

Исследование потоков компонентов морской экосистемы с северо-западного шельфа в глубоководную часть Черного моря

В. Л. Дорофеев, Л. И. Сухих*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: l.sukhikh@gmail.com*

Поступила в редакцию 06.03.2020 г., после доработки – 15.05.2020 г.

Цель. Представлен анализ особенностей переноса компонентов экосистемы Черного моря с северо-западного шельфа в глубоководную часть и зависимость этого переноса от характера циркуляции в верхнем слое моря.

Методы и результаты. Для расчета потоков массы жидкости, биогенов и биопродукции с шельфовой зоны в глубоководную часть моря использовались поля течений и биогеохимические поля, полученные в результате реанализа, выполненного с помощью модели экосистемы Черного моря с ассимиляцией данных дистанционных измерений как в численной модели циркуляции, так и в биогеохимическом блоке. С помощью численного моделирования были рассчитаны потоки через три сечения, ограничивающих шельфовую зону (у м. Калиакра, м. Херсонес и вдоль изобаты 200 м). Поведение струи Основного Черноморского течения, а следовательно, направление и величина потоков через границы северо-западного шельфа зависят от завихренности напряжения трения ветра над западной частью Черного моря. Для типа циркуляции с интенсивной струей Основного Черноморского течения, прижатой к кромке шельфа, характерна картина распределения поверхностной концентрации неорганического азота и фитопланктона в виде узкой полосы высоких значений вдоль западного и частично южного берегов Черного моря. Когда струя Основного Черноморского течения слаба или отходит от кромки шельфа, что соответствует невысоким значениям завихренности поля ветра, повышенные значения концентрации сосредоточены на северо-западном шельфе.

Выводы. Направление, величина и характер горизонтального распределения потоков биогенов и биопродукции определяются главным образом циркуляцией в верхнем слое моря. Существенное влияние на величину этих потоков оказывает разность концентраций биогенов и биопродукции в шельфовой зоне и в глубоководной части Черного моря.

Ключевые слова: морская экосистема, Черное море, численное моделирование, северо-западный шельф, циркуляция верхнего слоя, перенос биогенов.

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-77-30001.

Для цитирования: *Дорофеев В. Л., Сухих Л. И.* Исследование потоков компонентов морской экосистемы с северо-западного шельфа в глубоководную часть Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 5. С. 501–513. doi:10.22449/0233-7584-2020-5-501-513

Studying the Fluxes of the Marine Ecosystem Components from the Northwestern Shelf to the Deep Part of the Black Sea

V. L. Dorofeyev, L. I. Sukhikh*

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

**e-mail: l.sukhikh@gmail.com*

Purpose. The study represents analysis of the features of the Black Sea ecosystem components transfer from the northwestern shelf to the deep-sea part and its dependence on circulation in the sea upper layer.

Methods and Results. The fluxes of water mass, nutrients and bioproduction from the shelf zone to the deep part of the sea were calculated using the current fields and biogeochemical ones resulted from the reanalysis, which, in its turn, was carried out due to the Black Sea ecosystem model including assimilation of remote sensing data both in the numerical circulation model and in the biogeochemical block. Numerical modeling permitted to calculate the fluxes through three sections that bound the shelf zone (by the capes Kaliakra and Chersonesos, and along the 200 m isobath). Behavior of the RIM Current jet and, consequently, direction and magnitude of the flows through the boundaries of the northwestern shelf depend on the wind stress vorticity over the western part of the Black Sea. The type of circulation with the intense RIM Current jet pressed to the shelf edge, is characterized by the pattern of distribution of the inorganic nitrogen and phytoplankton surface concentration as a narrow strip of its high values along the Black Sea western and partially southern coasts. When the RIM Current jet is weak or moves from the shelf edge (that corresponds to the low values of the wind stress vorticity) the increased concentration values are located on the northwestern shelf.

Conclusions. Direction, magnitude and character of horizontal distribution of the nutrient and bioproduction fluxes are determined mainly by circulation in the sea upper layer. The magnitude of these flows is significantly affected by difference between the nutrient and bioproduction concentrations in the shelf zone and in the deep part of the Black Sea.

Keywords: marine ecosystem, Black Sea, numerical modeling, northwestern shelf, circulation of the upper layer, nutrient transfer.

Acknowledgements: the study was carried out at the support of the RSF grant No. 17-77-30001.

For citation: Dorofeyev, V.L. and Sukhikh, L.I., 2020. Studying the Fluxes of the Marine Ecosystem Components from the Northwestern Shelf to the Deep Part of the Black Sea. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(5), pp. 460-471. doi:10.22449/1573-160X-2020-5-460-471

Введение

Понимание закономерностей функционирования и изменчивости морской экосистемы дает возможность прогнозировать и отслеживать опасные для окружающей среды сценарии. Состояние экосистемы Черного моря во многом определяется количеством биогенов в верхнем слое моря, поступающих в основном со стоками рек. Вклад таких крупных рек, как Дунай, Днепр, Днестр и Южный Буг, впадающих в море в районе северо-западного шельфа (СЗШ), составляет ~ 65 % от всех речных стоков в бассейн Черного моря. Этим объясняется повышенное содержание биогенов и, как следствие, биопродукции в водах шельфа, занимающего всего 16 % площади моря. Проникновение биогенов и биопродукции с СЗШ в глубоководную часть бассейна Черного моря происходит с помощью водообмена, вызванного течениями в поверхностном слое моря, что подтверждается изображениями, полученными с помощью спутниковых цветовых сканеров. По спутниковым картам температуры поверхности моря (ТПМ) можно также наблюдать проникновение холодных водных масс, сформированных на СЗШ в зимнее время, в глу-

боководную часть. Благодаря течениям в верхнем слое Черного моря богатые биогенами воды с СЗШ проникают в глубоководную часть моря, повышая таким образом содержание компонентов морской экосистемы в этой части бассейна.

