

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА СМЕШЕНИЯ АЗОВОМОРСКИХ И ЧЕРНОМОРСКИХ ВОД В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ ПО ДАННЫМ КОМПЛЕКСНЫХ ДИСТАНЦИОННЫХ И КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

**В. В. Ростовцева, А. С. Ижицкий, Б. В. Коновалов**

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,  
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,  
e-mail: vera@ocean.ru*

По данным трехканального гиперспектрометра, разработанного для проведения дистанционных пассивных оптических наблюдений с борта движущегося судна с частотой 1 Гц, получена картина распределения районов повышенной мутности в Керченском проливе. Сопоставление этих результатов с анализом температуры, солености и направления течения вод по глубине на станциях, а также с измерениями проточных систем, позволило сделать вывод об отнесении различных районов к азовоморским или к черноморским водным массам. Показано, что проникновение азовоморских вод в Черное море при относительно слабом северо-восточном ветре идет струями, в некоторых местах ширина самих струй и районов перехода между ними не превышает нескольких сотен метров. Наиболее сильно имеющиеся типы вод в проливе различаются по концентрации взвеси, что может быть результатом антропогенного воздействия. Получение экспресс-информации о составе вод по данным комплексных измерений при движении судна и на станциях является важным при необходимости оценки возможного распространения загрязняющих факторов по акватории Керченского пролива и у побережья Черного моря.

**Ключевые слова:** Азовское море, Черное море, перенос водных масс, пассивное оптическое зондирование, коэффициент спектральной яркости моря, концентрация взвешенного вещества, концентрация пигментов фитопланктона, концентрация растворенной органики

### Введение

Актуальной задачей является исследование характера перемещения и состава вод в проливах и устьях рек, так как многие из них становятся потенциальным, либо уже существующим, источником загрязнений прибрежных районов. В акватории Черного моря проведены работы по исследованию районов впадения малых рек (Бондур, Гребенюк, 2001; Айбулатов и др., 2008), используются также результаты натуральных измерений у Босфорского пролива (Gregg et al., 1999; Gregg, Özsoy, 2002; Sözer, Özsoy, 2017) и в районе плюма Дуная (Constantin et al., 2016). На севере Черного моря одним из источников загрязнения вод является Керченский пролив (Завьялов и др., 2022). Изучение его состояния по спутниковым снимкам и контактной информации продемонстрировало достаточно сложный характер смешения вод двух морей (Чепыженко и др., 2015; Kubryakov et al., 2019). Кроме того было показано, что поступающий

из пролива сток вод Азовского моря распространяется на большие расстояния, оказывая влияние в том числе и на прибрежные районы Крымского полуострова (Ижицкий, Завьялов, 2017; Zavalov et al., 2020). Также хорошо известно, что район Керченского пролива является зоной постоянного нефтяного загрязнения (Ломакин и др., 2016; Митягина и др., 2015; Немировская и др., 2019). Структура течений Керченского пролива, в отличие от многих других проливов и устьев рек, характеризуется сильной неоднородностью как по вертикали, так и по горизонтали. Ветровая обстановка, местный нагрев и соленость вод определяют здесь направление и скорость течений в большей степени, чем расход вод рек, впадающих в Азовское море. Так, если в апреле 2019 г. по результатам ADCP-съемки было показано, что азовоморские воды втекают в Черное море у западного побережья, а черноморские воды движутся в Азовское море у восточного побережья пролива (Завьялов и др., 2021), то, как показали исследования этого же года в сентябре, картина существенно поменялась. Такая изменчивость не позволяет говорить о среднем переносе через пролив, а требует дополнительных исследований. Спутниковые наблюдения дают необходимую информацию в тех случаях, когда погодные условия не препятствуют съемке из космоса. Однако при каждом изменении состояния вод в районе исследований (например, при увеличении стока рек в весенний период или изменении ветровой обстановки, ведущей к возникновению апвеллингов и даунвеллингов) эти наблюдения требуют проведения подспутниковых измерений (Jiang et al., 2020).

В сентябре 2019 г. в Керченском проливе были проведены комплексные гидрофизические исследования с целью выявления подробной структуры и перемещения водных масс и определения их характеристик. Проточная система измерения температуры и солености приповерхностных вод, а также трехканальный гиперспектральный комплекс, позволили отслеживать изменения основных параметров в непрерывном режиме по ходу движения судна. На станциях проводились измерения температуры и солености вод по глубине и определялась глубина видимости диска Секки. Полученные результаты позволили охарактеризовать процесс смешения вод в Керченском проливе и сделать вывод о необходимых методах сбора данных при подспутниковых измерениях.

### Методы исследования

Гидрофизические измерения были проведены с борта НИС в течение нескольких световых дней как при движении судна, так и на станциях в начале сентября 2019 г. Температура и соленость в приповерхностном слое измерялись вдоль курса судна с помощью проточной системы, состоящей из подающего забортную воду центробежного насоса производительностью около 1 л/с и CTD-зонда *YSI 6600*, уложенного в специальный контейнер емкостью 30 л на палубе. Частота опроса датчиков CTD-зонда составляла 1 Гц. Вертикальные профили температуры и солености измерялись посредством вертикальных CTD-зондирований на станциях зондом *SBE 19plus*.

Кроме того, на каждой станции с поверхностного горизонта отбирались пробы воды, которые фильтровались, а затем путем спектрофотометрической обработки фильтров получались данные о концентрации природных компонент в исследуемой взвеси (Коновалов и др., 2014). Измерения на каждой станции дополнялись традиционным методом определения глубины видимости диска Секки.

По ходу движения судна в непрерывном режиме с борта работал комплекс дистанционного пассивного оптического зондирования вод ЭММА (Экологический Мониторинг Морских Акваторий), оснащенный гиросtabilизирующим подвесом (ось прибора была всегда перпендикулярна поверхности земли, вне зависимости от положения судна) (Гончаренко, Ростовцева, 2020). Оптическая часть прибора включает в себя три канала. Каждый канал оснащен спектрометром фирмы «Ocean Optics», имеющим следующие основные технические характеристики: спектральный диапазон – 350–800 нм, спектральное разрешение – 3 нм, отношение сигнал/шум – 1500:1, время интегрирования – от 10 мкс до 10 с. Прибор дает возможность измерения спектральной яркости восходящего над морем излучения  $B_{sea}$ , яркости участка неба, дающего наибольший вклад в отраженный сигнал  $B_{sky}$  и спектральной облученности поверхности моря Солнцем, откалиброванной в яркость горизонтального белого отражателя  $B_{ws}$ , а также фиксирует координаты точки измерения посредством вмонтированного GPS-приемника. Измерения проводились в автоматическом режиме с частотой 1 Гц одновременно в 3-х каналах, синхронно с записью GPS координат места каждого измерения.

## Результаты и обсуждение

Рассмотрим более подробно проведение измерений 04.09.2019. В этот день ветер поменялся от ночного штиля до северо-восточного ветра, к концу светового дня достигшего 4 м/с. Температурный градиент, измеренный STD-зондом проточной системы, указывает на пересечение судном различных водных масс, но принадлежность их в сентябре определить однозначно затруднительно, так как если в начале дня азовоморские воды холоднее черноморских, то в дальнейшем происходит общий нагрев, и, возможно, более мелководные акватории Азовского моря нагреваются быстрее вод Черного моря (рисунок 1а). Воды в проливе отличались по солености на несколько десятых промилле (рисунок 1б): менее соленые воды наблюдались в самых северных областях маршрута, а также у восточного побережья пролива.

