© Рождественский С. А., Завьялов П. О., Коновалов Б. В., 2026, Океанологические исследования, 2026, Том 54, № 2, С. 67–82

УДК 551.463 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(2).5

НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕНОСА ВЗВЕСИ ЧЕРЕЗ КЕРЧЕНСКИЙ ПРОЛИВ

С. А. Рождественский, П. О. Завьялов, Б. В. Коновалов

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: sergeir92@list.ru

В статье представлены результаты расчетов переноса общей взвеси через Керченский пролив на основе натурных измерений. Метод расчета основан на вычислении концентраций общей взвеси по интенсивности эхо-сигнала акустического доплеровского профилографа течений TRDI WHM 600 с калибровкой путем сравнения с концентрациями общей взвеси, полученными в результате фильтрации и лабораторного анализа отобранных проб, а также значениями мутности, полученными независимо оптическим методом с помощью оснащенного датчиком мутности CTD зонда SeaBird 19plus. Результаты расчетов указывают на то, что Керченский пролив является не просто «транспортным коридором» для переноса взвеси, но сам активно участвует в формировании баланса взвешенных веществ, причем, в зависимости от условий, его акватория может служить как источником взвеси (за счет взмучивания донных осадков и эрозии берегов), так и стоком (за счет гравитационного осаждения взвеси в проливе).

Ключевые слова: Керченский пролив, мутность, концентрация общей взвеси, акустический доплеровский профилограф течений, перенос взвешенных частиц

Введение

Закономерностям переноса взвешенных частиц в прибрежных зонах океанов и морей посвящено большое количество работ, однако данная тема все еще изучена не в полной мере. В масштабах Мирового океана концентрация общей взвеси колеблется от сотых долей г/м^3 в водах открытого океана (Немировская и др., 2022) до нескольких тысяч г/м^3, например, в приустьевых районах взвесенесущих рек (Лаврова и др., 2023). Основными параметрами, влияющими на концентрацию общей взвеси, являются скорости и направления течений и ветра (Осадчиев, 2017; Кубряков и др., 2021; Котеров и др., 2009; Алескерова и др., 2015). Одной из главных причин недостаточной изученности вопроса распространения концентраций общей взвеси в Мировом океане является отсутствие надежных измерительных средств, позволяющих в оперативном режиме получать данные in situ о концентрации взвеси, а тем более о ее происхождении и перемещении в тех или иных исследуемых районах. Повышенные концентрации взвеси могут являться индикатором антропогенного воздействия на окружающую среду (Ломакин, 2019).

Актуальность исследования переноса взвеси в Керченском проливе определяется его транспортно-логистическим, социально-экономическим и геополитическим

значением для нашей страны (Ломакин и др., 2017). Основными источниками взвешенных частиц в Керченском проливе являются адвекция вод с высоким содержанием взвеси из Азовского моря (Алескерова и др., 2017), а также местное взмучивание донных осадков. Берега Керченского пролива представляют собой глинистые, отвесные, абразионные обрывы на значительном протяжении вдоль береговой линии. По некоторым оценкам, поступление твердого материала из-за абразии берегов составляет до 580 000 т/год (Ломакин и др., 2008). Поступление взвешенных частиц с водами Азовского моря связано, в основном, с материковым стоком в Азовское море крупных рек – Дон и Кубань. Соотношение между адвективным и локальным механизмами поступления взвеси в пролив остается неизвестным, уточнение этого вопроса являлось одной из целей настоящей работы.

Широко известны методы определения концентрации взвешенных частиц в толще воды и на поверхности, основанные на оптических измерениях рассеяния света или ослабления искусственного света, обратного рассеяния акустического сигнала, прямом отборе проб воды для фильтрации и определения весовым методом или кондуктометрическим анализом объема частиц (Корчемкина и др., 2016; Ли и др., 2015; Ле Хунг Чинь и др., 2016; Лохов и др., 2020; Ростовцева и др., 2017; Коновалов и др., 2014; Кушнир и др., 2014; Маньковский, 2018; Ле Хунг Чинь и др., 2020).

Методика измерений и расчетов

В данной работе мы использовали метод расчета концентрации взвешенных частиц в акватории Керченского пролива по эхо-сигналам акустического обратного рассеяния ADCP зонда. Этот метод подробно освещен в работах (Thorne et al., 1991; Thorne et al., 1993; Gartner, 2004; Gartner et al., 2001; Yong H. Kim et al., 2004; Gartner, 2002; Сухинов и др., 2009).

Натурные измерения и отбор проб осуществлялись в ходе двух экспедиций Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН в 2019 и 2021 гг. Обе экспедиции проводились на МНИС «Пеленг» в весенне-летний период. На рисунке 1 показан район исследований, а также расположение станций. В таблице 1 приведены данные с координатами станций и соответствующими им глубинами.

В обеих экспедициях с борта судна измерялись скорости течений и были получены данные эхо-сигналов с помощью зонда ADCP TRDI WHM 600 (далее сокращенно – ADCP). Зонд ADCP был настроен так, что ячейки с отдельными значениями скорости были расположены по глубине с интервалами 0,5 м друг от друга. В экспедиции 2021 г. определялась также мутность воды с помощью зонда CTD SBE 19plus (далее сокращенно – CTD), равномерно опускавшегося до дна с вертикальной скоростью около 1 м/с. В 2019 г. измерения выполнялись 23 апреля вдоль разреза 1–8 и 24 апреля вдоль разреза 9–16. Расстояние между соседними станциями составляло около 2 км. В 2021 г. измерения проводились 10 и 11 августа по разрезам 1–8 и 9–16, соответственно. В обеих экспедициях использовался один и тот же зонд ADCP.