Циркуляция поверхностных вод в районе СЗШ изучалась в ряде работ как по данным натурных измерений (например, [1]), так и с помощью численного моделирования [2, 3]. Особенности поведения морской экосистемы на СЗШ Черного моря исследовались, например, в работе [4] на основе данных измерений, а также на основе моделей экосистемы [5, 6]. В работе [7] приводятся результаты исследований, направленных на улучшение понимания фундаментальных обменных процессов на границе шельфа и глубоководной части Черного моря, и дается количественная оценка обменных процессов. С помощью трассера, выносимого речным стоком, показано проникновение вод с шельфа в район пролива Босфор и вдоль южного побережья Черного моря. Часть речной воды проникает в промежуточные слои на границе шельфа в северо-западной части Черного моря. На основе данных спутниковых измерений были рассмотрены механизмы водообмена между СЗШ и глубоководной частью бассейна, вызванные отдельными синоптическими вихрями [8, 9].

Целью данной работы является исследование особенностей переноса с СЗШ в глубоководную часть некоторых компонентов экосистемы Черного моря (рассматриваемых в модели продуцентов – двух групп фитопланктона и неорганического азота) и их зависимость от характера циркуляции в верхнем слое моря.

Исследование проводится с использованием результатов выполненного ранее реанализа (наборов гидродинамических и биогеохимических полей на регулярной сетке), что позволяет дать количественные оценки обмена между шельфовой и глубоководной частями бассейна.

Метод исследования

Изучение особенностей переноса биогенов и биопродукции с СЗШ Черного моря проводилось на основе результатов численного моделирования по модели экосистемы Черного моря. Междисциплинарная модель экосистемы Черного моря состоит из модели циркуляции и биогеохимического блока, описывающего взаимодействия между различными компонентами морской экосистемы.

Поля течений Черного моря, использовавшиеся в данном исследовании, представляют собой результат реанализа физических параметров для двадцатичетырехлетнего периода (с 1992 по 2016 г.) [10, 11]. Основой реанализа является z -уровневая модель, основанная на аппроксимации системы примитивных уравнений динамики океана [12]. Используемый вариант модели имеет горизонтальный пространственный шаг сетки 4,8 км и 35 вертикальных расчетных уровней. Такое пространственное разрешение позволяет достаточно адекватно описывать, помимо крупномасштабных, синоптические процессы в Черном море.

В качестве граничных условий на свободной поверхности моря для уравнений модели циркуляции использовались параметры атмосферного воздей-

ствия, полученные по результатам атмосферного реанализа *ERA-Interim (ECMWF)* [13]: приповерхностный ветер, потоки тепла и пресной воды, солнечная радиация. Поля этих параметров для региона Черного моря, полученные с официального сайта *ECMWF*, затем интерполировались на сетку модели.

В модели циркуляции Черного моря применялась ассимиляция данных спутниковых измерений температуры (ТПМ), аномалий уровня и среднегодовых профилей температуры и солености. Температура поверхности моря и данные об аномалии уровня моря брались из архива Черноморского центра морских прогнозов МГИ. Среднегодовые профили температуры и солености были подготовлены на основе всех данных гидрографических съемок и всплывающих буев за рассматриваемый период.

Биогеохимический блок модели экосистемы Черного моря включает в себя 15 переменных состояния и описывает биогеохимические процессы в верхнем 200-метровом слое моря. В переменные состояния входят две группы фитопланктона (диатомовые и флагелляты), две размерные группы зоопланктона (микрзоопланктон (< 0,2 мм) и мезозоопланктон (0,2–3,0 мм)), медуза *Aurelia aurita* и гребневик *Mnemiopsis leidy*. В пищевую цепь входят, кроме того, нефотосинтезирующий бактериопланктон, растворенная и взвешенная органика, а также всеядная динофлагеллята *Noctiluca scintillans*. В качестве единственного биогенного элемента, лимитирующего рост фитопланктона, в данной модели рассматривается азот. Азотный цикл включает три неорганических соединения: аммоний, нитраты и нитриты. Все перечисленные компоненты экосистемы имеют в модели единицу измерения ммольN·м⁻³. В качестве отдельных переменных состояния в модель также входят растворенные кислород и сероводород. Шаг по пространству и расчетные горизонты соответствуют модели циркуляции. Временная эволюция компонентов экосистемы описывается уравнениями переноса – диффузии, включающими в правой части слагаемые типа источников – стоков, описывающие взаимодействие между компонентами экосистемы:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(uF)}{\partial x} + \frac{\partial(vF)}{\partial y} + \frac{\partial((w + w_s)F)}{\partial z} = K_h \nabla^2 F + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial F}{\partial z} \right) + R(F),$$

