


## Структура поля концентрации окрашенного растворенного органического вещества в Керченском проливе

П. Д. Ломакин , А. И. Чепыженко, А. А. Чепыженко

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

 p\_lomakin@mail.ru

Поступила в редакцию 19.11.2019 г., после доработки – 23.04.2021 г.

**Цель.** На основе данных серии экспедиций, проведенных в 2001–2014 гг., выявить характерные признаки вертикальной структуры поля концентрации окрашенного растворенного органического вещества ( $fDOM$ ) в Керченском проливе; выполнить типизацию профилей  $fDOM(z)$  и предложить схему районирования рассматриваемого региона по заданному набору качественных признаков; определить особенности статистических характеристик распределения концентрации  $fDOM$  на поверхности моря для акваторий с типовой структурой – цель данной работы.

**Методы и результаты.** Типизация выполнена методом визуальной экспертной оценки кривых вертикального распределения концентрации рассматриваемой величины. В ее основу положена форма профилей  $fDOM(z)$ . Для выделения границ районов с типовой стратификацией поля содержания  $fDOM$  использован анализ структуры термохалинного поля. Выделены три типа вертикальной структуры вод, которые различались формой профиля  $fDOM(z)$  и статистическими показателями эмпирического распределения концентрации данного вещества на поверхности моря. Это азовоморский и черноморский типы, свойственные незагрязненным растворенной органикой водам Азовского и Черного морей, и тип структуры, идентифицирующий воды с антропогенной составляющей в поле концентрации анализируемой величины. Данный тип характеризуется особой интрузионной формой профиля  $fDOM(z)$ . Для каждого из выделенных типов стратификации рассчитаны гистограммы распределения концентрации  $fDOM$  на поверхности моря.

**Выводы.** Выполнена типизация профилей  $fDOM(z)$  и предложена схема районирования акватории Керченского пролива по заданному набору предварительно выявленных качественных признаков. Определены границы районов с типовой стратификацией и их смещения. Показано, что каждой типовой структуре свойственно собственное статистическое распределение концентрации рассматриваемой величины на поверхности моря.

**Ключевые слова:** окрашенное растворенное органическое вещество, типы стратификации, районирование, халинный фронт, Керченский пролив

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по темам № 0555-2021-0003 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» и № 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

**Для цитирования:** Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., Чепыженко А. А. Структура поля концентрации окрашенного растворенного органического вещества в Керченском проливе // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 5. С. 565–578. doi:10.22449/0233-7584-2021-5-565-578

# Structure of the Field of the Colored Dissolved Organic Matter Concentration in the Kerch Strait

P. D. Lomakin <sup>✉</sup>, A. I. Chepyzhenko, A. A. Chepyzhenko

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia  
<sup>✉</sup> p\_lomakin@mail.ru

*Purpose.* Using the data obtained in the expeditions, 2001–2014, the authors intend to identify the typical features of vertical structure of the colored dissolved organic matter (*fDOM*) concentration field in the Kerch Strait, to type the *fDOM*(*z*) profiles, to zone the region under consideration according to a given set of the qualitative features, and also to determine the features of statistical characteristics of the *fDOM* concentration distribution on the sea surface layer for the water areas with a typical structure.

*Methods and Results.* The typing was carried out by the method of visual expert assessment of the curves of vertical distribution of concentration of the considered value. It was based on analyzing the *fDOM*(*z*) profile shapes. To reveal the boundaries of the areas with typical stratification of the *fDOM* content field, the thermohaline field structure was analyzed. Three types of water vertical structure were identified; they differed in the *fDOM*(*z*) profile shape and in statistical indices of empirical distribution of this substance concentration on the sea surface. These are the Azov Sea and the Black Sea types peculiar to the Azov and Black seas waters not contaminated by dissolved organic matter, and the type, the structure of which identifies the waters containing the anthropogenic component in the concentration field of the analyzed value. The latter type is characterized by a special intrusive shape of the *fDOM*(*z*) profile. For each of the identified stratification types, the histograms of the *fDOM* concentration distribution on the sea surface were calculated.

*Conclusions.* The *fDOM*(*z*) profiles were typed. The Kerch Strait water area was zoned in accordance with a given set of the preliminary revealed qualitative features. The boundaries of the areas with typical stratification and their displacements were determined. It is shown that each structure type has its own statistical distribution of concentration of the considered value on the sea surface.

**Keywords:** colored dissolved organic matter, stratification types, zoning, haline front, Kerch Strait

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the state task on themes No. 0555-2021-0003 "Development of operational oceanology methods based on interdisciplinary research of processes of the marine environment formation and evolution, and on mathematical modeling using data of remote and contact measurements" and No. 0555-2021-0005 "Complex interdisciplinary studies of oceanologic processes which determine functioning and evolution of ecosystems in the coastal zones of the Black Sea and the Sea of Azov".

**For citation:** Lomakin, P.D., Chepyzhenko, A.I. and Chepyzhenko, A.A., 2021. Structure of the Field of the Colored Dissolved Organic Matter Concentration in the Kerch Strait. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(5), pp. 525-537. doi:10.22449/1573-160X-2021-5-525-537

## Введение

Органическое вещество (ОВ) в море – интегральный показатель, величина которого в основном зависит от трофности вод, соотношения скоростей продукционно-деструкционных процессов и величины берегового стока. Количественное и качественное изучение растворенного (РОВ) и взвешенного (ВОВ) органического вещества, изменчивости его концентраций, элементного и биохимического состава во времени и пространстве необходимо для понимания процессов, формирующих и поддерживающих функционирование и продуктивность морской экосистемы [1].