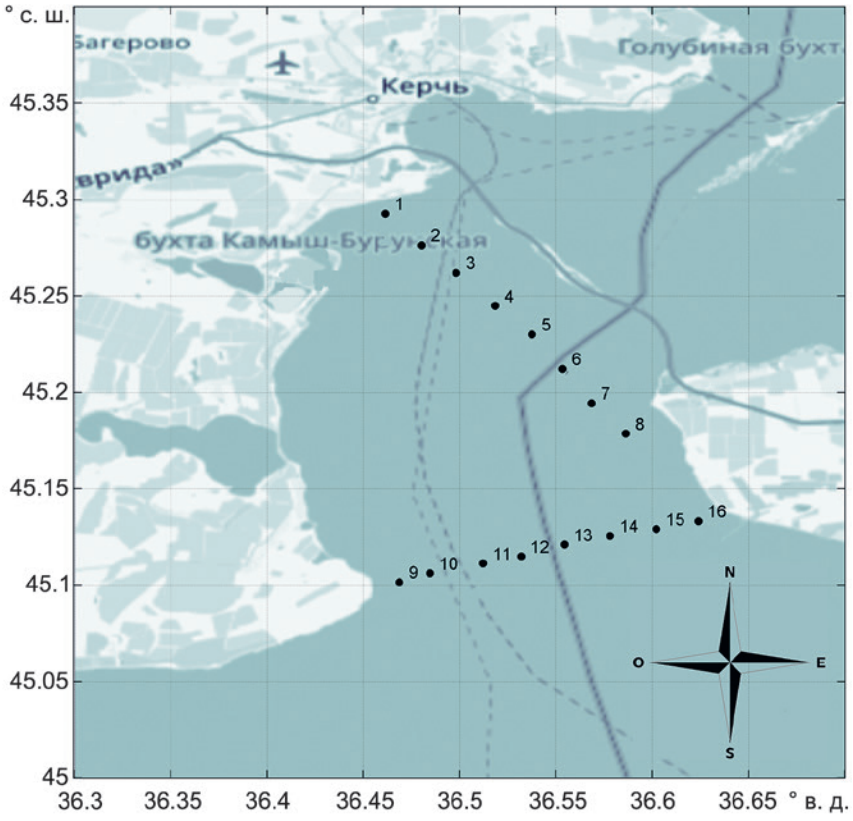


Рис. 1 – Карта-схема района исследований Керченского пролива. Показаны положение и номера станций

Табл. 1 – Координаты и глубина места на станциях

Номер станции	**Долгота, °**	**Широта, °**	**Глубина, м**
1	45.2916	36.4606	6
2	45.2755	36.4800	6
3	45.2600	36.4981	7
4	45.2447	36.5179	7
5	45.2295	36.5365	7
6	45.2112	36.5534	7
7	45.1937	36.5678	8
8	45.1782	36.5854	8
9	45.1005	36.4688	11
10	45.1049	36.4844	15
11	45.1096	36.5081	18
12	45.1153	36.5316	18
13	45.1213	36.5552	17
14	45.1248	36.5778	15
15	45.1295	36.6021	12
16	45.1328	36.6238	11

Для определения концентраций взвешенных частиц был использован описанный ниже «акустический» метод расчета концентрации по данным эхо-сигналов ADCP. Теоретические основы метода описаны в работе (Сухинов и др., 2009), в которой использовался аналогичный зонд ADCP этой же модели, работавший на такой же частоте 600 kHz, как и частота прибора ADCP в данной работе. При этом географический район исследований в работе (Сухинов и др., 2009) был расположен в акватории Азовского моря, являющейся смежной областью с акваторией Керченского пролива. Поэтому здесь будут приведены только основные аспекты данного метода.

Расчет концентраций взвешенных частиц проводился по следующей эмпирической формуле (Сухинов и др., 2009):

$$10\log_{10}(SSC) = C_k + 1010\log_{10}(R^2) + 2\alpha_w R + K_c E, \quad (1)$$

где SSC – концентрация взвешенных веществ (кг·м$^{-3}$); R – расстояние от излучателя до акустической ячейки, в которой измеряется концентрация (м); α_w – коэффициент поглощения акустического сигнала водой (м$^{-1}$); E – интенсивность эхо-сигнала (в условных безразмерных приборных единицах); C_k и K_c – безразмерные калибровочные константы, которые зависят от технических параметров конкретного прибора (уровень шума в источнике питания, эффективность излучателя и др).

Коэффициент ослабления акустического сигнала водой зависит от частоты излучаемого импульса, а также температуры воды, солености и давления. Для частоты 600 kHz было использовано значение $\alpha_w = 0{,}14$ dB/м (Deines, 1999; Rehman et al., 1990). Значения коэффициентов C_k и K_c были получены после калибровки акустического эхосигнала известными значениями концентраций взвешенных частиц. С этой целью на разных станциях были отобраны с помощью батометра пробы воды с разных по глубине горизонтов (всего 6 проб). Лабораторное определение значений концентраций общей взвеси в пробах проводилось по методике Б. В. Коновалова (Коновалов и др., 2014). Полученные значения концентраций общей взвеси на нескольких станциях и горизонтах позволили установить значения коэффициентов C_k и K_c, использовавшихся в дальнейших расчетах. Для этого лабораторно определенные значения концентраций взвешенных веществ для каждой пары проб подставлялись в уравнение (1). Полученные системы из двух уравнений позволили вычислить значения C_k и K_c. Далее значения для всех пар проб усреднялись между собой и в дальнейших расчетах использовались усредненные значения констант.

В результате, на всех станциях разрезов 1–8 и 9–16 для двух экспедиций 2019 и 2021 гг. были получены вертикальные профили скоростей течений и концентрации взвешенных частиц, а также (только для экспедиции 2021 г.) соответствующие им профили мутности по данным CTD. Характеризующие перенос взвеси через пролив, локальные потоки взвеси рассчитывались затем как произведение концентрации взвеси и продольной к оси пролива северной компоненты скорости течения, а полный поток – как площадной интеграл этого произведения по поперечному сечению пролива.

Результаты

Методика расчетов концентрации общей взвеси на основе эхо-сигналов ADCP зонда ранее уже использовалась другими авторами (Сухинов и др., 2009), однако для решения поставленной в работе задачи необходимо было оценить возможность применения методики к условиям Керченского пролива. Таких данных по концентрации взвеси мы не имели (результаты анализа отобранных проб таковыми считаться не могут, поскольку они уже использовались при определении калибровочных констант в расчетном уравнении). Для проверки применимости данного метода были использованы имеющиеся данные значений мутности по измерениям CTD зондом. Действительно, если предположить квазилинейную связь между концентрацией взвеси и оптической мутностью (Иванов и др., 2008), то уравнение (1) может быть переписано в терминах мутности в точно такой же форме – изменится лишь численное значение константы C_k. Для этого использовались данные экспедиции 2021 г. Значения эхо-сигналов ADCP калибровались по значениям мутности от прибора CTD, следуя процедуре, аналогичной описанной выше, для расчета концентрации взвеси. Затем по данным ADCP зонда были рассчитаны профили мутности на всех станциях.

На рисунке 2 изображена зависимость значений мутности по CTD от значений мутности по ADCP. На рисунке приведены значения по всем станциям на двух разрезах 1–8 и 9–16. Линейная зависимость построена методом линейной регрессии, при этом коэффициент детерминации равен $R^2 = 0{,}96$. Видно, что акустический метод очень хорошо воспроизвел распределения мутности, полученные по оптическим измерениям.

На рисунке 3 показана зависимость усредненных отклонений рассчитанных значений мутности по эхо-сигналам ADCP и натурно измеренных по CTD значений мутности от глубины. Линейная зависимость построена методом линейной регрессии с коэффициентом детерминации $R^2 = 0{,}6$. На максимальных глубинах абсолютная ошибка достигает 0.8 NTU, но сами значения мутности там приближаются к 9.0 NTU.

