающего наибольший вклад в отраженный от водной поверхности сигнал,

более изменчивы, так как реагируют на состояние поверхности изучаемого водоема, наличие взвеси и других компонент, а также на разную яркость неба при повороте судна. Так, на рис. 4 можно отметить несколько характерных случаев. В 8:55 наблюдается резкое возрастание сигнала от неба (поворот судна к более светлому участку), вызвавшее практически такое же увеличение сигнала от воды за счет его отраженной части, при этом общая освещенность остается на том же уровне. С 10:40 при неизменном характере сигналов от неба и общей освещенности резко возрастает сигнал от озера, что говорит об увеличении концентрации взвешенных частиц в этом районе. В 11:24 наблюдается прохождение облака, закрывающего солнце: синхронно уменьшаются сигнал общей освещенности и сигнал от воды при неизменном сигнале от неба. Наконец, в ~14:00 наблюдается резкое увеличение всех трех сигналов, что, очевидно, происходит при развороте судна и попадании в район солнечного блика.

Все полученные тройки спектров в каждой точке исследуемой акватории были пересчитаны в спектры КСЯ, далее с использованием предложенного

алгоритма ВАСМ с учетом спектральной зависимости рассеяния света водой определялись концентрации основных природных компонент в единицах поглощения: поглощение взвесью (считается независимым от длины волны), поглощение пигментами фитопланктона в синем максимуме на $\lambda = 440$ нм и поглощение окрашенным органическим веществом на $\lambda = 500$ нм (здесь используем эту длину волны для удобства сравнения вклада от каждого компонента в поглощение в диапазоне $\lambda = 400\text{--}600$ нм; для пересчета на обычно используемую длину волны 390 нм нужно умножить на 5,2). Результаты расчетов для второго дня представлены также на рис. 5. Видно, что все три компонента вносят приблизительно одинаковый вклад в суммарное поглощение на $\lambda = 400\text{--}600$ нм, тогда как в красной области (> 600 нм) поглощает в основном вода. Наиболее изменчивой оказывается концентрация взвешенного вещества.

В течение всей экспедиции проводился отбор проб воды на станциях, при этом за три дня в светлое время суток было отобрано девять проб с поверхности воды. Взвесь из них осаждалась под давлением (при перепаде 0,2 атм) на стекловолнистые

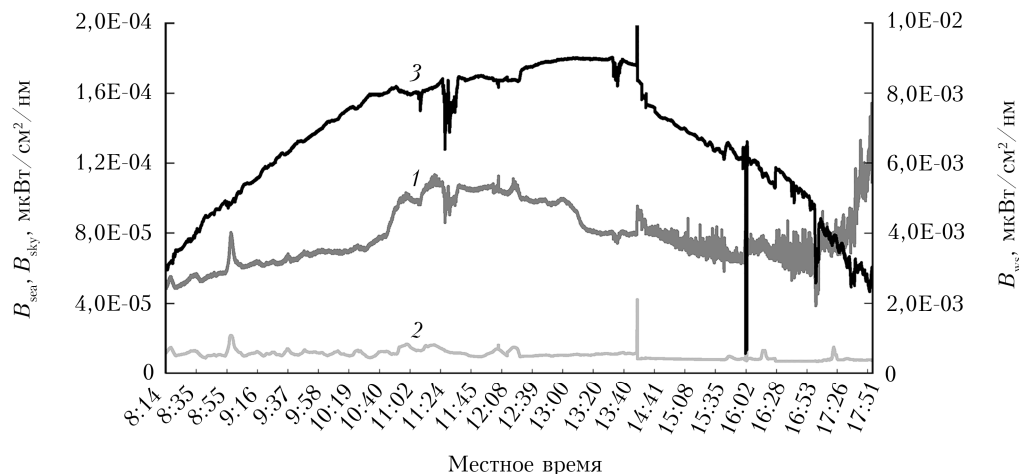


Рис. 4. Изменение со временем сигналов от водной поверхности B_{ser} на $\lambda = 540$ нм (1); излучения неба B_{sky} , умноженного на коэффициент Френеля 0,02 (2); излучения белого диффузно-отражающего экрана B_{ws} (3), характеризующего общую освещенность поверхности озера