В то же время спектры КСЯ (Коэффициента Спектральной Яркости), получаемые по трем спектрам яркости, измеряемым одновременно комплексом пассивного оптического зондирования ЭММА, сильно отличались друг от друга (рисунок 2):

$$\text{КСЯ} = (B_{sea} - r \cdot B_{sky}) / B_{ws}$$

Для характеристики этих спектров был введен параметр «ступеньки»  $p$ :

$$p = (\text{КСЯ}_{540} - \text{КСЯ}_{580}) / (\text{КСЯ}_{580} - \text{КСЯ}_{600}).$$

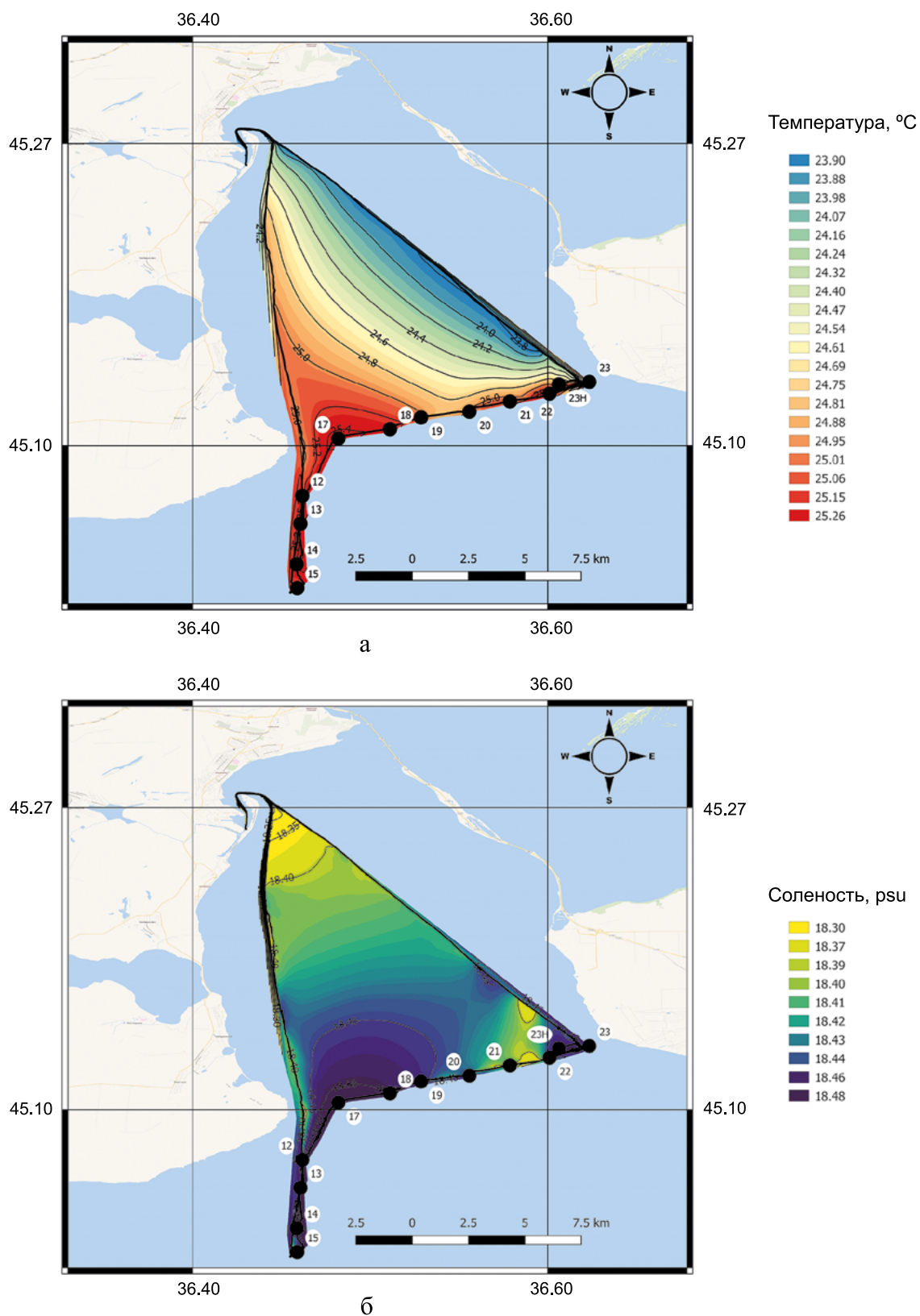


Рис. 1 – Результаты измерения температуры (а) и солёности (б) приповерхностного слоя воды проточной системой с СТД-зондом по маршруту движения НИС 04.09.2019. Цифрами обозначены станции

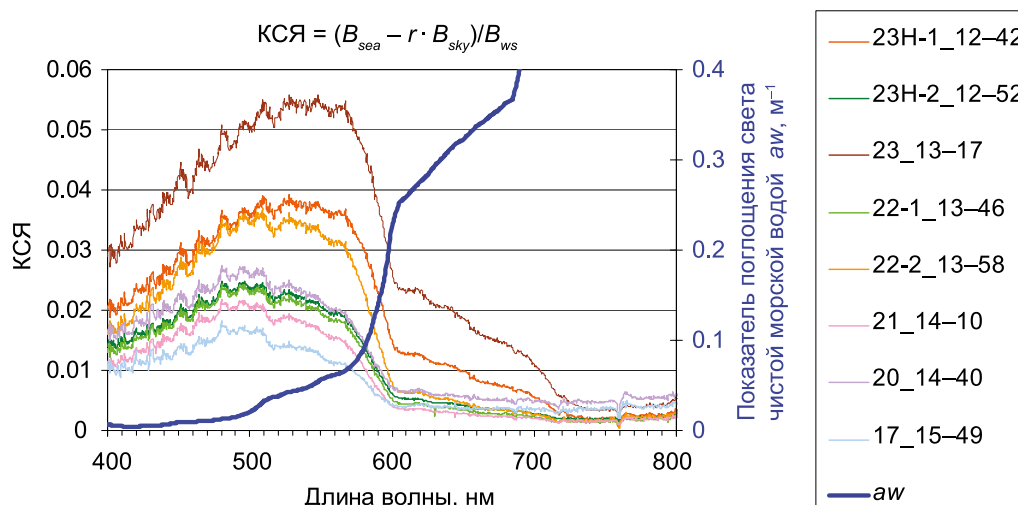


Рис. 2 – Спектры КСЯ, измеренные комплексом ЭММА во время станций по маршруту 04.09.2019. Синей линией дан спектр показателя поглощения света морской водой без примесей

Этот параметр имеет определенный физический смысл: КСЯ отражает долю света, которую возвращает слой воды к поверхности на данной длине волны. Эта величина, естественно, зависит от поглощения света водой, представляющего собой сумму поглощения света чистой водой и поглощения света природными примесями (пигментами фитопланктона, растворенным органическим веществом и взвесью). Поглощение света чистой водой имеет в диапазоне 540–600 нм вид «ступеньки» (см. рисунок 2) (Pore, Fry, 1997), а поглощение примесями – монотонно убывает. Эта «ступенька» тем ярче проявляется в спектре КСЯ, чем меньше концентрация примесей: в чистых океанских водах параметр  $r$  превосходит 1.5, с увеличением количества примесей он уменьшается.