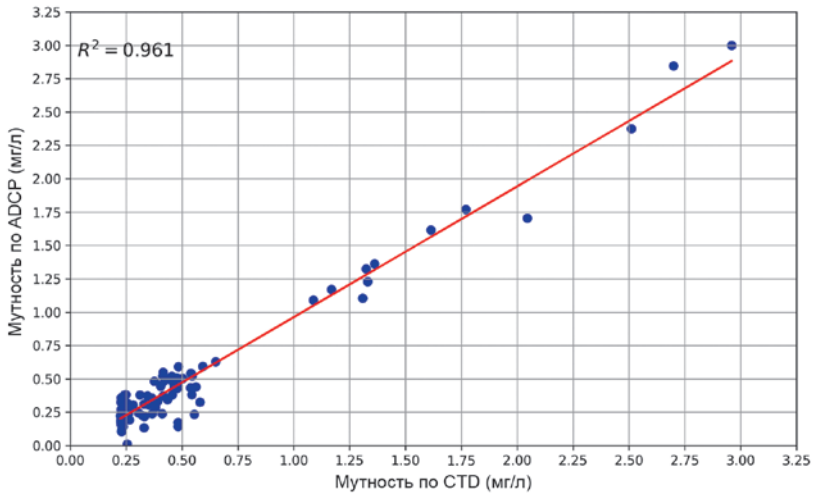


Рис. 2 – Зависимость значений мутности, полученных по прибору CTD, от значений мутности, рассчитанных по прибору ADCP

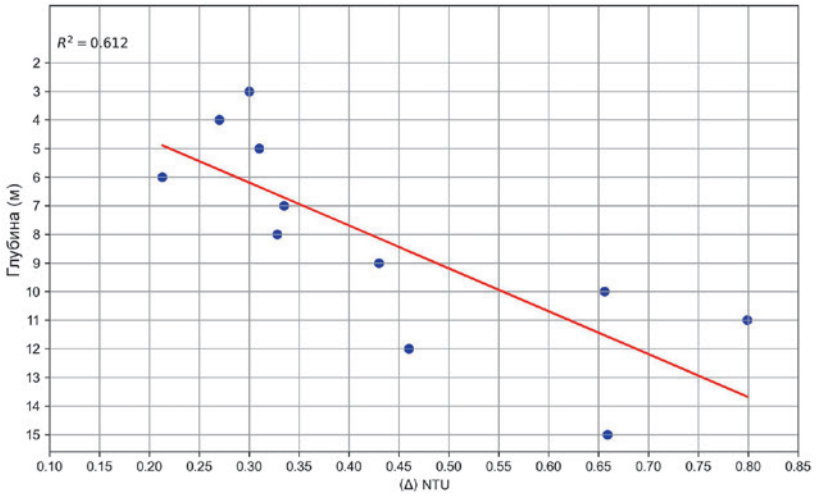


Рис. 3 – Зависимость средних разностей между значениями мутности по CTD и ADCP от глубины

Таким образом, можно говорить о применимости «акустического» метода измерения мутности воды и концентрации общей взвеси в акватории Керченского пролива с точностью порядка 10 %. Кроме того, видно, что ошибка метода в целом увеличивается с глубиной, однако имеющиеся данные недостаточны для статистически обеспеченной параметризации этой зависимости. Ошибки рассчитанных суммарных переносов потоков воды и переносов взвеси складывались из ошибки самого метода и относительных ошибок при определении усредненных значений скоростей течений и усредненных значений концентраций взвешенных частиц на соответствующих скоростям течений горизонтам.

На рисунке 4 красной линией показан полный трек судна 23 апреля 2019 г. Кроме основного разреза 1–8, был выполнен дополнительный разрез 1*–8 без отдельных станций, но с непрерывной работой зонда ADCP.

На рисунке 5 изображены распределения северной компоненты скорости течений (рисунок 5а), концентрации взвешенных частиц (рисунок 5б) и переноса общей взвеси (рисунок 5в). Соответствующие графики построены по данным северного разреза 1–8 23 апреля 2019 г. Суммарный перенос воды был направлен на север и составлял 12 400 ± 1350 м^3/с. Максимальные концентрации взвеси были отмечены у поверхности возле западного берега, около Керченского порта, и достигали значений до 3,5 мг/л. Около восточного берега и в придонном слое пролива преобладали сравнительно низкие значения концентраций взвеси (0,1–0,2 мг/л). Общий перенос взвеси через разрез 1–8 был направлен на север и составлял 4450 ± 490 (кг/с).

На рисунке 6 изображены аналогичные распределения для южного разреза 1*–8, выполненного в тот же день 23 апреля 2019 г. Скорость течения на разрезе имела умеренные значения, не превышавшие 0,24 м/с и была, в основном, направлена на север, кроме узкой полосы вдоль восточного берега пролива (рисунок 6а). Максимальные значения скорости отмечены в поверхностном слое в центральной части пролива. Рассчитанный суммарный перенос воды через пролив составил 10 000 ± 1200 (м^3/с) в северном направлении. Концентрации общей взвеси (рисунок 6б) не превышали значений 1 мг/л,

причем наибольшие значения наблюдались в придонном слое. Суммарный поток взвеси (рисунок 6в), направленный на север, получился равным 1370 ± 160 (кг/с).

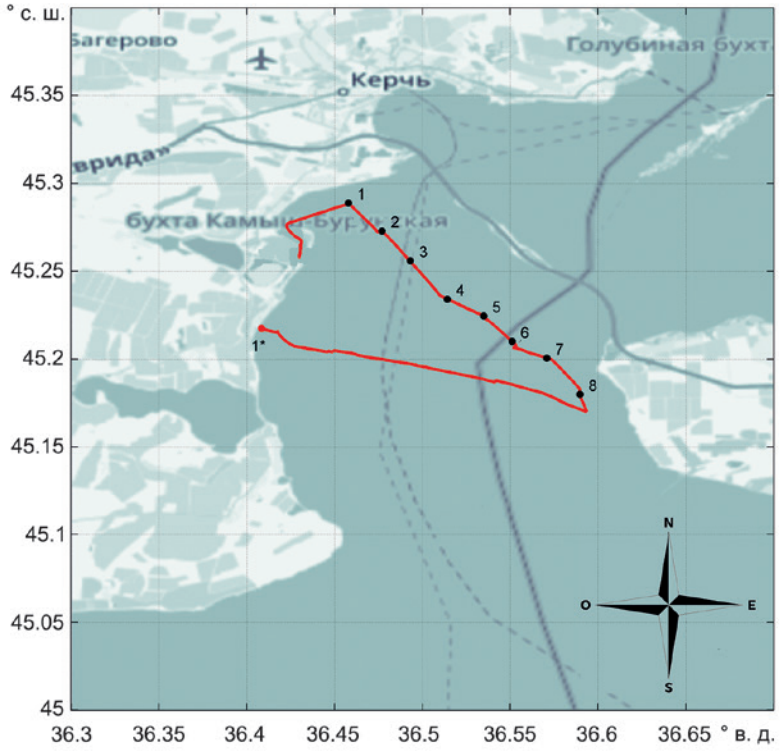


Рис. 4 – Трек судна и станции, выполненные 23 апреля 2019 г.