Растворенный и взвешенный органический углерод (РОУ и ВОУ соответственно) – репрезентативные показатели содержания РОВ и ВОВ в морской воде, изучение которых в Азово-Черноморском бассейне ведется с 40-х гг. 566

прошлого столетия до настоящего времени. Детальный обзор публикаций, касающихся исследования распределения этих показателей для вод Черного моря, полученных из различных источников разными методами, приведен в работе [1]. В [2] представлены статистические сведения о содержании РОУ в отдельных регионах Азовского моря и в Керченском проливе. В частности, известно, что концентрации РОВ и ВОВ в Черном море колеблются в очень широких пределах: 60–1000 мкМ для РОУ и 2,83–104,16 мкМ для ВОУ. Более стабильное содержание РОУ, согласно [2], характерно для Азовского моря и Керченского пролива (р. Дон 7,7–15,8 мгС/л, Таганрогский залив 1,8–19,3 мгС/л, центральная часть Азовского моря 1,9–20,5 мгС/л, Керченский пролив 2,0–18,9 мгС/л).

Исследования РОВ и его показателей, выполненные в Азово-Черноморском бассейне, в основном касаются биохимических свойств этих величин. Известна попытка океанографического исследования РОУ, предпринятая сотрудниками ВНИРО, на основе данных, полученных в двух экспедициях (15-й рейс НИС «Витязь» в апреле 1988 г. и 24-й рейс НИС «Академик Книпович» в июне – июле 1989 г.). Карты пространственного распределения концентрации РОУ в Черном море, по мнению авторов [1], в силу значительной пространственно-временной изменчивости исследуемой величины и недостаточного объема выборки эмпирических данных представляются схематичными. Вместе с тем они позволили получить первые представления о структуре поля содержания РОУ в прибрежной области и в кислородной зоне глубоководной части Черного моря.

В настоящей работе представлен результат океанологического исследования поля показателя РОВ в Керченском проливе – его флюоресцирующей составляющей, определяемой оптическим методом. В англоязычной литературе данная величина (*colored dissolved organic matter*) имеет стандартную аббревиатуру *fDOM*, которая далее используется в тексте.

Цель предлагаемой работы заключается в следующем: определить типовые признаки вертикальной стратификации поля концентрации *fDOM*, свойственные взаимодействующим в Керченском проливе азовоморским и черноморским водам, а также водам, которые испытывают антропогенную нагрузку; по выявленному набору признаков выполнить типизацию профилей *fDOM(z)* и предложить схему районирования исследуемой акватории; определить положение и смещение границ районов с типовыми признаками структуры поля концентрации исследуемой величины; рассчитать и проанализировать статистические характеристики на поверхности моря, свойственные каждому типу стратификации поля *fDOM*.

### **Исходные данные и методы исследования**

Примерно с конца 90-х гг. прошлого столетия в исследованиях РОВ в водах океанов, морей и других водоемов стали применяться инструментальные гидрооптические методы. В настоящее время флюориметрические измерители РОВ производятся ведущими компаниями мира. Растворенное органическое вещество и его флюоресцентный показатель *fDOM* нашли широкое применение в мировой практике при решении общих океанологических задач, а также в экологических исследованиях по оценке качества вод прибрежных

океанских и морских акваторий, они активно используются известными научными организациями, в том числе и *Woods Hole Oceanographic Institution* [3–10].

С 2001 г. оптический метод оперативного определения содержания *fDOM* *in situ* был внедрен Морским гидрофизическим институтом (МГИ) при проведении мониторинговых экспедиционных исследований Керченского пролива. Накопленный к 2014 г. массив эмпирических данных позволил приступить к изучению структуры поля концентрации этого вещества на основе методов классической океанографии. Обязательный этап подобного исследования подразумевает проведение типизации вертикальных профилей на основании набора характерных признаков стратификации поля исследуемой величины и последующего районирования изучаемой акватории.

Вся используемая в настоящей работе информация получена при помощи портативного зондирующего биофизического комплекса «Кондор» («НПП «Аквастандарт», ТУ 431230-006-00241904-2015; код ТН ВЭД ЕАЭС 9027 50 000 0; Сертификат *ЕАЭС N RU Д-РУ.ЭМ03.А.00096/19*) (URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor>). Для измерения концентрации *fDOM* в функциональную схему зонда был включен флюориметр, что способствовало быстрому набору информации о данном параметре водной среды.

Измеритель концентрации *fDOM* [4] основан на оптическом методе фиксации флюоресцирующей составляющей этого вещества. Спектральные характеристики – участки спектра возбуждения эмиссии (*Ex/Em*) 370/450 нм – стандартны для измерителей флюоресцирующей составляющей РОВ и используются в задачах мониторинга поля этой величины (*dissolved organic matter or Carbon – DOM, DOC*) [7].

В качестве исходной информации использованы материалы 31 экспедиции МГИ в Керченский пролив (июнь 2001 г. – июль 2014 г.). Выборка *in situ* данных фактических синхронных наблюдений в зондирующем режиме температуры, солености, общего взвешенного вещества и *fDOM* включила 1443 зондирования. Все наблюдения проведены при помощи комплекса «Кондор» с шагом по глубине 0,1 м, диапазон исследованных глубин 0,5–50 м.

Для анализа были отобраны 702 зондирования, выполненные на участках рассматриваемой акватории с глубиной более 2 м. Размерность исследуемой величины представлена в единицах калибровки – сульфат хинина (*QSU*).

Задача типизации решалась в два этапа. На первом этапе по ярко выраженным качественно различным признакам воды были разделены на подверженные антропогенному воздействию (локализованные в виде отдельных линз) и «чистые», которые не содержали антропогенной составляющей *fDOM* (воды преобладающей части исследуемой акватории). На втором этапе акватория Керченского пролива была районирована по характерным структурным признакам поля рассматриваемой величины, свойственным «чистым» азовоморским и черноморским водам. При этом привлекались результаты анализа структуры поля солености. Термин «чистые» воды использован для удобства описания и подразумевает воды, не содержащие *fDOM* антропогенной природы.