На рисунке 3 показано изменение величины параметра  $r$  при движении судна поперек пролива к восточному берегу, а затем в обратном направлении. Видно, что величина этого параметра существенно варьирует и позволяет отслеживать резкие изменения состава вод на длине в несколько десятков метров по ходу перемещения НИС. Наиболее резкие переходы наблюдались при движении НИС к восточному берегу на 36.57 град в. д., у восточного побережья (36.60 град в. д.) и при движении южнее от восточного побережья к западному на 36.54 град в. д.

Выполненные на поперечном разрезе 04.09.2019 станции позволили охарактеризовать типы вод, пользуясь данными по глубине (рисунок 4). На станции 23, ближайшей к побережью, как температура, так и соленость воды на всех уровнях по глубине была выше, чем температура и соленость на соседней станции (23Н), при этом, так как измерения на этих станциях проводились с интервалом не более получаса, обнаруженные отличия можно объяснить только присутствием различных типов вод на этом участке. Воды с более высокой температурой и соленостью, очевидно, содержали большую долю черноморских вод, более холодные и распресненные воды – азовоморских вод.

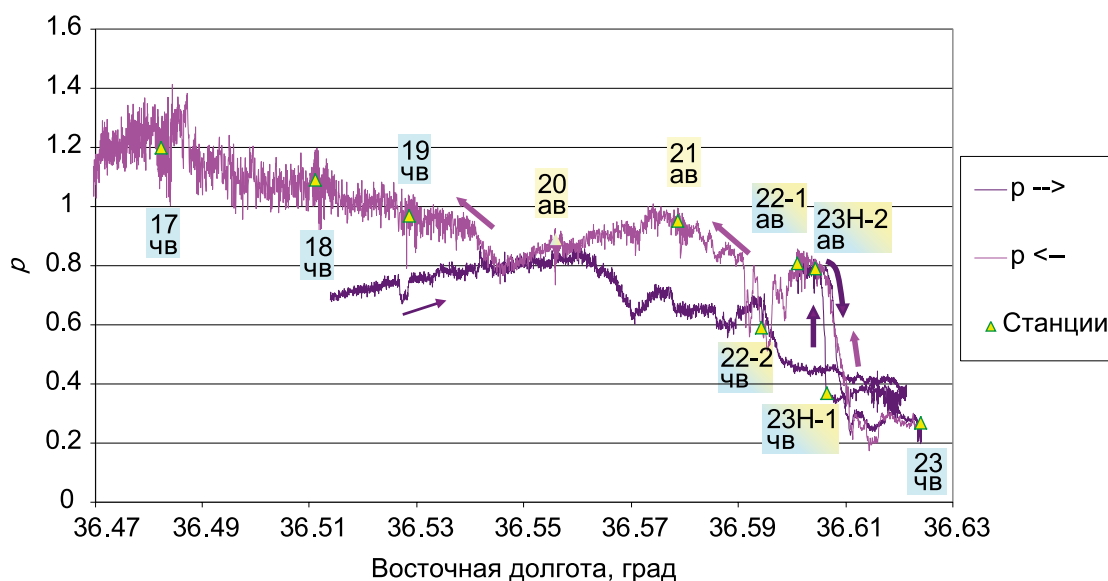


Рис. 3 – Изменение значений параметра «ступеньки»  $p$ , посчитанного по данным комплекса ЭММА, при перемещении НИС через пролив с запада на восток и обратно. Треугольники показывают средние значения  $p$  на станциях 17–21, 23, для станций 22 и 23Н показаны значения  $p$  в начале и в конце станции

В дальнейшем для краткости будем обозначать их как азовоморские и черноморские воды, хотя понятно, что речь идет о большей доле тех или иных вод в водной массе. Таким образом, на станции 23 наблюдались черноморские воды, а на станции 23Н, отстоящей от станции 23 на 1.5 км, – азовоморские. Дальнейший анализ данных, полученных на станциях, показал, что на станции 22 измерения по глубине проводились в двухслойной структуре – у поверхности располагались более соленые и теплые черноморские воды, а глубже – азовоморские воды. Далее станции 21 и 20 находились в азовоморских водах, на станциях 19, 18 и 17 соленость опять возрастала, что говорит об увеличении доли черноморских вод (повышение температуры, возможно, было связано с общим дневным прогревом воды).

Для сравнения данных с комплекса ЭММА с измерениями на станциях необходимо было точно определить время начала и конца станции. Это представляет некоторые трудности, так как указывается только среднее время каждой станции, а их длительность, как правило, составляет 10–20 минут. Для точной привязки станций ко времени были использованы данные GPS комплекса ЭММА: при остановке НИС на станцию координаты практически не изменяются – это позволяет выявить время начала и конца станции с точностью до минуты.