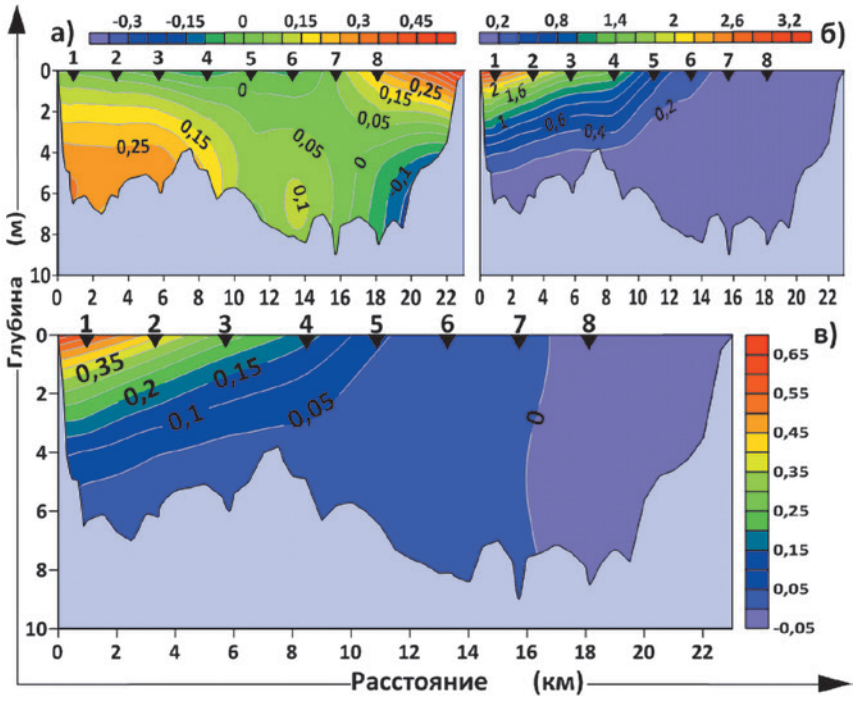


Рис. 5 – Распределения на разрезе 1–8: **а**) северная компонента скорости течений (м/сек) (23.04.2019); **б**) концентрация взвешенных частиц (мг/л) (23.04.2019); **в**) северная компонента массопереноса взвеси (кг/м^2·с) (23.04.2019)

Как видно из рисунка 4, разрезы 1–8 и 1–8* вместе с западным берегом образуют замкнутый бокс, в пределах которого должны соблюдаться балансы массы воды и взвеси. Измерения проводились вдоль трека судна 1–1* и, качественно, направления течений через разрез 1–8 и 1*–8 совпадают. Объемы воды, втекающей в этот бокс с юга и вытекающей из него с севера, действительно равны друг другу в пределах ошибки, поэтому в замкнутом боксе выполняется требование неразрывности. А вот масса взвеси, покидающей бокс через северный разрез, превышает массу взвеси, входящей через южный разрез, более чем втрое. Следовательно, в данном случае не менее двух третей массы взвеси в пределах района между разрезами поступило в воду в самом этом районе в результате местного взмучивания и/или береговой эрозии.

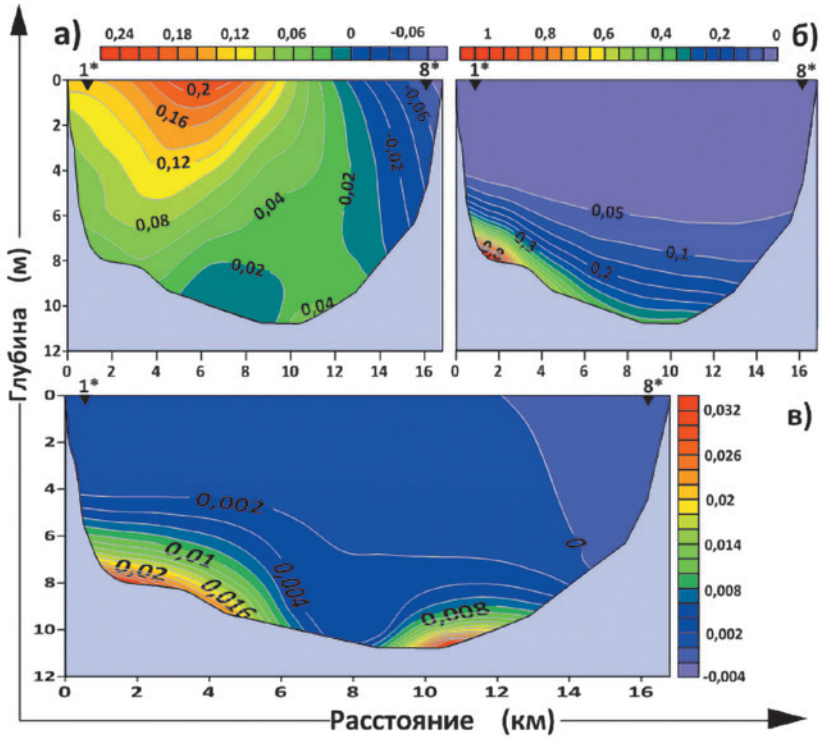


Рис. 6 – Распределения для южного разреза 1–8*: **а**) северная компонента скорости течений (м/с) (23.04.2019); **б**) концентрация взвешенных частиц (мг/л) (23.04.2019); **в**) северная компонента массопереноса взвеси (кг/м^2·с) (23.04.2019)

Распределения параметров, возможно, демонстрирующие противоположную ситуацию с происхождением взвеси, наблюдались в августе 2021 г.

На рисунке 8 изображены поля распределений северной компоненты скорости течений (рисунок 8а), концентрации общей взвеси (рисунок 8б) и массопереноса взвеси (рисунок 8в) по данным разреза 1–6 10 августа 2021 г. Скорости здесь имели небольшие значения, не превышающие 0,12 м/с, причем в западной и восточной частях разреза отмечены течения северного, а в центральной части – южного направлений. Величина суммарного переноса воды в северном направлении составляла 14 200 ± 1850 м^3/с. Концентрация общей взвеси имела минимальные значения – 0,1–0,3 мг/л в приповерхностном слое, а максимальные значения были отмечены в придонном слое

возле западного берега пролива и достигали значений порядка 5 мг/л. Суммарный массоперенос общей взвеси в северном направлении составлял 2400 ± 320 кг/с.