Отметим, что  $POB$  и его оптическое определение  $fDOM$  относят к наиболее информативным показателям загрязнения, в том числе и бактериального, прибрежных вод океанов и морей [10–12].

### Обсуждение результатов

Анализ горизонтальной структуры поля содержания  $fDOM$  по данным каждой съемки выявил его основное качество – однородный фон, на котором выделялись отдельные пятна (линзы) с высоким содержанием данного вещества. Вертикальные профили  $fDOM(z)$  в линзах отличались немонотонной формой, тогда как в окружающих водах стратификация поля данной величины была слабо выраженной или отсутствовала.

Особое расположение линз с высоким содержанием  $fDOM$ , которого не должно быть в природе, их близость к известным объектам антропогенного воздействия на водную среду Керченского пролива свидетельствует об антропогенном происхождении этих образований.

Вертикальные профили с признаками антропогенного воздействия были объединены в отдельный тип стратификации поля  $fDOM$  и изъяты из выборки анализируемых данных. Остаточная выборка содержала информацию о «чистых» азовоморских и черноморских водах, которые взаимодействуют в Керченском проливе. Анализ этой выборки обнаружил ряд отличий в форме профилей  $fDOM(z)$ , для исследования которых необходимо было общую для «чистых» вод выборку данных разделить на две части – с информацией об азовоморских и черноморских водах. Затем был осуществлен переход к анализу профилей и количественным статистическим оценкам структуры поля концентрации  $fDOM$  по каждой из выборок.

Согласно классическим представлениям [13], взаимодействующие в океанах и морях воды различного происхождения имеют природную границу в виде фронтального раздела. В анализируемой ситуации поле концентрации  $fDOM$  в водах рассматриваемой акватории однородно с пониженной концентрацией этой величины в северной части пролива и слабо выраженным размытым фронтальным разделом, который примерно совпадал с основным термохалинным фронтом Керченского пролива.

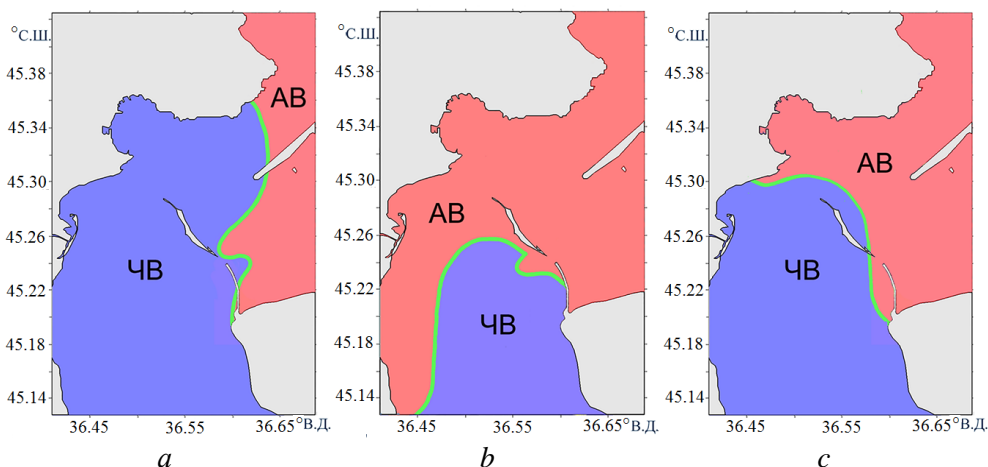
В силу отмеченных свойств выделить фронт в поле  $fDOM$  и более или менее однозначно определить его положение на акватории пролива – крайне затруднительная задача. Поэтому в качестве границы, разделяющей азовоморские и черноморские воды, был принят устойчивый во времени ярко выраженный в течение всего года халинный фронт. Термический фронт в Керченском проливе менее стабилен. В переходные сезоны (от теплого к холодному) он размывается и изменяет знак горизонтального градиента [14].

Анализ структуры поля солёности показал, что за рассматриваемый временной интервал параметры халинного фронта в Керченском проливе были следующими: ширина фронтального раздела 3–5 миль, перепад солёности на его границах на поверхности и у дна 13–16 ЕПС. Солёность трансформированных азовоморских и черноморских вод, расположенных к северу и югу от фронта, изменялась в пределах 11–13 и 16–18 ЕПС соответственно.

В период 2001–2014 гг. у керченского берега фронт испытывал существенные меридиональные смещения. Его осевая линия (показана зеленым

цветом на рис. 1) примерно совпадала с изохалинами 15, 16 ЕПС. В западной части пролива колебания фронта наиболее интенсивны с размахом ~ 20 миль, от азовской узкости до расположенного в черноморском предпроливье м. Такиль. В центре и на востоке Керченского пролива халинный фронтальный раздел был малоподвижным и располагался приблизительно вдоль линии о. Тузла – дамба (рис. 1).

Сведения о халинном фронте использовались для надежного разделения исходных данных, отфильтрованных от профилей  $fDOM(z)$  антропогенного происхождения, на две выборки, на основе которых анализировалась структура «чистых» азовоморских и «чистых» черноморских вод.