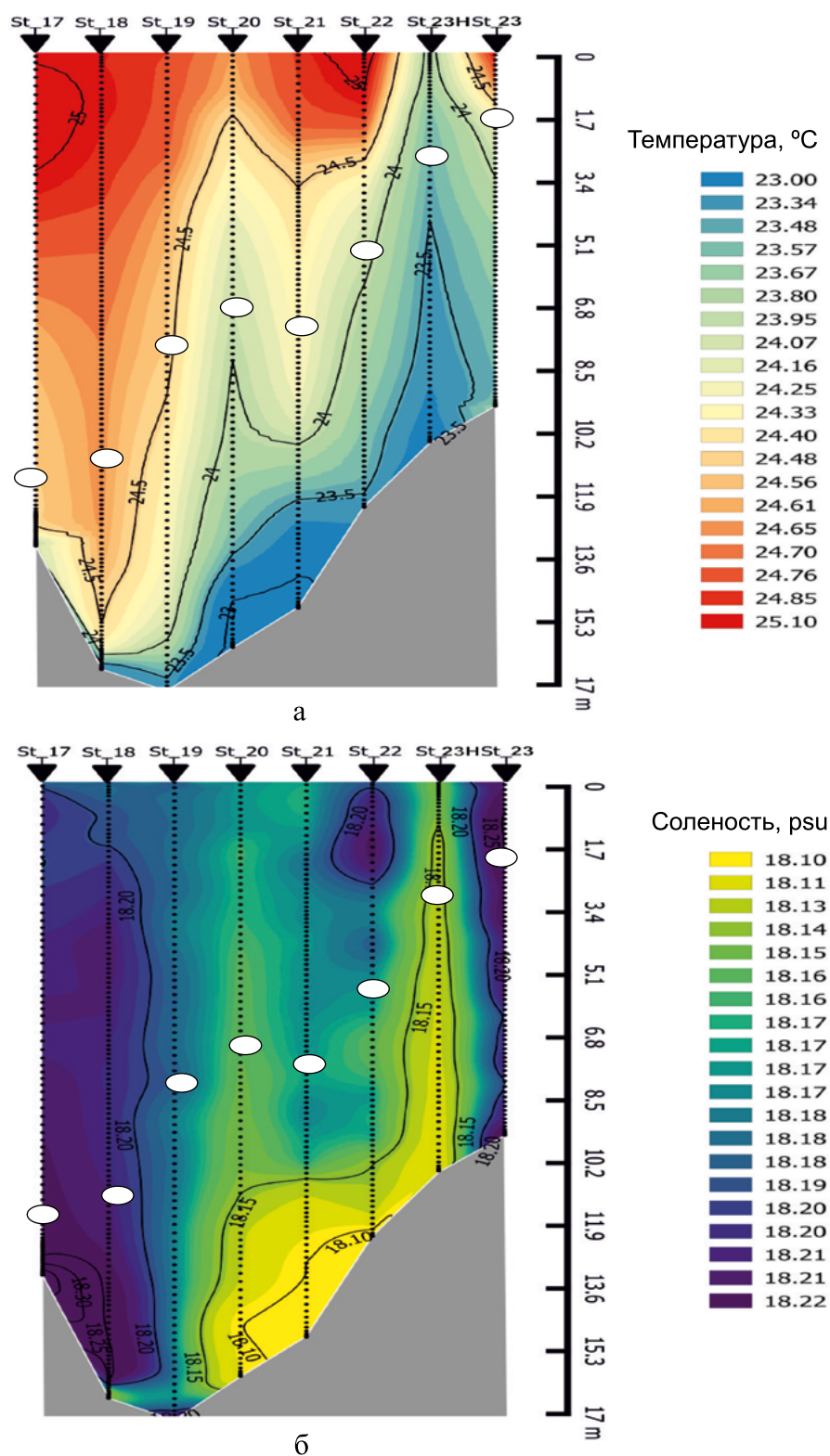


Рис. 4 – Распределение температуры (а) и солености (б) вод по глубине и глубина видимости диска Секки, измеренные на станциях 04.09.2019



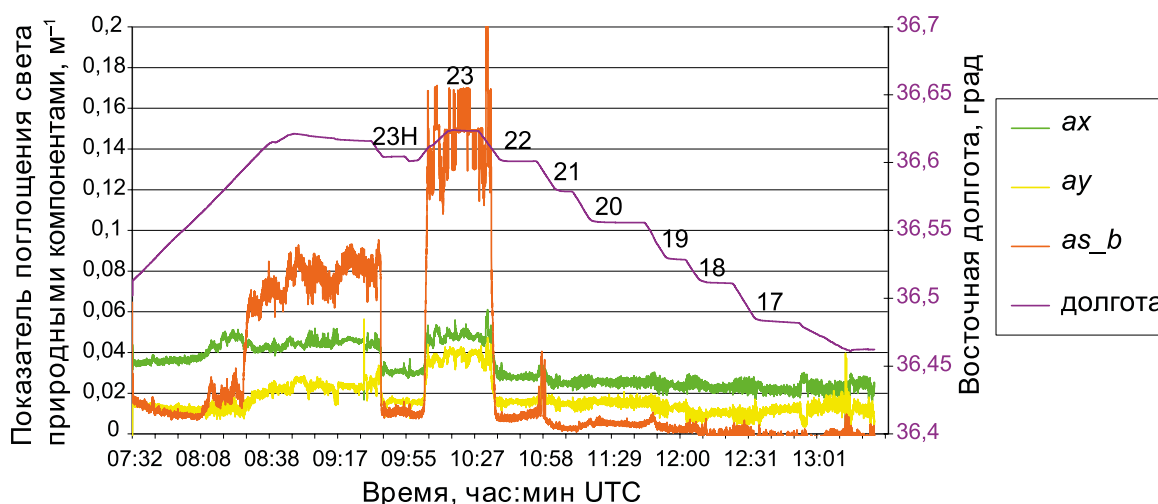


Рис. 5 – Определение начала и конца станции по координате. Показатели поглощения света природными компонентами, полученными по данным комплекса ЭММА 04.09.2019: показатели поглощения взвесью ( $as\_b$ ), пигментами фитопланктона на 440 нм ( $ax$ ) и окрашенным органическим веществом на 500 нм ( $ay$ )

На рисунке 5 приведены изменения значений долготы со временем при пресечении пролива с запада на восток и обратно – хорошо видно положение и длительность станций 23Н, 23–17. По выявленному таким образом времени начала и конца каждой станции положение их наносится на график зависимости параметра «ступеньки»  $p$  от долготы (рисунок 3). Видно, что станции 23Н и 22 находятся в зонах перехода от одних вод к другим, где  $p$  меняется существенно, следовательно, полученные на этих станциях оценки могут относиться к разным типам вод. Этот факт необходимо учитывать при сравнении с данными посекундной оценки параметров. Видно, что линию раздела двух типов вод между станциями 23 и 22, наиболее хорошо видную по резким изменениям параметра «ступеньки»  $p$ , пересекали три раза практически на одной и той же долготе. Кроме того, резкий переход от одного типа вод к другому наблюдался в районе станции 22 и между 20-й и 19-й станциями. По этим графикам можно оценить толщину границы раздела: примерно 400–600 м.

Используя разработанный нами ранее алгоритм для оценки концентрации основных природных компонент морской воды по спектрам КСЯ в диапазоне 400–700 нм с учетом величины параметра «ступеньки»  $p$  (Ростовцева, 2015), были рассчитаны концентрации трех величин в единицах поглощения света:

$as\_b$  – поглощение света взвесью, имеющее неселективный спектр в данном спектральном диапазоне;

$ay$  – поглощение света окрашенным органическим веществом на длине волны 500 нм (растворенным в воде и в детрите), имеющее экспоненциально убывающий с длиной волны спектр ( $ay(la) = ay \cdot \exp(-g \cdot (la - 500))$ ,  $g = 0.015$ );

$ax$  – поглощение света пигментами фитопланктона на длине волны 440 нм, имеющее колоколообразный спектр ( $ax(la) = ax \cdot \exp(-((la - 440)^2 / (2 \cdot della^2)))$ ,  $della = 40$ ).



Результаты расчета приведены на рисунке 5. При движении к восточному берегу (к станции 23) были получены максимальные значения концентраций природных компонент морской воды: здесь отмечается рост концентрации окрашенного органического вещества и, особенно, взвеси, при сравнительной стабильности концентрации фитопланктона, что, очевидно, связано с близостью береговой линии и преимущественным направлением движения вод к побережью по данным ADCP.