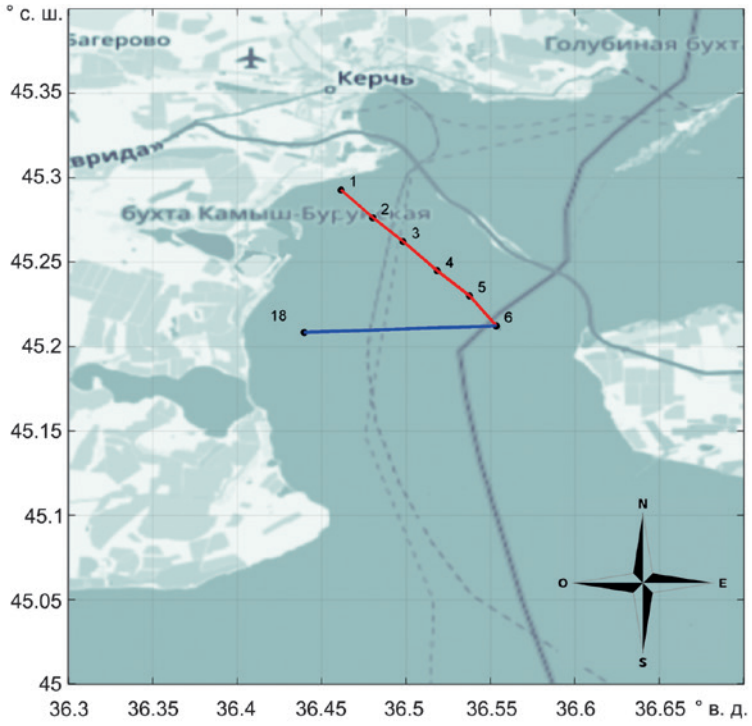


Рис. 7 – Часть трека судна 10 августа 2021 г. обозначена красным цветом, а 12 августа 2021 г. – синим

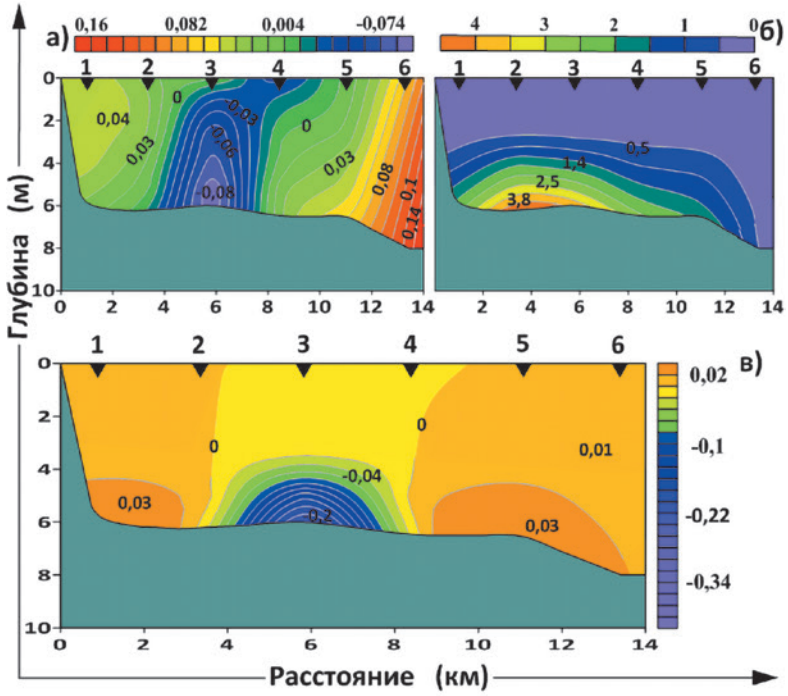


Рис. 8 – Распределения по данным разреза 1–6: **а**) северная компонента скорости течений (м/с) (10.08.2021); **б**) концентрация взвешенных частиц (мг/л) (10.08.2021); **в**) северная компонента массопереноса взвеси (кг/м^2·с) (10.08.2021)

12 августа 2021 г. был выполнен разрез 18–6. На рисунке 9 представлены распределения северной компоненты скорости течений (рисунок 9а), концентрации общей взвеси (рисунок 9б) и массового переноса взвеси (рисунок 9в) через этот разрез. Северная компонента скорости имела, в основном, положительные значения (направление на север) и достигала максимума (около 0,5 м/с) в центральной части пролива (рисунок 9а). Поле концентрации взвешенных частиц было относительно равномерно распределено по глубине при максимальных значениях до 0,15 мг/л в придонном слое. Интегральный перенос воды через разрез 18–6 составил 17 100 ± 2400 м3/с в северном направлении, что совпадет в пределах ошибок с переносом воды через разрез 1–6. Перенос массы взвешенных частиц составил 3200 ± 390 кг/с в северном направлении.

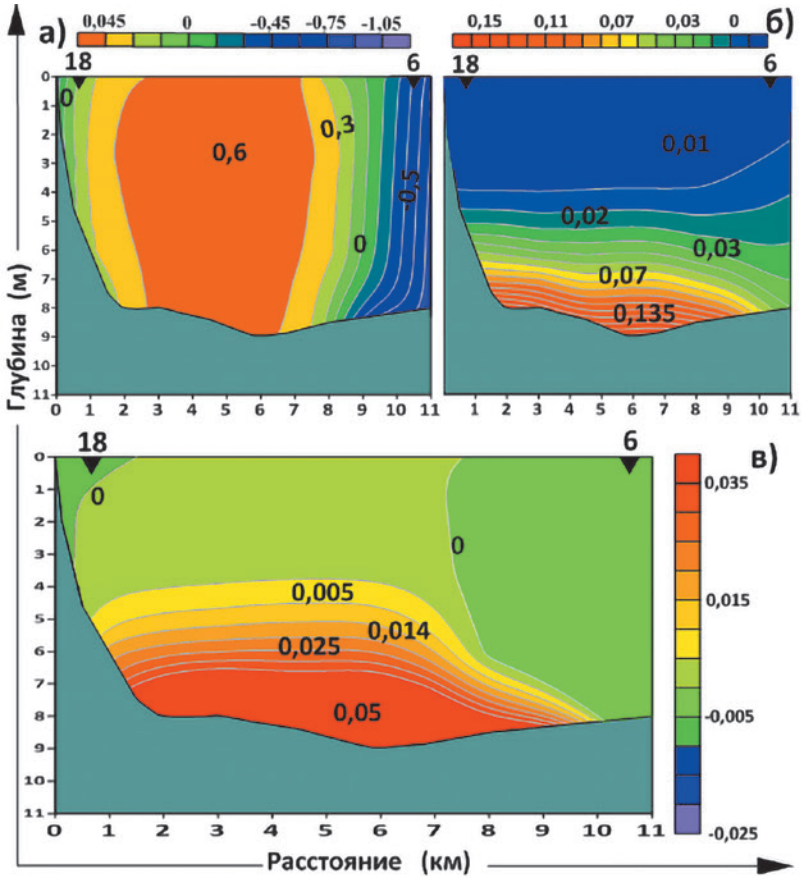


Рис. 9 – Распределения на разрезе 1–6: **а**) северная компонента скорости течений (м/с) (10.08.2021); **б**) концентрация взвешенных частиц (мг/л) (10.08.2021); **в**) северная компонента массопереноса взвеси (кг/м^2·с) (10.08.2021)

Как и в измерениях 2019 г., два рассмотренных выше разреза 2021 г. образуют замкнутый бокс. Предположив, что в интервале времени между измерениями на двух разрезах (порядка суток) существенных изменений не было (что косвенно подтверждается равенством в пределах ошибок потоков массы через два разреза), проходит значительно меньшая масса взвеси (более, чем на 25 %), чем входит через южный. Это позволяет сделать вывод о том, что в этом случае имеет место не взмучивание, а оседание взвеси внутри бокса в проливе.