**Рис. 1.** Схема северного (а), южного (b) и среднего (c) положений халинного фронта в Керченском проливе в 2001–2014 гг. (АВ, ЧВ – азовоморские и черноморские воды соответственно)

**Fig. 1.** Scheme of the northern (a), southern (b) and middle (c) positions of the haline front in the Kerch Strait in 2001–2014. (AW and BW denote the Azov Sea and the Black Sea waters, respectively)

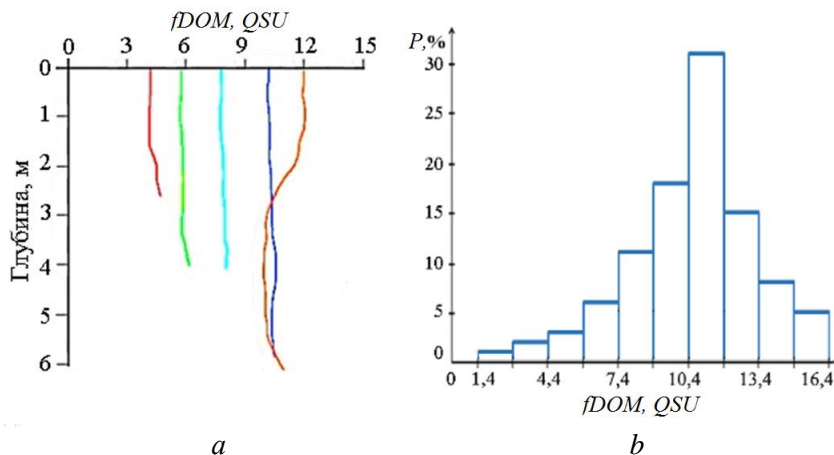
Каждое зондирование содержит информацию о синхронно измеренных вертикальных распределениях температуры, солёности, концентрации общего взвешенного вещества и  $fDOM$ . Поэтому по солёности, поле которой разделено отчетливо выраженным фронтом, можно определить соответствие измеряемых параметров азовоморскому и черноморскому типу вод.

По критериям солёности  $S < 13$  ЕПС (азовоморские воды пролива),  $S > 16$  ЕПС (черноморские воды пролива) были сформированы две выборки зондирований  $fDOM(z)$ , внутри каждой выделены соответствующие типовые признаки, рассчитаны и проанализированы статистические показатели изменчивости содержания рассматриваемой величины на поверхности моря.

В результате анализа формы фактических профилей  $fDOM(z)$  по трем выборкам в Керченском проливе условно выделены три качественно различных типа вод с собственными признаками вертикальной стратификации поля содержания рассматриваемой величины (рис. 2–4, различный цвет профилей  $fDOM(z)$  использован для лучшего восприятия графического материала): азовоморский (тип А), свойственный «чистым» удаленным от техногенных объектов водам Азовского моря; черноморский (тип Ч), характеризующий «чи-

стые», также не испытывающие антропогенного влияния черноморские воды; антропогенно-трансформированный (тип АНТ), который идентифицирует структуру вод с антропогенной составляющей  $fDOM$ , независимо от принадлежности типу А или Ч. Ниже представлено описание каждого из выделенных типов вертикальной структуры поля концентрации  $fDOM$ .

**Тип А** – «чистые» азовоморские воды, для которых характерна слабо выраженная вертикальная стратификация (или ее отсутствие) в поле концентрации исследуемой величины. Иногда в узком придонном слое толщиной 0,2–0,5 м наблюдалось небольшое приращение содержания  $fDOM$  (рис. 2, *a*).



**Р и с. 2.** Типовые профили  $fDOM(z)$ , характерные для азовоморских вод (*a*), и соответствующая гистограмма повторяемости концентрации  $fDOM$  для поверхностного слоя (*b*)

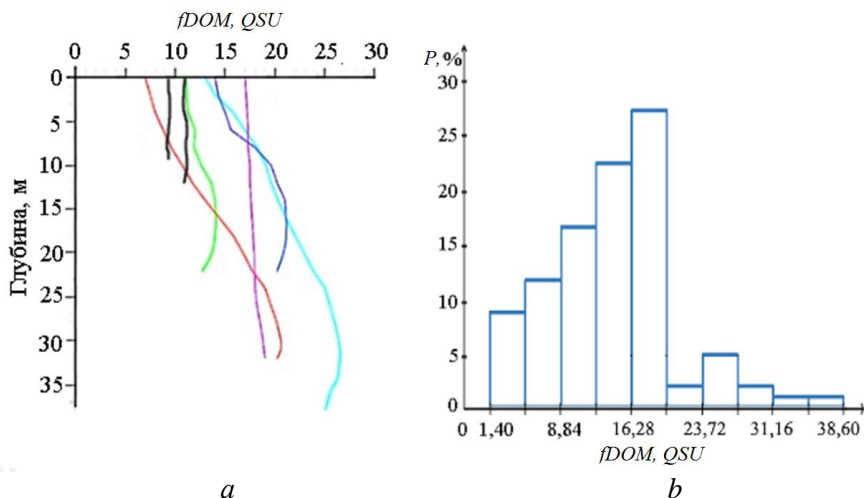
**F i g. 2.** Typical  $fDOM(z)$  profiles characteristic of the Azov Sea waters (*a*), and the corresponding histogram of the  $fDOM$  concentration repeatability for the sea surface layer (*b*)

Отсутствие стратификации в азовоморских водах связано с мелководностью ареала этого типа. Средняя глубина северной части Керченского пролива, где преобладают трансформированные азовоморские воды, равна 4,5 м. В результате интенсивного вертикального обмена поля температуры, солёности и концентрации  $fDOM$  в течение большей части года здесь однородны по вертикали.