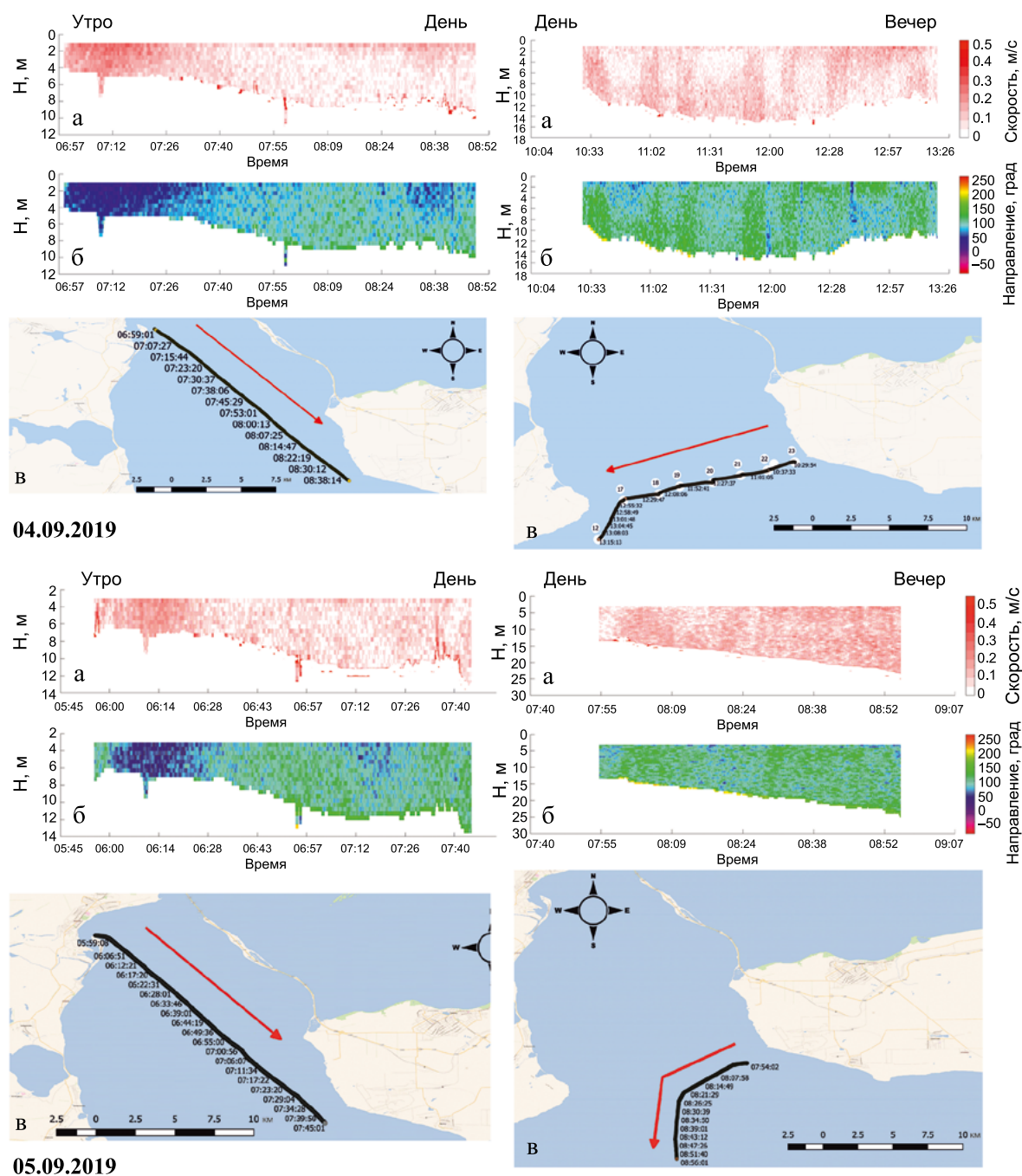


Рис. 6 – Скорость (а) и направление течения (б) по данным ADCP, полученным по маршруту движения судна (в) 04.09.2019 и 05.09.2019

Измерения скорости и направления потоков при помощи ADCP показывают, что в начале дня в западной части пролива наблюдалось движение черноморских вод в северном направлении, которое с течением времени ослабело и перешло в противоположное ему течение в восточной части пролива, причем имеющее характерную «полосатую» структуру, особенно явную у восточного побережья (рисунок 6). Здесь к тому же верхние и нижние слои двигались в разных направлениях. Это подтверждает тот факт, что продвижение вод в проливе идет струями, отличающимися по скорости и по направлению.

Ранее на примере всесторонних исследований концентрации природных компонент морской воды в Каспийском море нами был разработан алгоритм отсева проб воды с поверхности не отражающих состав вод по всей глубине (Ростовцева и др., 2021). Для проверки целесообразности использования всех проб для калибровки результатов, полученных дистанционно, сравним данные по концентрации взвеси в пробах и величины, обратные глубине видимости диска Секки (рисунок 7а).

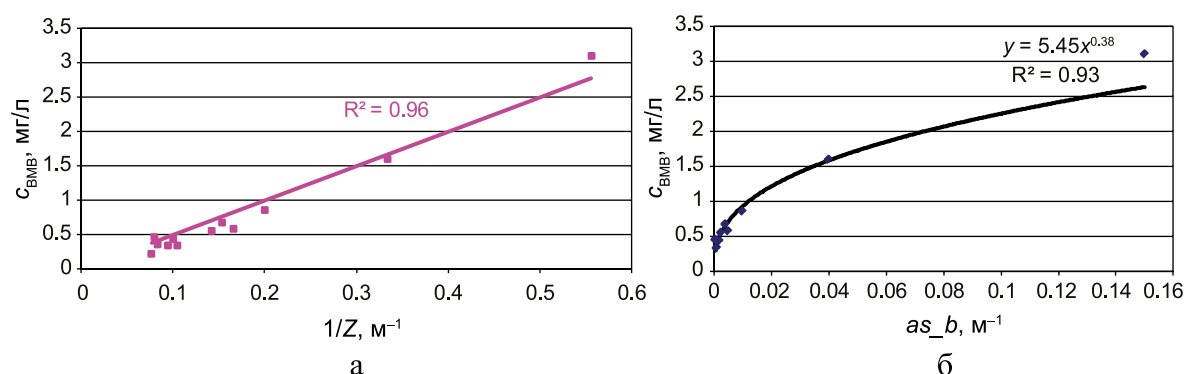


Рис. 7 – Сравнение концентрации минеральной взвеси, полученной в пробах, с величиной, обратной глубине видимости диска Секки на тех же станциях (а).

Калибровка значений концентрации взвеси в единицах поглощения света, рассчитанных по данным пассивного оптического комплекса ЭММА, по значениям концентрации в единицах мг/л, полученных в пробах (б)

Видно, что эти величины линейно пропорциональны друг другу с высоким коэффициентом детерминации, следовательно, все концентрации в пробах можно использовать в качестве оценок среднего по глубине видимости показателя поглощения света взвесью. На рисунке 7б значения показателя поглощения, полученного комплексом ЭММА в точках забора проб, соотносятся со значениями в пробах: видно, что в более мутных водах, где глубина видимости диска Секки не больше 5 м, оценки ЭММА превосходят соответствующие оценки в пробах, предположительно из-за наличия многократного отражения. Поэтому для калибровки этих данных и перевода значений концентрации в единицах поглощения света в единицы плотности можно использовать степенную функцию.