Выводы

Представленные выше результаты демонстрируют возможность количественной оценки трехмерных пространственных распределений концентрации и потоков взвеси на основе данных по рассеянию акустического сигнала при зондировании зондом ADCP (при условии «калибровки» прибора с помощью достаточного количества отобранных проб, в которых концентрация взвеси должна быть определена прямыми лабораторными методами). Выполненный анализ позволяет заключить, что метод (Сухинов и др., 2009) является потенциально перспективным, поскольку может обеспечить высокое пространственно-временное разрешение. Результаты успешного восстановления полей концентрации взвеси по данным ADCP ранее публиковались несколькими авторами для других районов, но для Керченского пролива, перенос взвеси через который играет важную роль в механизмах обмена между Черным и Азовским морями, этот подход применен впервые.

Полученные в работе результаты можно считать «пилотными» из-за ограниченности по своему объему, тем не менее, они не только дают представление о характерных масштабах величины переноса взвеси через пролив (обычно – порядка нескольких тонн в секунду), но и дают возможность выполнить балансовые расчеты, до некоторой степени проясняющие важный вопрос о происхождении взвеси в проливе. Результаты этих расчетов указывают на то, что Керченский пролив является не просто «транспортным коридором» для переноса взвеси, но сам активно участвует в формировании баланса взвешенных веществ, причем, в зависимости от условий, его акватория может быть как источником взвеси (за счет взмучивания донных осадков и эрозии берегов), так и стоком (за счет гравитационного осаждения взвеси в проливе).

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы Государственного задания FMWE-2024-0015.

Список литературы

1. *Алескерова А. А., Кубряков А. А., Станичный С. В.* Распространение взвешенного вещества под влиянием штормовых ветров у западного побережья Крыма по оптическим данным высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 63–71. EDN: TQPZJP
2. *Алескерова А. А., Кубряков А. А., Горячкин Ю. Н., Станичный С. В.* Распространение вод из Керченского пролива в Черное море // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 53–64. EDN: YLLPXN. https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-53-64
3. *Иванов Б. В., Павлов А. К.* Косвенный метод определения концентрации взвешенных частиц в водах Финского залива (на примере бухты Портовая, Выборгский залив) // Ученые записки РГГМУ. 2008. № 7. С. 92–100. EDN: MVMZNL
4. *Коновалов Б. Н., 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. EDN: STHKPZ. https://doi.org/10.7868/S0030157414040066

5. *Корчемкина Е. Н., Латушкин А. А.* Определение концентраций растворенного органического вещества и взвеси по спектральному показателю ослабления направленного света // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 3. С. 44–48. EDN: XAHQWB
6. *Котеров В. Н., Юрезанская Ю. С.* Моделирование переноса взвешенных веществ на океаническом шельфе. Эффективная гидравлическая крупность полидисперсной взвеси // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2009. Т. 49. № 7. С. 1306–1318. EDN: KMLQKP
7. *Кубряков А. А., Лишаев П. Н., Чепыженко А. И., Алескерова А. А., Кубрякова Е. А., Медведева А. В., Станичный С. В.* Влияние субмезомасштабных вихрей на перенос взвешенного вещества в прибрежной зоне Крыма по данным БПЛА, спутниковых и контактных измерений // Океанология. 2021. Т. 61. № 2. С. 182–197. EDN: VZKVBX. https://doi.org/10.31857/S0030157421020106
8. *Кушнир В. М., Поважный В. В., Бердников С. В.* Минеральная и органическая компоненты взвеси по данным космических съемок и непосредственных измерений в Азовском море и Керченском проливе // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 2. С. 22–31. EDN: TEYQZL
9. *Лаврова О. Ю., Назирова К. Р., Алферьева Я. О., Соловьев Д. М., Жук Е. В.* Изменение параметров плюма реки Сулак после схода селевых потоков в горах Дагестана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 323–329. EDN: WJNJAW. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-323-329
10. *Ле Хунг Чинь, Тарасов М. К.* Методика определения концентрации взвеси в поверхностных водах водохранилища Чи Ан (Вьетнам) по данным дистанционного зондирования // Вестник московского университета. Серия 5: География. 2016. № 2. С. 38–43. EDN: WJDAIH
11. *Ле Хунг Чинь, Заблоцкий В. Р., Тхи Тху Нга Нгуен* Разработка методики определения концентрации взвеси в поверхностных водах р. Дай (Вьетнам) по изображениям MSI SENTINEL 2 с высоким пространственным разрешением // Исследование Земли из космоса. 2020. № 2. С. 15–23. EDN: OCHIBM. https://doi.org/10.31857/S0205961420020037
12. *Ли М. Е., Шибанов Е. Б., Корчемкина Е. Н., Мартынов О. В.* Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6. С. 17–33. EDN: VHEWVT
13. *Ломакин П. Д., Спиридонова Е. О., Чепыженко А. И., Чепыженко А. А.* Антропогенные и природные источники взвешенного вещества в водах Керченского пролива // Морской экологический журнал. 2008. Т. 7. № 4. С. 51–59. EDN: TYNYVD
14. *Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., Чепыженко А. А.* Поле концентрации общего взвешенного вещества в Керченском проливе на базе оптических наблюдений // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 65–77. EDN: YLLPXW. https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-65-77
15. *Ломакин П. Д.* Влияние дноуглубительных работ и грунтовых свалок на экологическую ситуацию в Керченском проливе // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 2. С. 160–170. EDN: XGVGAJ. https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-2-160-170
16. *Лохов А. С., Кравчишина М. Д., Клювиткин А. А., Коченкова А. И.* Измерение характеристик взвешенных веществ Баренцева моря in situ с помощью лазерного дифрактометра LISST – DEEP // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 747–761. EDN: BYNCZE. https://doi.org/10.31857/S0030157420050159
17. *Маньковский В. И.* Оценки концентраций общей взвеси и ее органической и минеральной фракций в озере Байкал по глубине видимости белого диска // Оптика океана и атмосферы. 2018. Т. 31. № 4. С. 313–317. EDN: YWTUVM. https://doi.org/10.15372/AOO20180410