Статистические характеристики распределения концентрации  $fDOM$  для вод типа А на поверхности моря, рассчитанные по выборке объемом  $n = 337$ , следующие: интервал изменчивости  $\Delta = 1,4\text{--}16,3$  QSU; среднее значение  $fDOM_{\text{ср}} = 10,5$  QSU; стандартное отклонение  $\sigma = 2,4$  QSU; модальное значение  $fDOM_{\text{мод}} = 11,2$  QSU; повторяемость моды  $P = 31\%$ . Гистограмма повторяемости этого типа имеет левостороннюю асимметрию (модальное значение больше среднего) (рис. 2, *b*). Азовоморский тип стратификации поля исследуемой величины расположен к северу от халинного фронта Керченского пролива (рис. 1).

**Тип Ч** – «чистые» черноморские воды, для которых характерно наличие подповерхностного максимума содержания  $fDOM$  в южной глубоководной части Керченского пролива и в черноморском предпроливье на глубине 10–

40 м, примерно в слое скачка плотности. В черноморском предпроливье концентрация  $fDOM$  на горизонте максимума достигала 32–42  $QSU$ . В южной части Керченского пролива, на мелководье, этот экстремум прерывается дном. Поэтому поле исследуемой величины в «чистых» черноморских водах пролива на участках с глубинами менее 10 м однородно по вертикали (рис. 3, *a*).



**Р и с. 3.** Типовые профили  $fDOM(z)$ , характерные для черноморских вод (*a*), и соответствующая гистограмма повторяемости концентрации  $fDOM$  для поверхностного слоя (*b*)

**F i g. 3.** Typical  $fDOM(z)$  profiles characteristic of the Black Sea waters (*a*), and the corresponding histogram of the  $fDOM$  concentration repeatability for the sea surface layer (*b*)

Отметим, что аналогично структуре поля концентрации  $fDOM$  подповерхностный максимум в Черном море выявлен в поле концентрации РОУ [1, 15]. По мнению авторов [1], этот экстремум, расположенный на глубине 10–50 м, типичен для вод Основного Черноморского течения. Авторы работы [15] определили выявленный на глубине 20–60 м устойчивый во времени максимум концентрации РОУ в качестве характерного признака вертикальной стратификации поля этой величины в Черном море.

Гистограмма повторяемости концентрации  $fDOM$  на поверхности моря в водах типа Ч качественно отлична от гистограммы типа А и имеет две обеспеченные данными моды. В области высокой концентрации  $fDOM$  отчетливо выделяется вторая мода со значениями 20,0–38,6  $QSU$  (их суммарная повторяемость 11%) и максимумом 25,6  $QSU$  (5%) (рис. 3, *b*).

Данные, соответствующие этому диапазону концентрации  $fDOM$ , были получены нами в ходе двух экспедиций в августе и сентябре 2011 г. при устойчивом северо-западном ветре, который вызвал сгонный эффект и подъем к поверхности моря в южной части Керченского пролива подповерхностных черноморских вод, где содержание  $fDOM$  достигало 38,5  $QSU$  (рис. 3, *b*).

Наиболее интенсивный сгонный апвеллинг в Керченском проливе вызывается северо-западным ветром (URL: <https://meteopost.com/info/Upwelling/>), и, согласно [16], повторяемость в течение года ветра этого направления составляет 17%, это вторая по значимости повторяемость для керченского ре-



гиона. Поэтому можно полагать, что локальный ветровой апвеллинг – существенный фактор, способствующий насыщению водной толщи южной части пролива растворенной органикой, которая в системе восходящей циркуляции поступает из подповерхностной структурной зоны Черного моря.

Показатель концентрации растворенной органики в морской среде – прямая функция освещенности [15]. Кроме влияния апвеллинга повышенное содержание  $fDOM$  в черноморских водах пролива по сравнению с азовоморскими можно объяснить их различной мутностью и, соответственно, освещенностью. Согласно [17], значения мутности (концентрация  $ОВВ$ ) в азовоморских и черноморских водах Керченского пролива соотносятся как 3:1. Поэтому соотношение показателей освещенности в азовоморских и черноморских водах будет обратным, а содержание  $fDOM$  в азовоморских водах – более низким.

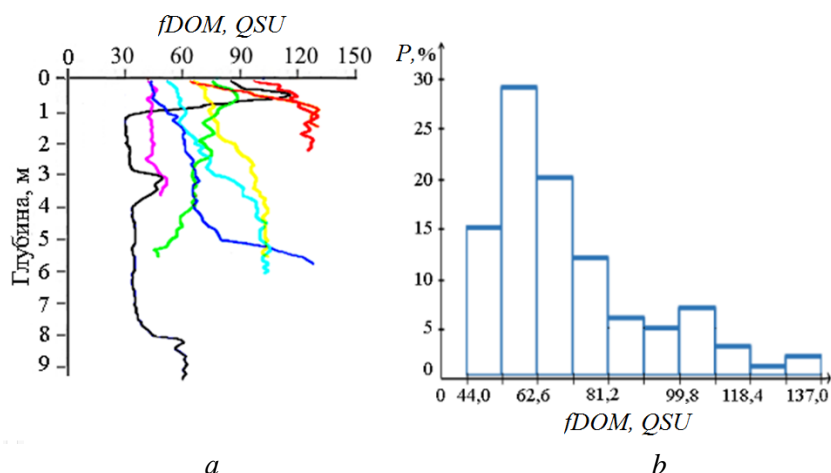
Статистические характеристики распределения концентрации  $fDOM$  для вод типа Ч на поверхности моря, рассчитанные по выборке объемом  $n = 178$ , следующие: интервал изменчивости  $\Delta = 1,5–38,6 \text{ QSU}$ ; среднее значение  $fDOM_{\text{ср}} = 15,2 \text{ QSU}$ ; стандартное отклонение  $\sigma = 5,8 \text{ QSU}$ ; модальное значение  $fDOM_{\text{мод}} = 18,1 \text{ QSU}$ ; повторяемость основной моды  $P = 28\%$ . По сравнению с азовоморскими черноморские воды в Керченском проливе отличаются более высокими статистическими показателями изменчивости поля концентрации  $fDOM$  (рис. 3, *b*).