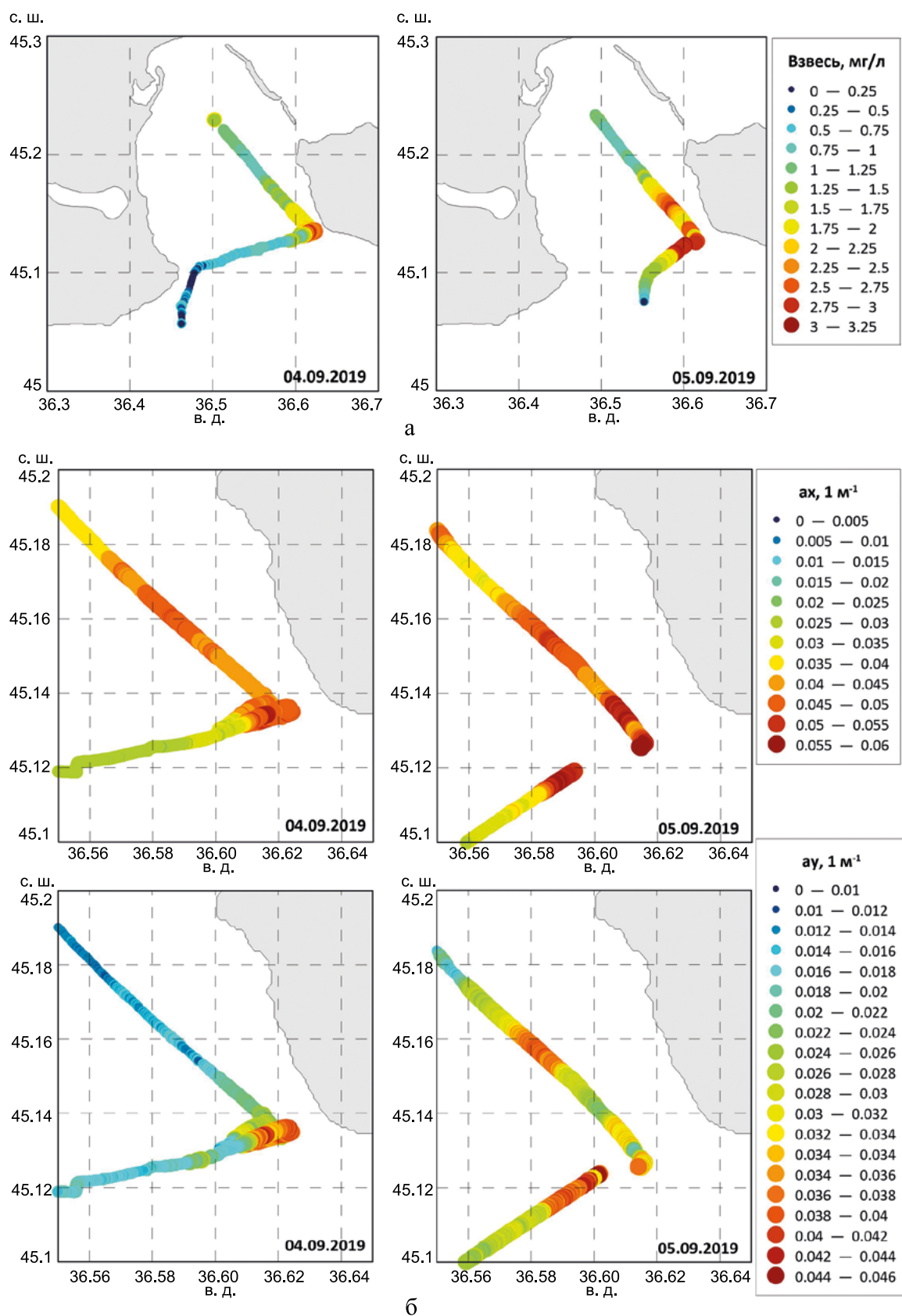


Рис. 8 – Распределение взвеси (а) и концентрации пигментов фитопланктона и окрашенного органического вещества (б) в Керченском проливе по данным измерений комплексом ЭММА 4 и 5 сентября 2019 г.

На рисунке 8 дано пространственное распределение концентрации взвеси по акватории Керченского пролива в дни проведения измерений 4 и 5 сентября. По метеоданным, 4 сентября днем появился устойчивый северо-восточный ветер, который усилился на следующий день до 6 м/с. Согласно данным ADCP, в эти дни преобладающим направлением перемещения вод в восточной части пролива был выход азово-морских вод в Черное море (рисунок 6), причем 05.09.2019 движение вод шло более упорядоченным потоком. Поэтому 5 сентября соленость вод на том же маршруте на поверхности несколько уменьшилась, а концентрация окрашенной растворенной органики и пигментов фитопланктона увеличилась (рисунок 8б). В то же время в центральной и восточной частях пролива наблюдались еще более мутные воды, чем 4 сентября, что не объяснялось ни притоком вод из центральной части пролива, ни началом сильного шторма. По-видимому, это было результатом антропогенного воздействия, а именно сбросом грунта у восточного побережья, возможно, при строительстве моста. Распространение мутных вод хорошо видно на снимке спутника Landsat 05.09.2019 (рисунок 9), причем такого распределения на снимках в сентябре 2020 года уже не наблюдается.



Рис. 9 – Снимок со спутника Landsat 05.09.2019

### Заключение

Проведенные комплексные исследования взаимодействия вод Азовского и Черного морей в Керченском проливе продемонстрировали их сложную структуру как по горизонтали, так и по глубине. Показано, что при слабом северо-восточном ветре в основном идет перенос азовоморских вод в Черное море в восточной части пролива. Причем, если 04.09.2019 при появлении устойчивого северо-восточного ветра перемещение азовоморских вод наиболее интенсивно идет струями в нижних слоях, то при усилении ветра 05.09.2019 до 6 м/с перемещение вод идет по всей глубине, струи сливаются. Для выбора мест проведения измерений на станциях необходимо учитывать сложную структуру смешения вод, что можно сделать с помощью проточной системы измерения температуры и солености, работающей на ходу судна. Однако, так как изменения солености и температуры в водах Керченского пролива весьма невелики, результаты этих наблюдений необходимо дополнять измерениями гиперспектральным оптическим комплексом, который дает спектры КСЯ с частотой 1 Гц по ходу движения судна. Параметр ступеньки  $p$ , вычисленный по этим спектрам, является очень чувствительным к изменению состава вод и позволяет выделять районы перехода от одних типов вод к другим. Оценки концентрации природных компонент по полученным спектрам КСЯ дают распределения взвеси, растворенной органики и пигментов фитопланктона в прибрежных водах. Показано, что концентрация взвеси в восточной части пролива в сентябре 2019 года различалась в 3–5 раз из-за антропогенного эффекта, а ее распределение даже при небольшом ветре (до 6 м/с) соответствовало положению струй. Это важно учитывать при оценке возможного загрязнения акватории.

**Благодарности.** Работа выполнялась по госзаданию FMWE-2021-0001 (обработка результатов наблюдений), а также по проекту РФФ 21-17-00191 (сравнительный анализ результатов комплексного исследования смешения вод в Керченском проливе). Авторы выражают глубокую благодарность руководителю этого этапа экспедиции Гончаренко Игорю Владимировичу, ныне покойному. Также благодарят рецензента за своевременное указание на возможность антропогенного генезиса резкого увеличения взвешенного вещества в водах Керченского пролива.