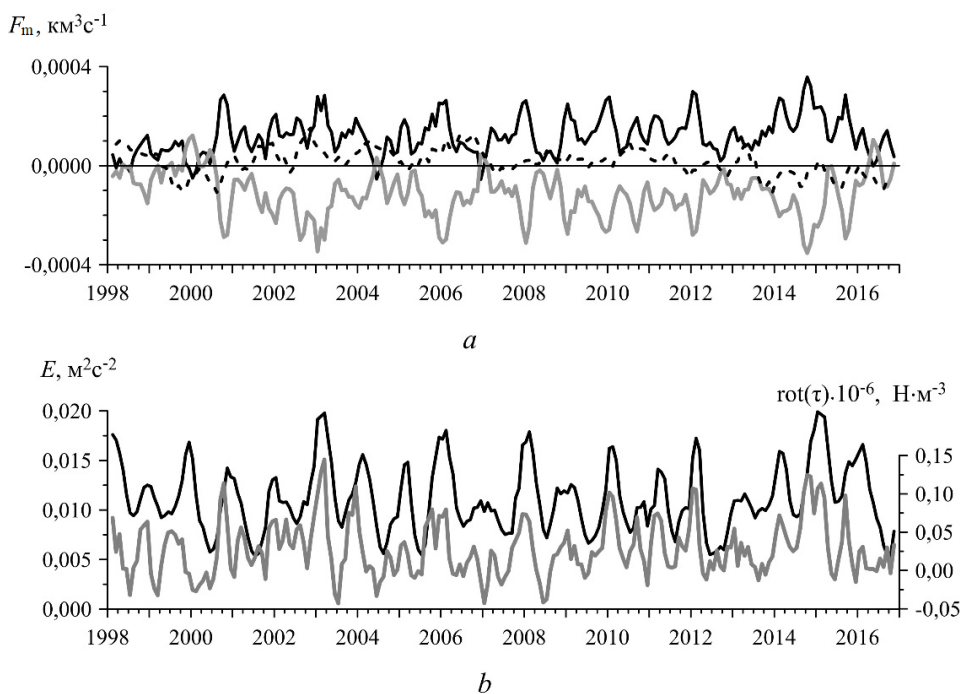
где $R(F)$ описывает биогеохимические взаимодействия между переменными состояния F ; w_s – скорость седиментации диатомовых водорослей и взвешенной органики (для остальных компонентов она равна нулю); u, v, w – компоненты скорости течений; K_h, K_v – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно. В местах устьев крупных рек задавались потоки питательных веществ, пропорциональные их концентрации и интенсивности речного стока [14]. Важной особенностью биологической части реанализа является ассимиляция данных измерений спутниковых цветковых сканеров. Эти данные представляют собой двухнедельные поля поверхностной концентрации хлорофилла a , подготовленные на основе продуктов *SeaWiFS, MODIS* и *MERIS* (URL: <http://blackseacolor.com/index.htm>) по разработанному специально для Черного моря алгоритму [15]. Для проверки качества результатов реанализа была проведена их валидация, показавшая,

что полученные поля достаточно хорошо описывают реальную термохалинную и биогеохимическую структуру моря [10, 16].

Оценка параметров обмена между СЗШ и глубоководной частью Черного моря проводилась с помощью биогеохимических полей и полей течений на регулярной сетке, полученных в результате физического реанализа, описанного выше. Период исследования составлял 19 лет (1998–2016 гг.). Область шельфа ограничивалась кривой, состоящей из трех частей: зональных участков в районе м. Херсонес и м. Калиакра (от берега до глубины 200 м) и кривой между ними вдоль изобаты 200 м. Через эти участки границы СЗШ рассчитывались потоки воды, неорганического азота и фитопланктона в верхнем 50-метровом слое.

Результаты

Величина потока биогенов с шельфа зависит непосредственно от водообмена. Рассмотрим значения потоков массы воды через поверхности, ограничивающие область СЗШ, в верхнем 50-метровом слое (рис. 1, *a*). Изображенные на графиках кривые представляют собой осредненные скользящим средним среднемесячные значения.



Р и с. 1. Потоки массы воды с СЗШ через три поверхности: зональное сечение у м. Калиакра (черная сплошная линия), вдоль изобаты 200 м (серая линия) и зональное сечение у м. Херсонес (штриховая линия) (*a*); плотность кинетической энергии течений в верхнем 50-метровом слое западной глубоководной части бассейна (черная линия), среднее значение завихренности поля напряжения трения ветра для этой же акватории (серая линия) (*b*)