На основе статистических оценок накопленных нами в ходе многочисленных экспедиций данных установлено, что в открытых черноморских водах у Крымского п-ова в слое 0–20 м поле содержания  $fDOM$  однородно. Его характерная концентрация изменяется в пределах 14,9–20,0  $QSU$  при солёности 18,2–18,4 ЕПС, что соответствует значениям средней и наиболее часто повторяемой концентрации  $fDOM$  в «чистых» черноморских водах Керченского пролива. Эти воды расположены к югу от халинного фронта Керченского пролива (рис. 1).

Воды типа АНТ отличаются от двух рассмотренных выше типов на количественном и качественном уровнях. Концентрация  $fDOM$  в водах этого типа значительно выше, чем в водах типа А и Ч (рис. 2–4).

Ареал вод типа АНТ представлен отдельными пятнами (линзами) с высокой концентрацией исследуемой величины. Иногда они выделялись визуально, по прозрачности и цветности. Наиболее значимые подобные образования имели горизонтальный масштаб 1–6 миль.

Профиль  $fDOM(z)$  типа АНТ отличен от «гладких» профилей, свойственных «чистым» взаимодействующим в проливе водам Азовского и Черного морей. Показатель  $fDOM(z)$  здесь – немонотонная функция глубины с характерной изрезанной формой, указывающей на наличие интрузионных образований с высоким содержанием растворенной органики. В толще вод отмечаются отдельные слои и тонкие прослойки, в которых концентрация  $fDOM$  существенно увеличена. Эти свойства, а также места расположения участков с признаками стратификации по типу АНТ свидетельствуют о присутствии в водах данного типа  $fDOM$  антропогенной природы (рис. 4, *a*).



**Р и с. 4.** Типовые профили  $fDOM(z)$ , характерные для вод, содержащих антропогенную составляющую  $fDOM$  (a), и соответствующая гистограмма повторяемости концентрации  $fDOM$  для поверхностного слоя (b)  
**F i g. 4.** Typical  $fDOM(z)$  profiles characteristic of the waters containing the anthropogenic  $fDOM$  component (a), and the corresponding histogram of the  $fDOM$  concentration repeatability for the sea surface layer (b)

Эмпирическое распределение концентрации  $fDOM$  в водах типа АНТ характеризуется правой асимметрией (модальное значение меньше среднего) и следующими статистическими характеристиками, которые рассчитаны по выборке объемом  $n = 103$ : интервал изменчивости  $\Delta = 44\text{--}137$  QSU; среднее значение  $fDOM_{\text{ср}} = 73,1$  QSU; стандартное отклонение  $\sigma = 14,2$  QSU; модальное значение  $fDOM_{\text{мод}} = 58,0$  QSU; повторяемость моды  $P = 29\%$  (рис. 4, b).

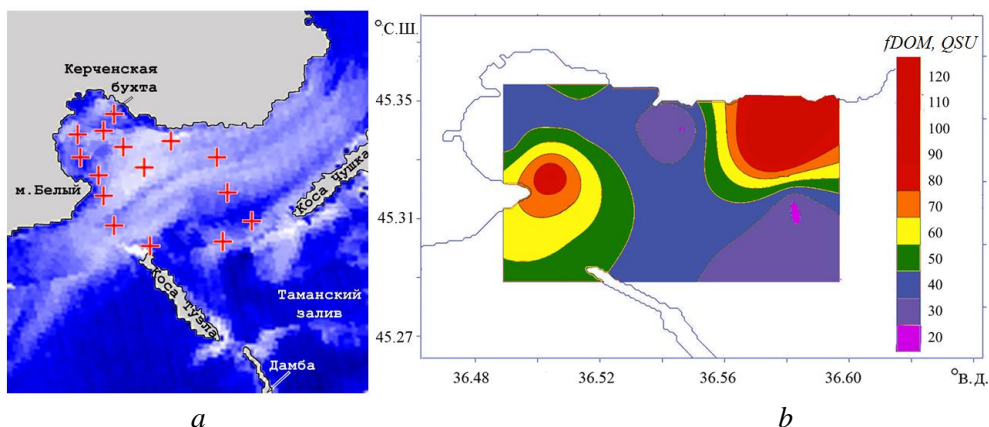
В отличие от типов А и Ч тип АНТ не имеет аналога в термохалинном поле. Это означает, что участки акватории с признаками по типу АНТ не проявляются в структуре полей температуры и солёности, а соответствующие образования в поле  $fDOM$  имеют искусственную природу.

Структуры типа АНТ обнаружены по всей акватории Керченского пролива. Расположение линз с высокой концентрацией исследуемой величины на рассматриваемой акватории не случайно. Они находились у берегов пролива и в море, вблизи основных объектов хозяйственной деятельности региона (порты, грузовые терминалы, пункты рейдовых перегрузок, зоны дампинга изъятых при дноуглубительных работах грунта, коллекторы сточных вод).

На схемах горизонтального распределения концентрации  $fDOM$  участки акватории данного типа выделялись в виде локальных максимумов (пятна, линзы), внутри которых концентрация рассматриваемого вещества существенно превышала фоновые значения. Линзы с антропогенным содержанием  $fDOM$ , как правило, имели хорошо выраженные границы, их характерный горизонтальный масштаб  $\sim 1\text{--}6$  миль.