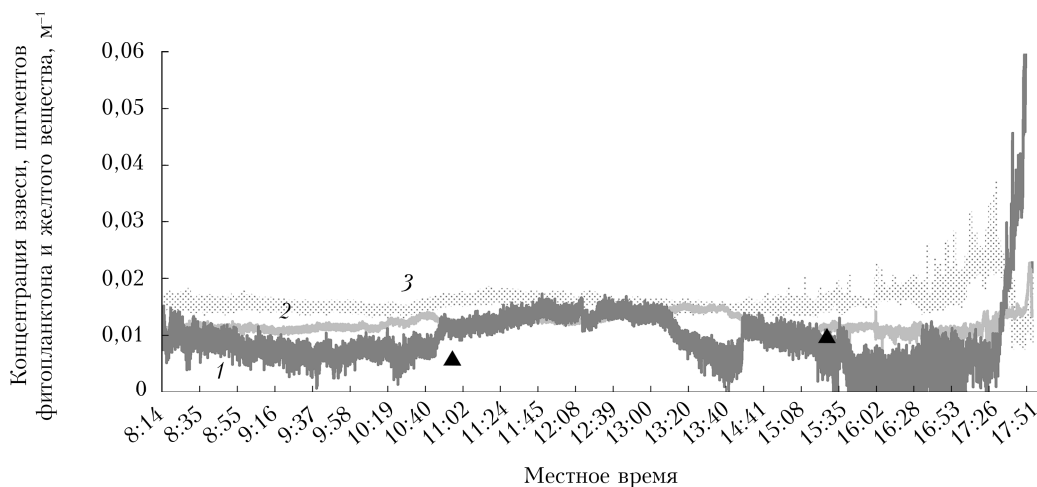


Рис. 5. Оценка концентраций взвеси (1), пигментов фитопланктона на $\lambda = 440$ нм (2) и окрашенного органического вещества на $\lambda = 500$ нм (3); треугольники — оценки концентрации минеральной взвеси в пробах воды

фильтры Whatman GF/F диаметром 47 мм. Для анализа состава осажженной на фильтр взвеси регистрировались ее спектры поглощения. Фотометрирование и расчет концентраций проводились в соответствии с методикой [9]. За поглощение минеральной взвесью принималась величина поглощения света на $\lambda = 750$ нм, так как именно минеральная взвесь определяет постоянную, независимую от длины волны составляющую поглощения в осажженной на фильтры взвеси. На рис. 6 приведено сравнение результатов оценки поглощения света взвесью, полученных на пробах и дистанционным методом, и рассчитана дисперсия разброса. Среднеквадратическое отклонение $\approx 0,004$ м⁻¹. Считая, что погрешности оценки концентрации дистанционно и на пробах воды (за счет неравномерности распределения взвеси по вертикали и по горизонтали) примерно равны, получаем, что каждый метод дает погрешность $\sim 0,003$ м⁻¹. Рассчитав погрешность по данному разбросу значений поглощения (см. рис. 5), получаем примерно такую же величину для максимального разброса, что и можно считать погрешностью метода.

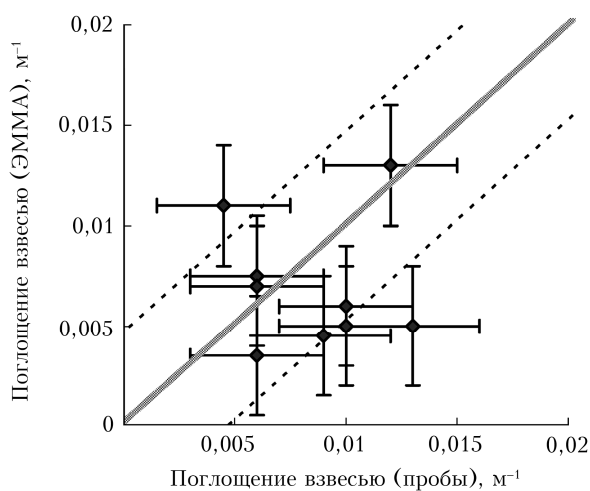


Рис. 6. Сравнение концентрации минеральной взвеси, полученной в пробах воды, взятых с поверхности на 9 станциях, с оценками концентрации взвеси по дистанционным данным комплекса ЭММА

Большое количество данных при длительных измерениях позволяет получать оперативную картину распределения естественных компонент, взвешенных и растворенных в воде. На рис. 7 (цв. вкладка) даны такие распределения для взвеси, полученные по маршруту движения судна.