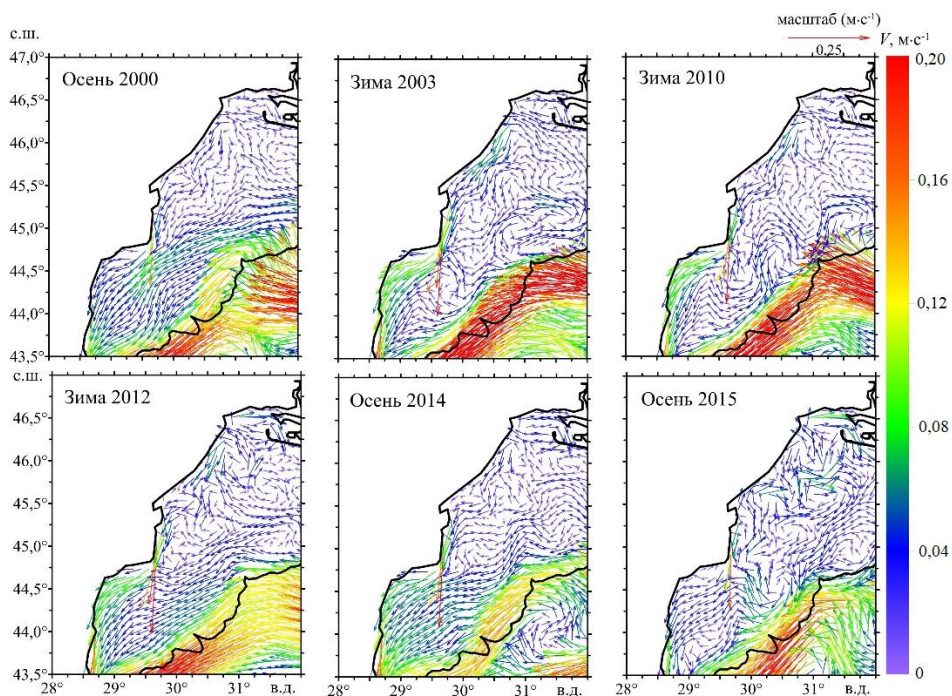
F i g. 1. Fluxes of water mass from the northwestern shelf through three surfaces: zonal section by the Cape Kaliakra (black solid line), along the 200 m isobath (grey line) and zonal section by the Cape Chersonesos (dotted line) (*a*); density of the currents' kinetic energy in the upper 50 m layer in the western deep-sea part of the basin (black line), average value of the wind stress vorticity for the same water area (grey line) (*b*)

Поток воды через зональное сечение у м. Калиакра почти всегда направлен с СЗШ (положительные значения потока на графике), в то время как поток массы жидкости через поверхность, образованную изобатой 200 м (боковое сечение), направлен в основном на шельф. Между максимумами первого потока и минимумами второго наблюдается хорошая корреляция. Средние за весь рассматриваемый период значения потоков массы через каждое из трех сечений равны $1,2 \cdot 10^{-4}$; $-1,16 \cdot 10^{-4}$ и $1,5 \cdot 10^{-5}$ км³с⁻¹ для м. Калиакра, боковой поверхности и м. Херсонес соответственно. Величина среднего потока через сечение у м. Херсонес на порядок меньше, чем через два других сечения. Потоки через боковое сечение и зональное сечение у м. Калиакра примерно компенсируют друг друга. Вода из глубоководной части бассейна поступает на СЗШ через боковую поверхность и уходит с шельфа в районе м. Калиакра.

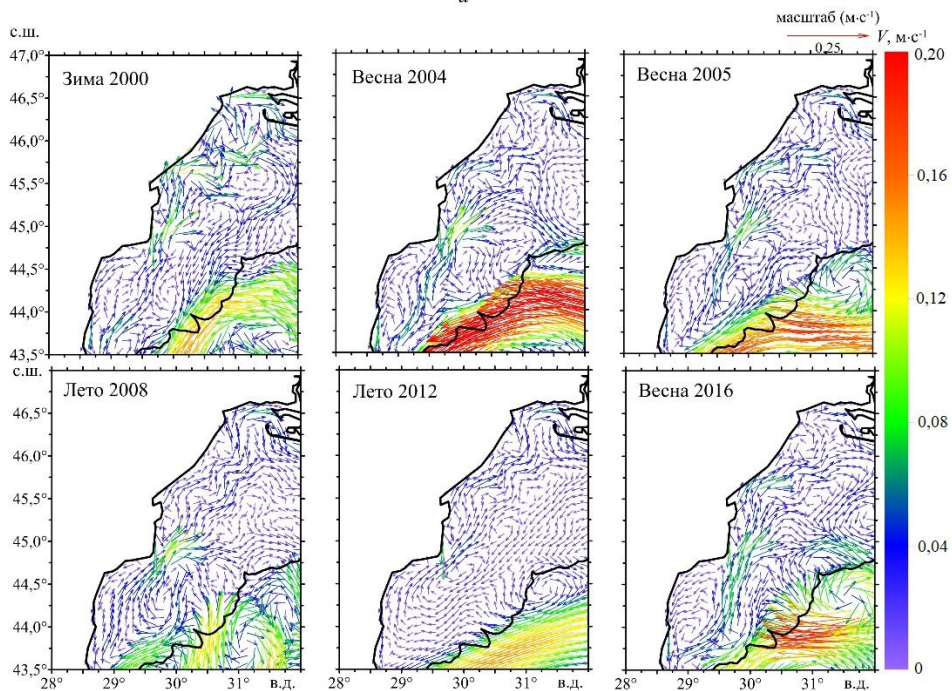
Основным элементом циркуляции в верхнем слое Черного моря является интенсивное Основное Черноморское течение (ОЧТ), локализованное в районе континентального склона, которое может ослабевать, меандрировать, разбиваться на отдельные круговороты и филаменты. Как показано в ряде работ (например, [10]), интенсивность ОЧТ напрямую связана с завихренностью поля ветра над акваторией Черного моря. На рис. 1, *b* приведен график зависимости от времени среднего по площади значения вихря напряжения трения ветра, а также средней по глубине 50 м плотности кинетической энергии течений в верхнем слое моря для западной глубоководной части бассейна. Следует отметить, что для вычисления вихря напряжения трения ветра использовались те же поля, что и при проведении реанализа. Плотность кинетической энергии течений получена по результатам реанализа. Как видно на этом рисунке, максимумы плотности кинетической энергии течений и завихренности поля ветра хорошо коррелируют. Если сравнить графики поведения плотности кинетической энергии течений и потоков массы, то можно заметить, что высокие значения энергии соответствуют случаям, когда наблюдаются максимумы в потоках массы через сечение у м. Калиакра и, соответственно, минимумы потоков через боковое сечение. Таким образом, высокие значения потоков массы воды на СЗШ через боковое сечение, а также с шельфа через сечение у м. Калиакра совпадают с интенсификацией ОЧТ, которая вызвана высокими значениями завихренности поля ветра.