Данная особенность проиллюстрирована на рис. 5, где представлено горизонтальное распределение концентрации  $fDOM$  в Керченской бухте по данным экспедиции, проведенной МГИ в мае 2005 г. [18]. Видны две мас-

штабные линзы вод с диаметром  $\sim 4\text{--}6$  миль и содержанием  $fDOM$  в центре  $105\text{--}120$   $QSU$ .



**Р и с. 5.** Схема станций на спутниковом снимке (а) и распределение концентрации  $fDOM$  на горизонте 3 м в Керченской бухте в мае 2005 г. (b)

**F i g. 5.** Scheme of the stations in the satellite image (a), and distribution of the  $fDOM$  concentration at the 3 m horizon in the Kerch Bay in May, 2005 (b)

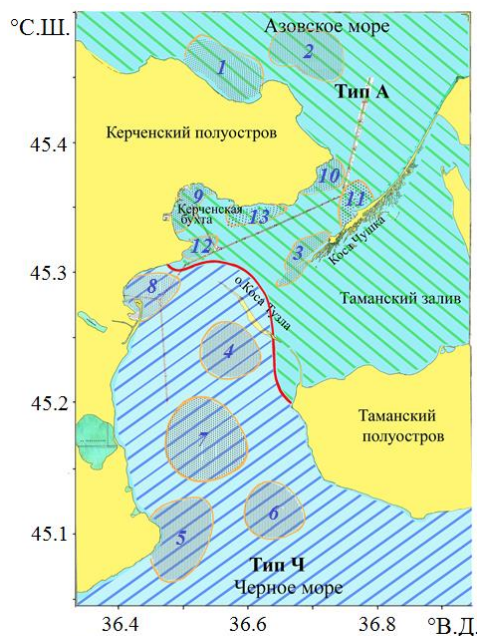
Стратификация  $fDOM$  внутри линз соответствовала типу АНТ. По площади каждая из них сопоставима с площадью акватории Керченской бухты. Ядро линзы в юго-западной части бухты находилось в окрестности нефтяного терминала, который расположен на м. Белый. С этим объектом мы связываем избыточное содержание  $fDOM$  в окружающих его водах.

Другая линза, судя по термохалинным признакам и спутниковой информации, была вынесена из Азовского моря. В пределах полигона находилась примерно четвертая часть ее площади, остальная часть – в азовской узкости пролива.

Отметим, что поля концентрации  $fDOM$  с признаками по типу АНТ мы наблюдали в экспедициях МГИ на известных загрязненных прибрежных акваториях у Крымского п-ова – в Феодосийском заливе, Днепровско-Бугском лимане, Балаклавской и Южной бухтах (г. Севастополь).

На рис. 6 показана схема районирования акватории Керченского пролива по типовым признакам вертикальной стратификации поля концентрации  $fDOM$ . Граница между типами А и Ч проведена по линии (показана красным цветом), соответствующей среднему за время наблюдений положению фронтального раздела в поле солености.

Ареал вод типа АНТ представлен отдельными пронумерованными пятнами: 1 – акватория, примыкающая к выпуску очистных сооружений г. Керчь; 2–5 – районы грунтовых свалок; 6, 7 – пункты рейдовой перевалки грузов; 8–11 – подходы к портам; 12 – нефтяной терминал; 13 – линза загрязненных вод, вынесенная из Азовского моря.



**Р и с. 6.** Схема районирования акватории Керченского пролива по типовым признакам вертикальной стратификации поля концентрации  $fDOM$

**F i g. 6.** Scheme of the Kerch Strait water area zoning according to the typical features of vertical stratification of the  $fDOM$  concentration field

### Заключение

На базе материалов серии экспедиций, проведенных Морским гидрофизическим институтом в 2001–2014 гг., выявлены типовые признаки вертикальной стратификации поля концентрации окрашенного растворенного органического вещества ( $fDOM$ ) в Керченском проливе. По этим признакам предложена схема районирования исследуемой акватории. Проанализированы границы, разделяющие типовые структуры, и статистические характеристики распределения концентрации  $fDOM$  для ареала каждого типа.

Условно выделены следующие три типа структуры поля содержания  $fDOM$ , которые качественно различались формой профиля  $fDOM(z)$  и эмпирическим распределением концентрации этого вещества на поверхности моря:

– **тип А** – трансформированные воды Азовского моря, не содержащие антропогенной составляющей  $fDOM$ . Этот тип характеризуется отсутствием вертикальной стратификации в поле исследуемой величины. Гистограмма повторяемости концентрации  $fDOM$  данного типа на поверхности моря имеет левостороннюю асимметрию, модальное значение 11,8  $QSU$ , повторяемость моды 31%, среднее значение 9,8  $QSU$ , стандартное отклонение 2,4  $QSU$ ;

– **тип Ч** – трансформированные воды Черного моря, не содержащие антропогенной составляющей  $fDOM$ . Данному типу свойственно распределение  $fDOM(z)$  с подповерхностным максимумом. На гистограмме повторяемости концентрации  $fDOM$  этого типа присутствуют две моды. Значение основной моды 18,1  $QSU$ , ее повторяемость 28%, среднее значение 15,2  $QSU$ , стандарт-

ное отклонение 5,8 *QSU*. Вторая, менее значимая мода – показатель выхода в черноморскую часть Керченского пролива насыщенных *fDOM* подповерхностных черноморских вод в системе восходящей циркуляции ветрового апвеллинга;

– тип АНТ, к нему относятся воды с антропогенной составляющей в поле концентрации *fDOM*; данный тип вод отличается высокой концентрацией и немонотонным с интрузионными признаками профилем *fDOM(z)*. Гистограмма повторяемости концентрации *fDOM* этого типа имеет правостороннюю асимметрию, модальное значение 58,0 *QSU*, повторяемость моды 29%, среднее значение 73,1 *QSU*, стандартное отклонение 14,2 *QSU*.