18. *Немировская И. А., Флинт М. В.* Особенности поведения органических соединений в воде и донных осадках в Карском море во время схода сезонного льда // Океанология. 2022. Т. 62. № 1. С. 64–74. EDN: NKQQFB. https://doi.org/10.31857/S0030157422010117
19. *Осадчиев А. А.* Распространение плюма реки Амур в Амурском лимане, Сахалинском заливе и Татарском проливе // Океанология. 2017. Т. 57. № 3. С. 417–424. EDN: YTLWMV. https://doi.org/10.7868/S0030157417020150
20. *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. EDN: ZCRXXT. https://doi.org/10.7868/S0030157417040050
21. *Сухинов А. И., Черчаго А. А.* Оценка концентрации взвешенных частиц с использованием акустического обратного рассеивания ADCP-зонда / Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» // Известия ЮФУ, технические науки, тематический выпуск. 2009. № 8 (97). С. 37–42. EDN: KVHIJJ
22. *Deines K. L.* Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers. Proceedings IEEE 6th Working Conference on Current Measurements. 1999. 249–253. https://doi.org/10.1109/CCM.1999.755249
23. *Gartner J. W. and Cheng R. T.* The promises and pitfalls of estimating total suspended solids based on backscatter intensity from acoustic Doppler current profiler // Proceedings Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference (III), 2001. P. 119–126. Accessed September 3, 2001. https://pubs.usgs.gov/misc/FISC_1947-2006/pdf/1st-7thFISCs-CD/7thFISC/7Fisc-V1/7FISC1-3.pdf
24. *Gartner J. W.* Estimation of suspended solids concentrations based on acoustic backscatter intensity: theoretical background. Turbidity and other sediment surrogates workshop, 2002, Reno, NV. https://www.comm-tec.com/Library/Technical_Papers/Various/cool/jgartner.pdf
25. *Gartner J. W.* Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. 2004 // Marine geology. Vol. 211. Iss. 3–4. P. 169–187. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.07.001
26. *Rehman S. S., Vincent C. E.* The Development of High-Frequency Acoustics for the Measurement of Suspended Sediment. Ph.D. thesis, University of East Anglia. 1990. 235 p.
27. *Thorne P. D., Vincent C. E., Hardcastle P. J., Rehman S., Pearson N.* Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices // Marine Geology. May 1991. Vol. 98. Iss. 1. P. 7–16. https://doi.org/10.1016/0025-3227(91)90031-X
28. *Thorne P. D., Hardcastle P. J., Soulsby R. L.* Analysis of acoustic measurements of suspended sediments // Journal of Geophysical Research. 1993. Vol. 98. Iss. C1. 15 january. 1993. P. 899–910. https://doi.org/10.1029/92JC01855
29. *Yong H. Kim, Benjamin Gutierrez, Tim Nelson, Anton Dumars, Mauro Maza, Hector Perales, George Voulgaris* Using the acoustic Doppler current profiler (ADCP) to estimate suspended sediment concentration, technical report, December 2004 // Coastal Processes Sediment Dynamics Laboratory Department of Geological Sciences, University of South Carolina. P. 1–20. https://doi.org/10.5281/zenodo.1419625.

Статья поступила в редакцию 23.04.2026, одобрена к печати 11.06.2026.
Для цитирования: *Рождественский С. А., Завьялов П. О., Коновалов Б. В.* Натурные измерения переноса взвеси через Керченский пролив // Океанологические исследования. 2026. Т. 54. № 2. С. 67–82. https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(2).5

IN SITU MEASUREMENTS OF SUSPENDED MATTER TRANSPORT THROUGH THE KERCH STRAIT

S. A. Rozhdestvensky, P. O. Zavyalov, B. V. Konovalov

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: sergeir92@list.ru

This article presents the results of calculating the total suspended matter transport through the Kerch Strait based on in-situ measurements. The calculation method is based on calculating the total suspended matter concentrations based on the echo intensity of a TRDI WHM 600 acoustic Doppler current profiler, calibrated by comparing them with the total suspended matter concentrations obtained through filtration and laboratory analysis of collected samples, as well as turbidity values obtained independently using an optical method using a SeaBird 19plus sounder equipped with a CTD turbidity sensor. The calculation results indicate that the Kerch Strait is not simply a "transport corridor" for the transfer of suspended matter, but itself actively participates in the formation of the balance of suspended matter, and, depending on the conditions, its waters can serve as both a source of suspended matter (due to the stirring up of bottom sediments and coastal erosion) and a drain (due to the gravitational settling of suspended matter in the strait).

Keywords: Kerch Strait, turbidity, total suspended matter concentration, acoustic Doppler current profiler, suspended particle transport

Acknowledgements: The work was carried out as part of the State Assignment FMWE-2024-0015.

References

1. Aleskerova, A. A., A. A. Kubryakov, and S. V. Stanichny, 2015: Spread of suspended matter under the influence of storm winds off the western coast of Crimea based on high-resolution optical data. *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*, **12** (1), 63–71, EDN: TQPZJP
2. Aleskerova, A. A., A. A. Kubryakov, Yu. N. Goryachkin, and S. V. Stanichny, 2017: Water Propagation from the Kerch Strait to the Black Sea. *Marine Hydrophysical Journal*, **6**, EDN: YLLPXN, https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-53-64
3. Deines, K. L., 1999: Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers. *Proceedings IEEE 6th Working Conference on Current Measurements*, 249–253, https://doi.org/10.1109/CCM.1999.755249
4. Gartner, J. W. and R. T. Cheng, 2001: The promises and pitfalls of estimating total suspended solids based on backscatter intensity from acoustic Doppler current profiler. *Proceedings Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference* (III), 119–126, Accessed September 3, 2001, https://pubs.usgs.gov/misc/FISC_1947-2006/pdf/1st-7thFISCs-CD/7thFISC/7Fisc-V1/7FISC1-3.pdf
5. Gartner, J. W., 2002: *Estimation of suspended solids concentrations based on acoustic backscatter intensity: theoretical background*. Turbidity and other sediment surrogates workshop, Reno, NV, EDN: STHKPZ, https://doi.org/10.7868/S0030157414040066
6. Gartner, J. W., 2004: Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine geology*, **211**, 3–4, 169–187, https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.07.001