### Список литературы

1. Айбулатов Н. А., Завьялов П. О., Пелевин В. В. Особенности гидрофизического самоочищения российской прибрежной зоны Черного моря близ устьев рек // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2008. № 4. С. 301–310.
2. Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В. Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67.
3. Гончаренко И. В., Ростовцева В. В. Пассивное оптическое зондирование речных плюмов с борта судна с помощью гиростабилизированного комплекса ЭММА // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 2. С. 96–102. <https://doi.org/10.7868/S2073667320020124>.
4. Завьялов П. О., Завьялов И. Б., Ижицкий А. С., Ижицкая Е. С., Коновалов Б. В., Кременецкий В. В., Немировская И. А., Часовников В. К. Оценка загрязнения Керченского пролива и прилегающей акватории Черного моря по данным натурных измерений 2019–2020 гг. // Океанология. 2022. Т. 62. № 2. С. 194–203.
5. Завьялов И. Б., Осадчиев А. А., Завьялов П. О., Кременецкий В. В., Гончаренко И. В. Исследование водообмена в Керченском проливе по историческим данным и данным контактных измерений 2019 г. // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 377–386.
6. Ижицкий А. С., Завьялов П. О. Гидрофизическое состояние вод Феодосийского залива в мае 2015 г. // Океанология. 2017. Т. 57. № 4. С. 538–545.
7. 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. № 4. С. 1–9.
8. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., Чепыженко А. А. Поле концентрации растворенного органического вещества в Азовском море и Керченском проливе на базе оптических наблюдений // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 5. С. 76–88.
9. Митягина М. И., Лаврова О. Ю., Бочарова Т. Ю. Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 130–149.
10. Немировская И. А., Онегина В. Д., Коновалов Б. В., Лисицын А. П. Происхождение углеводородов во взвеси и донных осадках в районе Крымского полуострова // ДАН. 2019. Т. 484. № 5. С. 600–604.
11. 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.
12. Ростовцева В. В., Ижицкий А. С., Гончаренко И. В., Коновалов Б. В., Завьялов П. О. О влиянии гидрофизических условий на репрезентативность гидрооптических измерений на примере прибрежных районов Среднего Каспия // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 9. С. 696–704. <https://doi.org/10.15372/AOO20210905>.
13. Чепыженко А. А., Чепыженко А. И., Кушнир В. М. Структура вод Керченского пролива по данным контактных измерений и космических съемок // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. С. 56–56.
14. Constantin S., Doxaran D., Constantinescu S. Estimation of water turbidity and analysis of its spatio-temporal variability in the Danube River plume (Black Sea) using MODIS satellite data // Continental shelf research. 2016. Vol. 112. P. 14–30.
15. Gregg M. C., Özsoy E., Latif M. A. Quasi-steady exchange flow in the Bosphorus // Geophysical Research Letters. 1999. Vol. 26. No. 1. P. 83–86.

16. *Gregg M. C., Özsoy E.* Flow, water mass changes, and hydraulics in the Bosphorus // *J. Geoph. Res. Oceans.* 2002. Vol. 107. C3. <https://doi.org/10.1029/2000JC000485>.
17. *Jiang G., Loiselle S. A., Yang D., Ma R., Su Wen., Gao Ch.* Remote estimation of chlorophyll a concentrations over a wide range of optical conditions based on water classification from VIIRS observations // *Remote Sensing of Environment.* 2020. Vol. 241 (4). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111735>.
18. *Kubryakov A. A., Aleskerova A. A., Goryachkin Y. N., Stanichny S. V., Latushkin A. A., Fedirko A. V.* Propagation of the Azov Sea waters in the Black sea under impact of variable winds, geostrophic currents and exchange in the Kerch Strait // *Progress in Oceanography.* 2019. Vol. 176. 102119. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.05.011>.
19. *Pope R. M., Fry E. S.* Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. Integrating cavity measurements // *Appl. Opt.* 1997. Vol. 36. P. 8710–8723.
20. *Sözer A., Özsoy E.* Water Exchange through Canal İstanbul and Bosphorus Strait // *Mediterranean marine Science.* 2017. Vol. 18. P. 77–86.
21. *Zavialov I., Osadchiev A., Sedakov R., Barnier B., Molines J. M., Belokopytov V.* Water exchange between the Sea of Azov and the Black Sea through the Kerch Strait // *Ocean Science.* 2020. Vol. 16 (1). P. 15–30.

Статья поступила в редакцию 10.10.2022, одобрена к печати 07.11.2022.

**Для цитирования:** Ростовцева В. В., Ижицкий А. С., Коновалов Б. В. Определение характера смешения азовоморских и черноморских вод в Керченском проливе по данным комплексных дистанционных и контактных измерений // *Океанологические исследования.* 2022. № 50 (3). С. 70–87. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(3\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(3).4).



## CHARACTERIZING OF AZOV SEA AND BLACK SEA WATER MASSES MIXING IN THE KERCH STRAIT USING INTEGRATED REMOTE AND CONTACT MEASUREMENTS

V. V. Rostovtseva, A. S. Izhitskiy, B. V. Kononov

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,  
e-mail: vera@ocean.ru*

Based on data of the three-channel hyperspectrometer designed for remote passive optical observations from a moving vessel at a frequency of 1 Hz, a distribution of areas of increased turbidity in the Kerch Strait was obtained. Comparison of these results with the analysis of temperature, salinity, and direction of water flow in depth measured at the stations, as well as with the flow system data made it possible to attribute various areas of the strait to the Azov Sea or the Black Sea water masses. It is shown that the penetration of the Azov Sea waters into the Black Sea at a relatively weak northeast wind proceeds in jets, in some places, the width of the jets themselves and the transition areas between them does not exceed several hundred meters. The different types of waters in the strait differ most strongly in the concentration of suspended matter which might be the result of the anthropogenic influence. Obtaining express information on the composition of waters based on complex measurements during vessel movement and at stations is important if it is necessary to assess the possible spread of polluting factors in the water area of the Kerch Strait and off the Black Sea coast.

**Keywords:** Azov Sea, Black Sea, transport of the water masses, passive optical remote sensing, spectral radiation coefficient of the sea, concentration of suspended matter, concentration of phytoplankton pigments, concentration of dissolved organic matter

**Acknowledgement:** The work was carried out within the framework of the State Assignment FMWE-2021-0001 (processing of observational data), as well as with the support of Russian Scientific Fund project 21-17-00191 (comparative analysis of the results of a complex study of water mixing in the Kerch Strait). The authors express their deep gratitude to the leader of this stage of the expedition, Igor Vladimirovich Goncharenko, now deceased. The authors also thank one of the referees for the relevant indication of the possibility of anthropogenic genesis of a sharp suspended matter increase in the waters of the Kerch Strait.

### References

1. Aibulatov, N. A., P. O. Zavialov, and V. V. Pelevin, 2008: Osobennosti gidrofizicheskogo samoochishcheniya rossiyskoy pribrezhnoy zony Chernogo morya bliz ust'yev rek (Features of hydrophysical self-purification of the Russian coastal zone of the Black Sea near river mouths). *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, **4**, 301–310 [in Russian].
2. Bondur, V. G. and U. V. Grebenyuk, 2001: Distantionnaya indikatsiya antropogennykh vozdeystviy na morskuyu sredu, vyzvannykh zaglublennymi stokami: modelirovaniye,