На рис. 2 приведены примеры средних за сезон течений в верхнем 50-метровом слое западной части Черного моря при высоких и низких значениях плотности кинетической энергии.

При высоких значениях плотности кинетической энергии течений в глубоководной части Черного моря наблюдается четко выраженная струя ОЧТ, которая в районе восточной кромки СЗШ частично заходит на шельф (рис. 2, *a*). При этом поток массы жидкости через поверхность, ограниченную изобатой 200 м, направлен из глубоководной части моря на шельф и имеет максимальные абсолютные значения, а поток массы жидкости через зональное сечение у м. Калиакра, наоборот, направлен с шельфа и также имеет максимальные значения (рис. 1, *a*). Важно отметить, что течения на самом шельфе в этом случае направлены к югу, что и приводит к образованию потока жидкости, направленного с СЗШ через сечение у м. Калиакра. Таким образом, приток воды через восточную кромку шельфа благодаря струе ОЧТ компенсируется потоком воды с шельфовой зоны в южном направлении.



a

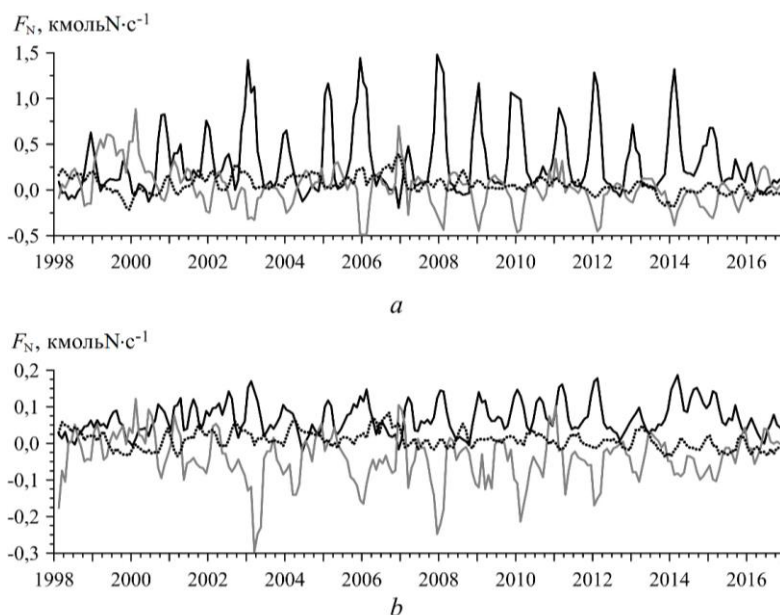


Р и с. 2. Фрагменты карт средних за сезон течений в верхнем 50-метровом слое: *a* – случаи с высокими значениями плотности кинетической энергии для западной глубоководной части бассейна, *b* – случаи с низкими значениями

Fig. 2. Fragments of the maps of the season-average currents in the upper 50 m layer: *a* – cases with high values of kinetic energy density for the western deep-sea part of the basin, *b* – cases with low values

В примерах с низкими значениями плотности кинетической энергии (и, соответственно, малыми потоками воды с шельфа у м. Калиакра) струя ОЧТ проявляется лишь фрагментарно (рис. 2, *b*) либо отходит от кромки шельфа. Необходимо подчеркнуть, что в последнем случае центр потока смещен к югу от СЗШ и его влияние на водообмен с шельфом невелико. Вместе с тем в характере течений в верхнем слое моря проявляется неупорядоченность, обусловленная большим влиянием вихревых структур на потоки массы жидкости. Отличительной чертой течений на самом СЗШ (в случаях низких значений плотности кинетической энергии) является их направленность вдоль берега к северу с минимальными по абсолютной величине значениями потоков массы воды через границы СЗШ.