Обсуждение результатов

Как было показано в более ранних исследованиях [8], оз. Иссык-Куль отличается высокой степенью однородности по горизонтали и по глубине таких характеристик, как температура и соленость. Наши исследования также показали, что состав воды озера мало меняется по всей акватории. Так,

пигменты фитопланктона поглощают в синем максимуме на $\lambda = 440$ нм в среднем от 0,01 до 0,015 м⁻¹, что соответствует концентрации фитопланктона 0,1–0,2 мг/м³. Концентрацию пигментов фитопланктона измеряли на пробах воды летом 2015 и 2017 г.: в первом случае среднее значение не превышало 0,09 мг/м³, по величине пигментного индекса фитопланктон соответствовал «старому» фитопланктону, летом 2017 г. по пигментному индексу наблюдалось цветение фитопланктона, его средняя концентрация была $\sim 0,3$ мг/м. Очевидно, летом 2018 г. цветение не наблюдалось нигде, кроме районов впадения рек. Концентрация окрашенного органического вещества находилась на уровне 0,015 м⁻¹ на $\lambda = 500$ нм ($\sim 0,08$ м⁻¹ на $\lambda = 390$ нм); концентрация взвешенного вещества менялась от 0,003 до 0,01 м⁻¹ в глубоких районах, и только на расстояниях менее 1–2 км от берега увеличивалась в разы. Таким образом, воды оз. Иссык-Куль в летний период являются олиготрофными и практически однородными по всей акватории.

Проведение измерений дистанционным методом с помощью гиростабилизированного комплекса ЭММА и на отдельных пробах воды позволило объединить все измерения в единую картину и получить оценку погрешности таких измерений, которая не превысила величину минимальной концентрации, что для олиготрофных вод – значимый результат.

Заключение

Полученные результаты являются важным этапом в развитии метода дистанционного зондирования акваторий морей и озер с борта движущегося судна, при котором в каждой точке формируются спектры КСЯ, позволяющие далее с помощью специального алгоритма ВАСМ оценивать концентрации природных компонент в составе воды. Этот метод был разработан для мезотрофных вод, затем модифицирован с учетом сильного влияния на спектры КСЯ поглощения света компонентами в эвтрофных водах. В настоящей работе измерения велись в олиготрофных водах и в алгоритм ВАСМ был включен спектральный ход показателя рассеяния света на неоднородностях самой воды.

Измерения на оз. Иссык-Куль позволили дистанционно определить распределение природных компонент по всей акватории озера, используя устойчивую связь между биооптическими свойствами олиготрофных вод и их составом. Эта связь была реализована в алгоритме ВАСМ и подтверждена измерениями на пробах воды. Предложенный метод дает возможность оперативной оценки экологического состояния акватории и может быть полезным для проведения подспутниковых измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-55-80004) (обработка измерений), РНФ (грант № 18-47-06202) (анализ данных), а также в рамках государственного задания Министерства науки и образования России (тема № 0149-2019-0003) (создание методики).

1. Palmer S.C.J., Kutser T., Hunter P.D. Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions // *Remote Sens. Environ.* 2015. V. 157. P. 1–8.
2. 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.
3. Каралли П.Г., Копелевич О.В., Салинг И.В., Шеберстов С.В., Паутова Л.А., Силкин В.А. Валидация дистанционных оценок параметров кокколитофоридных цветений в Баренцевом море по данным натуральных измерений // *Фундам. и прикл. гидрофиз.* 2018. Т. 11, № 3. С. 55–63.
4. Eleveld M.A., Ruescas A.B., Hommersom A., Moore T.S., Peters S.W.M., Brockmann C. An optical classification tool for global lake waters // *Remote Sens.* 2017. V. 9. P. 420–444.
5. Ростовцева В.В., Коновалов Б.В., Гончаренко И.В., Хлебников Д.В. Способ оценки содержания примесей в морских водах с помощью оперативной спектрофотометрии // *Океанология.* 2017. Т. 57, № 4. С. 560–574.
6. Ростовцева В.В. Метод получения спектров поглощения морской воды по данным пассивного дистанционного зондирования с борта судна с использованием свойств чистой воды // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 11. С. 1003–1011; *Rostovtseva V.V.* Method for sea water absorption spectra estimation on the basis of shipboard passive remote sensing data and pure sea water properties // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 2. P. 162–170.
7. 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 атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 12. С. 1017–1022; *Rostovtseva V.V., Goncharenko I.V., Kononov B.V., Alukaeva A.F.* Rapid estimation of the ecological state of coastal water areas based on shipboard passive remote optical sensing of the water surface // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 225–231.
8. Zavalov P.O., Izhitskiy A.S., Kirillin G.B., Khan V.M., Kononov B.V., Makkaveev P.N., Pelevin V.V., Rimskiy-Korsakov N.A., Alymkulov S.A., Zhumaliev K.M. New profiling and mooring records help to assess variability of Lake Issyk-Kul and reveal unknown features of its thermohaline structure // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2018. V. 22. P. 6279–6295.
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.