Граница между азовоморским и черноморским типами вод представлена халинным фронтом. У западного берега Керченского пролива фронт испытывал существенные меридиональные смещения на синоптическом масштабе с размахом ~ 20 миль. В центральной части и на востоке пролива положение фронта было относительно стабильным, его осевая линия примерно совпадала с линией о. Тузла – дамба.

Ареал структуры вод типа АНТ на горизонтальных распределениях концентрации исследуемой величины выделялся в виде отдельных локальных максимумов. Эти пятна (линзы) имели, как правило, хорошо выраженные границы, горизонтальный масштаб наиболее значимых линз ~ 1–6 миль.

Показано, что более низкое содержание *fDOM* в азовоморских водах по сравнению с черноморскими обусловлено ветровым апвеллингом, наблюдаемым в черноморском предпроливье, и лучшей освещенностью черноморских вод Керченского пролива вследствие пониженной мутности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности распределения органического вещества в водах Черного моря / А. И. Агатова [и др.] // Система Черного моря. Москва : Научный мир, 2018. С. 146–170. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41513159> (дата обращения: 17.08.2021).
2. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2006 / G. Matishov [et al.]. Washington, D.C. : U.S. Government Printing Office, 2006. 103 p. (NOAA Atlas NESDIS 59). URL: <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/AZOV2006/start.html> (date of access: 17.08.2021).
3. Optical assessment of colored dissolved organic matter and its related parameters in dynamic coastal water systems / P. Shanmugam [et al.] // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2016. Vol. 175. P. 126–145.
4. Stedmon C. A., Markager S., Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy // Marine Chemistry. 2003. Vol. 82, iss. 3–4. P. 239–254. doi:10.1016/S0304-4203(03)00072-0
5. High-frequency in situ optical measurements during a storm event: Assessing relationships between dissolved organic matter, sediment concentrations, and hydrologic processes / J. F. Saraceno [et al.] // Journal of Geological Research. 2009. Vol. 114, iss. G4. G00F09. doi:10.1029/2009JG000989
6. Seeing the light: The effects of particles, dissolved materials, and temperature on in situ measurements of DOM fluorescence in rivers and streams/ B. D. Downing [et al.] // Limnology and Oceanography: Methods. 2012. Vol. 10. P. 767–775. doi:10.4319/lom.2012.10.767
7. Ji Z.-G. Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries. Hoboken, USA : John Wiley & Sons Inc., 2018. 612 p. <https://doi.org/10.1002/9781119371946>

8. *Chepyzhenko A. I., Chepyzhenko A. A.* Methods and device for in situ dissolved organic matter (DOM) monitoring in natural waters' environment // Proceedings of SPIE. SPIE, 2017. Vol. 10466 : 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 104663S. doi:10.1117/12.2287797
9. *Пугач С. П., Пинко И. И.* Динамика растворенного окрашенного органического вещества на шельфе Восточно-Сибирского моря // Доклады Академии наук. 2012. Т. 447, № 6. С. 671–674. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18448015> (дата обращения: 17.08.2021).
10. Direct effects of organic pollutants on the growth and gene expression of the Baltic Sea model bacterium *Rheinheimera* sp. BAL341 / C. M. G. Karksson [et al.] // Microbial Biotechnology. 2019. Vol. 12, iss. 5. P. 892–906. doi:10.1111/1751-7915.13441
11. Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf / E. Boss [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2001. Vol. 106, iss. C5. P. 9499–9507. doi:10.1029/2000JC900008
12. Fluorescence properties of dissolved organic matter in coastal Mediterranean waters influenced by a municipal sewage effluent (Bay of Marseilles, France) / M. Tedetti [et al.] // Environmental Chemistry. 2012. Vol. 9, iss. 5. P. 438–449. doi:10.1071/EN12081
13. *Федоров К. Н.* Физическая природа и структура океанических фронтов. Л. : Гидрометеоиздат, 1983. 296 с.
14. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 1 : Азовское море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. 400 с.
15. Растворенное и взвешенное органическое вещество Черного моря в зимне-весенний период / А. И. Агатова [и др.] // Комплексные океанографические исследования Черного моря. Севастополь : СКТБ МГИ АН УССР, 1989. С. 153–164.
16. *Ломакин П. Д., Панов Д. Б., Спиридонова Е. О.* Особенности межгодовых и сезонных вариаций гидрометеорологических условий в районе Керченского пролива за два последних десятилетия // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 2. С. 36–48. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23140319> (дата обращения: 17.08.2021).
17. *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. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-65-77
18. Гидрологические условия и характеристика загрязнения вод Керченского пролива в мае 2005 г. по данным контактных измерений и спутниковых наблюдений / П. Д. Ломакин [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2006. № 4. С. 27–34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9276507> (дата обращения: 17.08.2021).

*Об авторах:*

**Ломакин Павел Демьянович**, ведущий научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, профессор, **ResearcherID: V-7761-2017**, **Scopus Author ID: 6701439810**, **Istina-ResearcherID (IRID): 18321047**, [p\\_lomakin@mail.ru](mailto:p_lomakin@mail.ru)

**Чепыженко Алексей Ильич**, старший научный сотрудник, отдел гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **ResearcherID: AAG-7929-2020**, **Scopus Author ID: 6504344211**, **IstinaResearcherID (IRID): 6647872**, [ecodevice@yandex.ru](mailto:ecodevice@yandex.ru)

**Чепыженко Анна Алексеевна**, младший научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: F-9651-2014**, **Scopus Author ID: 56536937200**, [annachep87@yandex.ru](mailto:annachep87@yandex.ru)