Направление и величина потоков биогенов и компонентов экосистемы из шельфовой зоны в глубоководную часть Черного моря зависят прежде всего от направления и величины потоков массы воды, переносящих примесь. Существенное влияние на величину этих потоков оказывает и разность концентраций примеси на шельфе и в глубоководной части. Как было показано выше, концентрация биогенов в поверхностном слое Черного моря на СЗШ, поступающих в основном со стоками рек, значительно выше, чем в глубоководной части моря. Спутниковые карты распределения концентрации хлорофилла *a* демонстрируют повышенное содержание биопродукции в водах шельфа. Из-за высокой концентрации биогенов на СЗШ их поток в глубоководную часть в целом положителен. На рис. 3 представлены потоки неорганического азота (основной биогенный элемент в Черном море) и фитопланктона (один из компонентов морской экосистемы) через зональные сечения у м. Калиакра и м. Херсонес и по границе шельфа вдоль изобаты 200 м.



Р и с. 3. Потоки неорганического азота с СЗШ через три сечения (*a*) и потоки фитопланктона (*b*) (обозначение линий такое же, как на рис. 1, *a*)

F i g. 3. Inorganic nitrogen fluxes from the northwestern shelf through three sections (*a*) and phytoplankton fluxes (*b*) (line indication is the same as in Fig. 1, *a*)

Поток неорганического азота (рис. 3, *a*) в районе м. Калиакра почти всегда положителен, а его максимумы по времени совпадают с максимумами потока массы через это сечение. В то же время максимумы потока биогенов выражены ярче, чем максимумы потока жидкости, из-за высокой концентрации соединений неорганического азота в водах СЗШ. Поток азота через поверхность вдоль изобаты 200 м имеет как положительные, так и отрицательные значения, в отличие от потока массы жидкости через эту поверхность, имеющего в основном отрицательные значения. При этом максимальные значения потоков азота, направленные из глубоководной части на шельф (отрицательные значения на графике), коррелируют с максимумами потоков через зональное сечение у м. Калиакра. Поток азота через сечение у м. Херсонес существенно меньше потоков через другие две границы шельфа. Вместе с тем поток азота через сечение у м. Херсонес почти всегда положителен, и среднее его значение за весь рассматриваемый период ($0,056 \text{ кмольN}\cdot\text{с}^{-1}$) больше, чем через поверхность вдоль изобаты 200 м ($0,018 \text{ кмольN}\cdot\text{с}^{-1}$). Наибольший средний поток неорганического азота с шельфа приходится на зональное сечение у м. Калиакра – $0,314 \text{ кмольN}\cdot\text{с}^{-1}$. В отличие от потока массы жидкости, потоки неорганического азота через все три поверхности в среднем положительны, а их суммарный поток ($0,39 \text{ кмольN}\cdot\text{с}^{-1}$) составляет ~ 25 % от того, что поступает на СЗШ со стоками рек.

Графики временной эволюции потоков фитопланктона (рис. 3, *b*) и неорганического азота качественно похожи. Различие состоит в том, что максимумы потоков фитопланктона через сечение у м. Калиакра меньше максимумов потоков неорганического азота, а через боковое сечение больше. В целом такое поведение хорошо согласовывается с тем, как меняются со временем потоки массы жидкости: максимумы потоков через сечение у м. Калиакра наблюдаются главным образом в зимнее время и хорошо коррелируют с минимумами потоков через боковое сечение. Вместе с тем величины максимумов потока неорганического азота у м. Калиакра заметно превышают по абсолютной величине значения минимумов этого потока через боковое сечение, что можно объяснить следующим образом: концентрация неорганического азота на шельфе, обусловленная выносами рек, всегда выше, чем в глубоководной части моря. Что касается фитопланктона, то во время зимнего цветения его концентрация в глубоководной части моря высока, и в некоторых случаях может превышать значения на шельфе возле его границы. Как следствие, величина потока фитопланктона на шельф через боковую поверхность иногда превышает величину потока, направленного с шельфа у м. Калиакра.

Отмеченные выше различия потоков биогенов с СЗШ в глубоководную часть моря определяют характер их пространственного распределения. На рис. 4 приведены примеры среднемесячных карт распределения неорганического азота и фитопланктона в поверхностном слое Черного моря для типа циркуляции, при котором существует интенсивное ОЧТ, заходящее на СЗШ (см. рис. 2, *a*). Мощная струя ОЧТ вдоль свала глубин СЗШ препятствует переносу примеси поперек изобат. Вместе с тем поверхностные течения на шельфе направлены в основном на запад, что демонстрируют карты течений. Для компенсации этого потока у западного берега формируется интенсивное течение, направленное к югу. Это течение переносит наиболее концентриро-

ванную часть биогенов и биопродукции к южной границе СЗШ, где поток ОЧТ подхватывает и выносит вплоть до Анатолийского побережья воды с высокой концентрацией биогенов. Приведенные карты распределения поверхностной концентрации неорганического азота и фитопланктона демонстрируют узкие полосы повышенной концентрации, вытянутые довольно далеко вдоль западного и южного побережья. Воды с максимальной концентрацией биогенов и фитопланктона на СЗШ прижаты к западному берегу.