V.V. Rostovtseva, I.V. Goncharenko, B.V. Kononov. **Biooptical characteristics of lake Issyk-Kul upper layer waters using data of operative sensing from board a vessel with the optical passive complex EMMA.**

Data of optical characteristics of lake Issyk-Kul measured with the complex for passive remote sensing Ecological Monitoring of Marine Areas (EMMA) from board a vessel as well as measurement data obtained for water samples allowed us to develop and validate a new technique for oligotrophic water content estimation. This technique is the third part of the method for remote estimation of the main natural constituents concentration in sea or lake waters using light absorption spectrum of pure sea water. The method was suggested by us earlier for mesotrophic and eutrophic waters. Using this technique the estimates of concentration of phytoplankton, colored organic matter, and suspended matter and their distribution over the lake during the three-day experiment in July, 2018, were obtained.

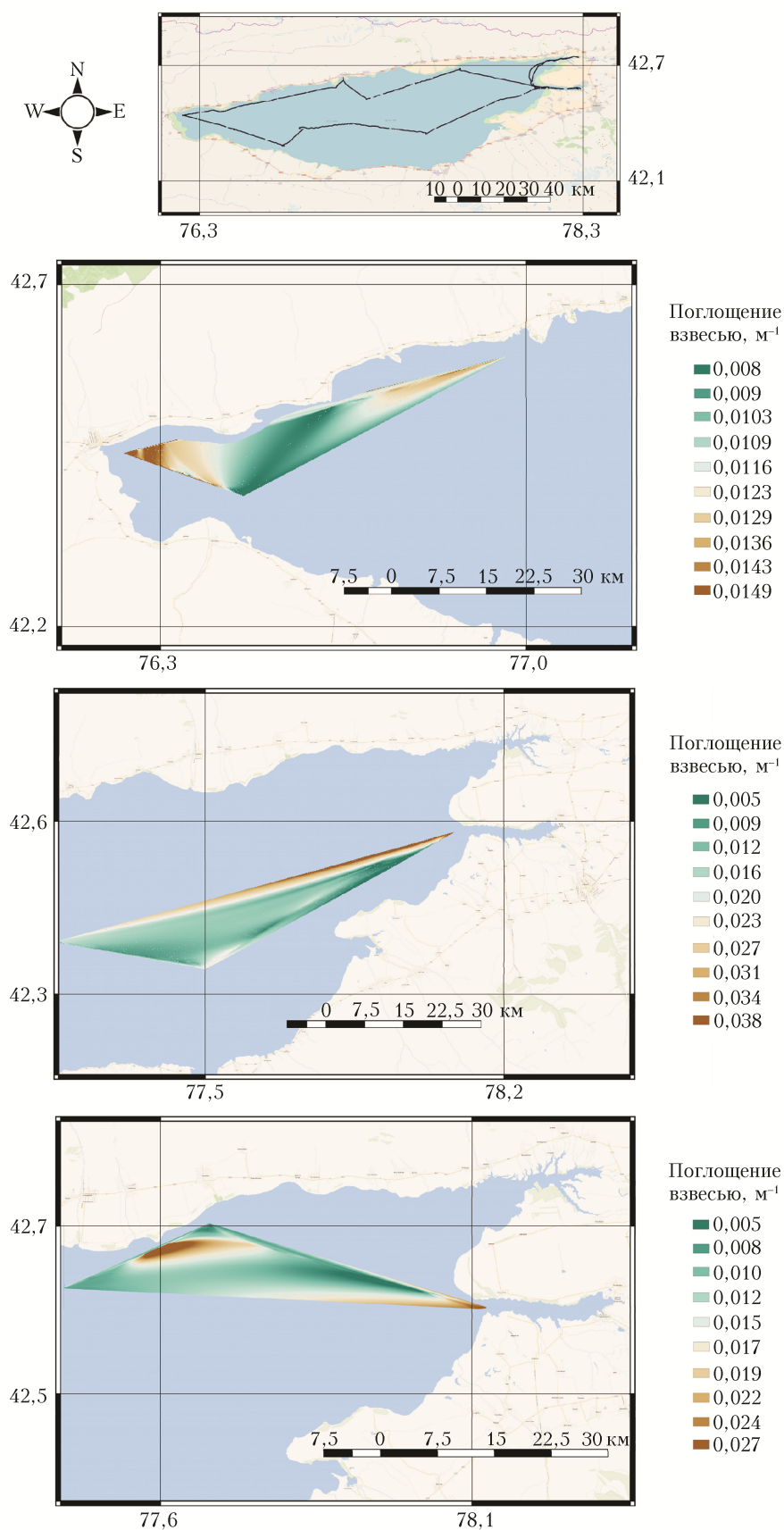


Рис. 7. Маршрут следования судна и распределение взвешенного вещества по акватории оз. Иссык-Куль, полученное по дистанционным данным комплекса ЭММА за три световых дня