- eksperimenty (Remote indication of anthropogenic impacts on the marine environment caused by buried runoff: modeling, experiments). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, **6**, 49–67 [in Russian].
3. Chepyzhenko, A. A., A. I. Chepyzhenko, and V. M. Kushnir, 2015: Struktura vod Kerchenskogo proliva po dannym kontaktnykh izmereniy i kosmicheskikh s'yemok (Strait of Kerch Water Structure Derived from the Data of Contact Measurements and Satellite Imagery). *Oceanology*, **55** (1), 47–55, <https://doi.org/10.1134/S0001437015010038> [in Russian].
  4. Constantin S., D. Doxaran, and S. Constantinescu, 2016: Estimation of water turbidity and analysis of its spatio-temporal variability in the Danube River plume (Black Sea) using MODIS satellite data. *Continental shelf research*, **112**, 14–30, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.11.009>.
  5. Goncharenko, I. V. and V. V. Rostovtseva, 2020: Passivnoye opticheskoye zondirovaniye rechnykh plyumov s borta sudna s pomoshch'yu girostabilizirovannogo kompleksa EMMA (Passive optical sensing of river plumes from board of a vessel using gyro-stabilized complex EMMA). *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, **13** (2), 96–102, <https://doi.org/10.7868/S2073667320020124> [in Russian].
  6. Gregg, M. C., E. Özsoy, and M. A. Latif, 1999: Quasi-steady exchange flow in the Bosphorus. *Geophysical Research Letters*, **26** (1), 83–86.
  7. Gregg, M. C. and E. Özsoy, 2002: Flow, water mass changes, and hydraulics in the Bosphorus. *J. Geoph. Res. Oceans*, **107** (C3), <https://doi.org/10.1029/2000JC000485>.
  8. Izhitskiy, A. S. and P. O. Zavialov, 2017: Gidrofizicheskoye sostoyaniye vod Feodosiyskogo zaliva v maye 2015 g. (Hydrophysical State of the Gulf of Feodosia in May, 2015). *Oceanology*, **57** (4), 485–491, <https://doi.org/10.1134/S0001437017040105> [in Russian].
  9. Jiang, G., S. A. Loiselle, D. Yang, R. Ma, Su Wen, and Ch. Gao, 2020: Remote estimation of chlorophyll a concentrations over a wide range of optical conditions based on water classification from VIIRS observations. *Remote Sensing of Environment*, **241** (4), <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111735>.
  10. Konovalov, B. V., M. D. Kravchishina, N. A. Belyaev, and A. N. Novigatsky, 2014: Opredeleniye kontsentratsii mineral'noy vzvesi i vzveshennogo organicheskogo veshchestva po ikh spektral'nomu pogloshcheniyu (Determination of the Concentration of Mineral Particles and Suspended Organic Substance Based on Their Spectral Absorption). *Oceanology*, **54** (5), 660–667, <https://doi.org/10.1134/S0001437014040067> [in Russian].
  11. Kubryakov, A. A., A. A. Aleskerova, Y. N. Goryachkin, S. V. Stanichny, A. A. Latushkin, and A. V. Fedirko, 2019: Propagation of the Azov Sea waters in the Black sea under impact of variable winds, geostrophic currents and exchange in the Kerch Strait. *Progress in Oceanography*, **176**, 102119. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.05.011>.
  12. Lomakin, P. D., A. I. Chepyzhenko, and A. A. Chepyzhenko, 2016: Pole kontsentratsii rastvorennogo organicheskogo veshchestva v Azovskom more i Kerchenskom prolive na baze opticheskikh nablyudeniy (Fields of the dissolved organic matter concentration in the Sea of Azov and the Kerch Strait waters based on optical observations). *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal (Marine Hydrophysical Journal)*, **5**, 76–88, <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-5-76-88> [in Russian].
  13. Mityagina, M. I., O. Yu. Lavrova, and T. Yu. Bocharova, 2015: Sputnikovyy monitoring neftnyykh zagryazneniy morskoy poverkhnosti (Satellite monitoring of oil pollution of the sea surface). *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa (Modern problems of remote sensing of the Earth from space)*, **12** (5), 130–149 [in Russian].
  14. Nemirovskaya, I. A., V. D. Onegina, B. V. Konovalov, and A. P. Lisitsyn, 2019: Proiskhozhdeniye uglevodorodov vo vzvesi i donnykh osadkakh v rayone Krymskogo poluostrova (Origin of hydrocarbons in suspended matter and bottom sediments near the Crimean Peninsula). *Doklady*

- Akademii Nauk (Doklady Earth Sciences)*, **484** (2), 189–193, <https://doi.org/10.31857/S0869-56524845600-604> [in Russian].
15. Pope, R. M. and E. S. Fry, 1997: Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. Integrating cavity measurements. *Appl. Opt.*, **36**, 8710–8723.
  16. Rostovtseva, V. V., 2015: Metod polucheniya spektrov pogloshcheniya morskoy vody po dannym passivnogo distantsionnogo zondirovaniya s borta sudna s ispol'zovaniyem svoystv chistoy vody (Method for sea water absorption estimation on the basis of shipboard passive remote sensing data and pure sea water properties). *Optika atmosfery i okeana (Atmospheric and Oceanic Optics)*, **29** (2), 162–170, <https://doi.org/10.15372/AOO20151107> [in Russian].
  17. Rostovtseva, V. V., A. S. Izhitskiy, I. V. Goncharenko, B. V. Konovalov, and P. O. Zavialov, 2021: O vliyaniy gidrofizicheskikh usloviy na reprezentativnost' gidroopticheskikh izmereniy na primere pribrezhnykh rayonov Srednego Kaspiya (On the influence of hydrophysical conditions on the representativeness of hydrooptical measurements on the example of the coastal regions of the Middle Caspian). *Optika atmosfery i okeana (Atmospheric and Oceanic Optics)*, **34** (6), 649–657, <https://doi.org/10.15372/AOO20210905> [in Russian].
  18. Sözer, A. and E. Özsoy, 2017: Water Exchange through Canal İstanbul and Bosphorus Strait. *Mediterranean marine Science*, **18** (1), 77–86, <https://doi.org/10.12681/mms.1877>.
  19. Zavialov, I., A. Osadchiv, R. Sedakov, B. Barnier, J. M. Molines, and V. Belokopytov, 2020: Water exchange between the Sea of Azov and the Black Sea through the Kerch Strait. *Ocean Science*, **16** (1), 15–30, <https://doi.org/10.5194/os-16-15-2020>.
  20. Zavialov, I. B., A. A. Osadchiv, P. O. Zavialov, V. V. Kremenetskiy, and I. V. Goncharenko, 2021: Issledovaniye vodoobmena v Kerchenskom prolive po istoricheskim dannym i dannym kontaktnykh izmereniy 2019 g. (Study of water exchange in the Kerch Strait based on historical data and contact measurements in 2019). *Oceanology*, **61** (3), 329–337, <https://doi.org/10.1134/S0001437021030176> [in Russian].
  21. Zavialov, P. O., I. B. Zavialov, A. S. Izhitskiy, E. S. Izhitskaya, B. V. Konovalov, V. V. Kremenetskiy, I. A. Nemirovskaya, and V. K. Chasovnikov, 2022: Otsenka zagryazneniya Kerchenskogo proliva i prilgayushchey akvatorii Chernogo morya po dannym naturnykh izmereniy 2019–2020 gg (Assessment of Pollution of the Kerch Strait and Adjacent Black Sea Area Based on Field Measurements of 2019–2020). *Oceanology*, **62** (2), 162–170, <https://doi.org/10.1134/S0001437022020175> [in Russian].

Submitted 10.10.2022, accepted 07.11.2022.

**For citation:** Rostovtseva, V. V., A. S. Izhitskiy, and B. V. Konovalov, 2022: Characterizing of Azov Sea and Black Sea water masses mixing in the Kerch strait using integrated remote and contact measurements, *Journal of oceanological research*, **50** (3), 70–87, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(3\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(3).4).