7. Ivanov, B. V. and A. K. Pavlov, 2008: Indirect method for determining the concentration of suspended particles in the waters of the Gulf of Finland (using Portovaya Bay, Vyborg Bay as an example). *Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*, **7**, 92–100, EDN: MVMZNL
8. Konovalov, B. N., M. D. Kravchishina, N. A. Belyaev, and A. N. Novigatsky, 2014: Determination of the concentration of suspended mineral matter and suspended organic matter by their spectral absorption. *Oceanology*, **54** (5), 704–711.
9. Korchemkina, E. N. and A. A. Latushkin, 2016: Determination of concentrations of dissolved organic matter and suspended matter by the spectral index of directional light attenuation. *Environmental Safety of Coastal and Shelf Zones of the Sea*, **3**, 44–48, EDN: XAHQWB
10. Koterov, V. N. and Yu. S. Yurezanskaya, 2009: Modeling of Suspended Matter Transport on the Ocean Shelf. Effective Hydraulic Size of Polydisperse Suspension. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*, **49** (7), 1306–1318, EDN: KMLQKP
11. Kubryakov, A. A., P. N. Lishaev, A. I. Chepyzhenko, A. A. Aleskerova, E. A. Kubryakova, A. V. Medvedeva, and S. V. Stanichny, 2021: The influence of submesoscale eddies on suspended matter transport in the coastal zone of Crimea according to UAV, satellite and in-situ measurements. *Oceanology,* **61** (2), 182–197, EDN: VZKVBX, https://doi.org/10.31857/S0030157421020106
12. Kushnir, V. M., V. V. Povazhny, and S. V. Berdnikov, 2014: Mineral and organic components of suspended matter according to space imagery and direct measurements in the Sea of Azov and the Kerch Strait. *Marine Hydrophysical Journal*, **2**, 22–31, EDN: TEYQZL
13. Lavrova, O. Yu., K. R. Nazirova, Ya. O. Alferyeva, D. M. Soloviev, and E. V. Zhuk, 2023: Changes in the Sulak River plume parameters after the mudflows in the mountains of Dagestan. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, **20** (3), 323–329, EDN: WJNJAW, https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-323-329
14. Le Hung Trinh and M. K. Tarasov, 2016: Methodology for determining the concentration of suspended matter in the surface waters of the Chi An reservoir (Vietnam) based on remote sensing data. *Bulletin of Moscow University*. Series 5: Geography, **2**, 38–43,EDN: WJDAIH
15. Le Hung Trinh, V. R. Zablotsky, and Thi Thu Nga Nguyen, 2020: Development of a method for determining the concentration of suspended matter in the surface waters of the river. Dai (Vietnam) from MSI SENTINEL 2 high-resolution images. *Earth Exploration from Space*, **2**, 15–23, EDN: OCHIBM, https://doi.org/10.31857/S0205961420020037
16. Li, M. E., E. B. Shibanov, E. N. Korchemkina, and O. V. Martynov, 2015: Determination of impurity concentration in seawater based on the radiance spectrum of upwelling radiation. *Marine Hydrophysical Journal*, **6**, 17–33, EDN: VHEWVT
17. Lomakin, P. D., E. O. Spiridonova, A. I. Chepyzhenko, and A. A. Chepyzhenko, 2008: Anthropogenic and natural sources of suspended matter in the waters of the Kerch Strait. *Marine Ecological Journal*, **7** (4), 51–59, EDN: TYNYVD
18. Lomakin, P. D., A. I. Chepyzhenko, and A. A. Chepyzhenko, 2017: Total suspended matter concentration field in the Kerch Strait based on optical observations. *Marine Hydrophysical Journal,* **6**, 65–77, EDN: YLLPXW, https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-65-77
19. Lomakin, P. D., 2019: Impact of dredging and landfills on the environmental situation in the Kerch Strait. *Marine Hydrophysical Journal,* **35** (2), 160–170, EDN: XGVGAJ, https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-2-160-170
20. Lokhov, A. S., M. D. Kravchishina, A. A. Klyuvitkin, and A. I. Kochenkova, 2020: Measurement of suspended matter characteristics in the Barents Sea in situ using a LISST – DEEP laser diffractometer. *Oceanology*, **60** (5), 747–761, EDN: BYNCZE, https://doi.org/10.31857/S0030157420050159
21. Man'kovsky, V. I., 2018: Estimates of total suspended matter concentrations and its organic and mineral fractions in Lake Baikal based on the white disk visibility depth. *Ocean and Atmospheric Optics*, **31** (4), 313–317, EDN: YWTUVM, https://doi.org/10.15372/AOO20180410

22. Nemirovskaya, I. A. and M. V. Flint, 2022: Features of the behavior of organic compounds in water and bottom sediments in the Kara Sea during the melting of seasonal ice. *Oceanology*, **62** (1), 64–74, EDN: NKQQFB, https://doi.org/10.31857/S0030157422010117
23. Osadchiev, A. A., 2017: Propagation of the Amur River plume in the Amur Estuary, Sakhalin Bay, and the Tatar Strait. *Oceanology*, **57** (3), 417–424, EDN: YTLWMV, https://doi.org/10.7868/S0030157417020150
24. Rehman, S. S. and C. E. Vincent, 1990: *The Development of High Frequency Acoustics for the Measurement of Suspended Sediment*. Ph.D. thesis, University of East Anglia, 235 p.
25. Rostovtseva, V. V., B. V. Konovalov, I. V. Goncharenko, and D. V. Khlebnikov, 2017: A method for estimating the content of impurities in seawater using operational spectrophotometry. *Oceanology*, **57** (4), 560–574, EDN: ZCRXXT, https://doi.org/10.7868/S0030157417040050
26. Sukhinov, A. I. and A. A. Cherchago, 2009: Estimating the concentration of suspended particles using acoustic backscattering of an ADCP probe / Technological Institute of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Southern Federal University". *Bulletin of SFedU, technical sciences, thematic issue*, **8** (97), 37–42, EDN: KVHIJJ
27. Thorne, P. D., C. E. Vincent, P. J. Hardcastle, S. Rehman, and N. Pearson, 1991: Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices. *Marine Geology*, **98** (1), 7–16, https://doi.org/10.1016/0025-3227(91)90031-X
28. Thorne, P. D., P. J. Hardcastle, and R. L. Soulsby, 1993: Analysis of acoustic measurements of suspended sediments. *Journal of Geophysical Research*, **98** (C1), 899–910, https://doi.org/10.1029/92JC01855
29. Yong, H. Kim, Benjamin Gutierrez, Tim Nelson, Anton Dumars, Mauro Maza, Hector Perales, George Voulgaris, 2004: *Using the acoustic Doppler current profiler (ADCP) to estimate suspended sediment concentration, technical report, December 2004. Coastal Processes Sediment Dynamics Laboratory Department of Geological Sciences*, University of South Carolina, P. 1–20, https://doi.org/10.5281/zenodo.1419625

Submitted 23.04.2026, accepted 11.06.2026.
For citation: Rozhdestvensky, S. A., P. O. Zavyalov, and B. V. Konovalov, 2026: In situ measurements of suspended matter transport through the Kerch Strait. *Journal of Oceanological Research,* **54** (2), 67–82, https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(2).5

刻赤海峡悬浮物输运的现场测量

S. A. Rozhdestvensky, P. O. Zavyalov, B. V. Konovalov

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 邮编 : *117997, Russia,*
电子邮箱: *sergeir92@list.ru*

本文介绍了基于现场测量数据的刻赤海峡总悬浮物输运计算结果。计算方法基于声学多普勒流速剖面仪TRDI WHM 600回波信号强度推算总悬浮物浓度，并通过与过滤及实验室分析所获水样浓度对比进行标定，同时与装备有浊度传感器的SeaBird 19plus CTD探头独立获取的浊度值进行校验。计算结果表明，刻赤海峡不仅是悬浮物输运的"运输走廊"，其本身也积极参与悬浮物的平衡。具体而言，根据环境条件的不同，该海域既可能成为悬浮物的来源（通过底部沉积物的再悬浮和海岸侵蚀），也可能成为悬浮物的汇（通过悬浮物在重力作用下的沉降）。

关键词： 刻赤海峡，浊度，总悬浮物浓度，声学多普勒流速剖面仪，悬浮颗粒物输运

致谢： 本研究在国家任务（课题编号：FMWE-2024-0015）框架内完成。