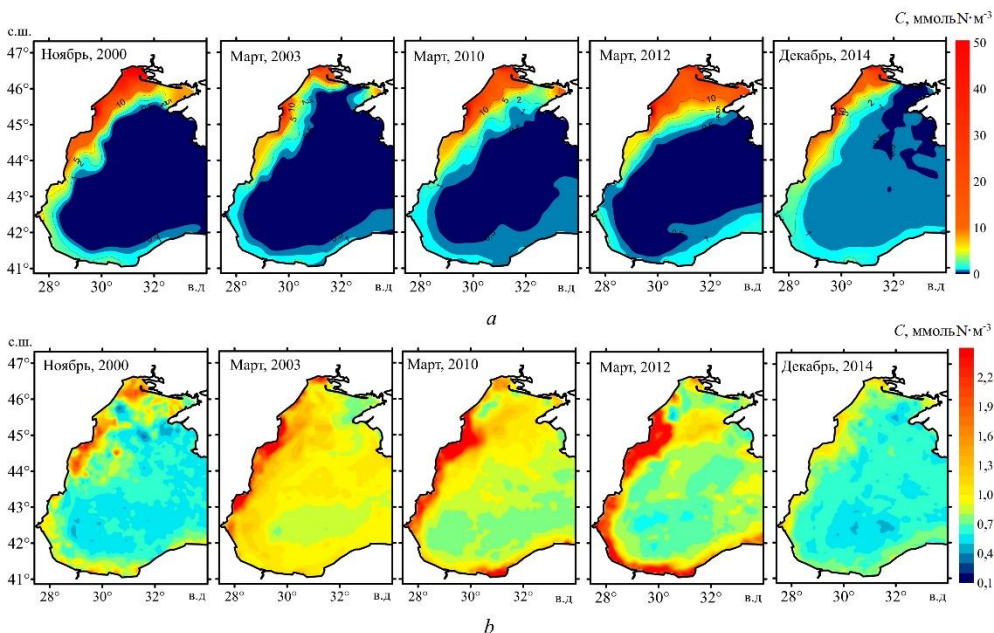


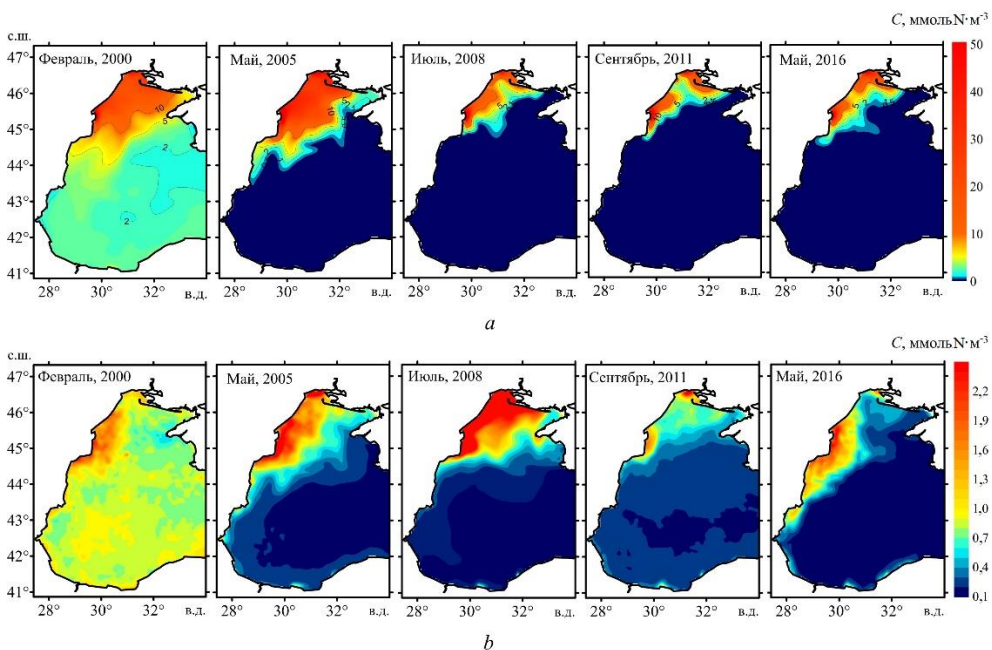
Рис. 4. Фрагменты карт среднемесячного распределения поверхностной концентрации неорганического азота (*a*) и фитопланктона (*b*) (циркуляция того же типа, что и на рис. 2, *a*)

Fig. 4. Fragments of the maps of the monthly-average distribution of the inorganic nitrogen (*a*) and phytoplankton (*b*) surface concentrations (circulation is of the same type as in Fig. 2, *a*)

Описанная выше схема распространения биогенов с СЗШ наблюдается не всегда. На рис. 5 приведены примеры поверхностного распределения неорганического азота и фитопланктона, качественно отличающиеся от рассмотренного ранее. Характерной чертой циркуляции в этих случаях (см. рис. 2, *b*) является отсутствие четко выраженной струи ОЧТ, за исключением весны 2004 и 2005 гг., когда ОЧТ наблюдается, однако его стрежень в северо-западной части проходит достаточно далеко от кромки шельфа. Течения на СЗШ направлены к северу и не переносят примесь в глубоководную часть бассейна. Это является важной особенностью циркуляции для всех случаев, представленных на рис. 2, *b*. Как следствие, повышенная концентрация биогенов и биопродукции (рис. 5) сосредоточена в сравнительно небольшой области в устьях рек.

Таким образом, основной вклад в распространение компонентов экосистемы и обмен между шельфом и глубоководной частью бассейна вносит характер циркуляции в верхнем слое Черного моря, в частности интенсивность и положение струи ОЧТ. При этом важны течения не только в глубоководной части моря, но и на шельфе. Случаям, когда биогены и биопродукция распро-

страняются далеко вдоль берега, соответствует циркуляция с выраженной струей ОЧТ, прижатой к кромке шельфа и западному берегу Черного моря. При таком характере циркуляции на СЗШ формируются поверхностные течения, направленные к западу, в результате чего развивается вдольбереговое течение, переносящее примесь к югу, где она подхватывается струей ОЧТ. Повышенное содержание концентрации компонентов экосистемы наблюдается только на шельфе в том случае, когда струя ОЧТ отходит от кромки шельфа, либо проявляется фрагментарно. При этом поток массы жидкости через поверхность вдоль изобаты 200 м направлен в основном с СЗШ. Для компенсации этого потока на шельфе возникает течение, направленное к северу (см. рис. 2, *b*), блокирующее примесь и не дающее ей распространяться вдоль западного, а затем и южного берега Черного моря.



Р и с. 5. Фрагменты карт среднемесячного распределения поверхностной концентрации неорганического азота (*a*) и фитопланктона (*b*) (для типа циркуляции, как на рис. 2, *b*)

F i g. 5. Fragments of the maps of the monthly-average distribution of the inorganic nitrogen (*a*) and phytoplankton (*b*) surface concentrations (for the circulation type as in Fig. 2, *b*)

Заклучение

В работе проведен анализ особенностей переноса компонентов экосистемы с СЗШ в глубоководную часть Черного моря. Потoki биогенов и биопродукции рассчитывались с использованием гидрофизических и биогеохимических полей Черного моря на регулярной сетке. Эти поля получены в результате реанализа, выполненного на основе модели экосистемы Черного моря с ассимиляцией данных дистанционных измерений как в численной модели циркуляции, так и в биогеохимическом блоке.

Поскольку направление и величина потоков биогенов и биопродукции определяются главным образом циркуляцией в верхнем слое моря, были рассчитаны также потоки массы воды. Наибольшая величина потока массы жид-

кости с шельфа наблюдается через зональное сечение у южной границы СЗШ (м. Калиакра), а наименьшая – через сечение у м. Херсонес. Поток массы через поверхность вдоль изобаты 200 м в среднем направлен на СЗШ и компенсирует поток массы у м. Калиакра. Такой характер течений определяется главным образом расположением струи ОЧТ. Когда она прижимается к кромке СЗШ, то частично заходит на шельф, в результате чего поток массы направлен в сторону шельфа. Для компенсации поступления жидкости на шельфе возникает течение, направленное к югу, в результате чего вода вытекает с шельфа у м. Калиакра. Когда струя ОЧТ слаба или проходит вдали от кромки шельфа, поток воды через поверхность вдоль изобаты 200 м близок к нулю или даже направлен с шельфа в глубоководную часть моря. В этом случае на шельфе образуется течение, направленное к северу, поток у м. Калиакра имеет минимальные значения, изредка он направлен в сторону шельфа. Проведенный анализ показал, что поведение струи ОЧТ, а следовательно, направление и величина потоков через границы СЗШ зависят от завихренности напряжения трения ветра над западной частью Черного моря. Чем больше величина завихренности поля ветра (максимальные значения наблюдаются в основном в зимний сезон), тем интенсивнее струя ОЧТ и, соответственно, выше значения потоков через поверхность вдоль изобаты 200 м (в сторону шельфа) и через зональное сечение у м. Калиакра (с шельфа).

Характер распространения биогенов и биопродукции с СЗШ также определяется в значительной мере направлением и величиной потоков массы жидкости. Качественно потоки неорганического азота и фитопланктона согласуются с потоками массы жидкости. Существенное влияние на величину потоков примеси оказывает разность концентраций этой примеси в шельфовой зоне и в глубоководной части Черного моря. Так как концентрация неорганического азота на шельфе, как правило, выше, чем в глубоководной части моря, за счет выноса реками, то максимумы потоков через сечение у м. Калиакра увеличиваются, а минимумы потоков через боковое сечение уменьшаются. Для потоков фитопланктона прослеживается обратная картина, которую можно объяснить тем, что в зимний сезон (когда в основном отмечаются максимумы этих потоков) концентрация фитопланктона в глубоководной части моря высока вследствие поступления биогенов в поверхностный слой из более глубоких слоев.

Характер циркуляции в верхнем слое также влияет на картину распределения поверхностной концентрации фитопланктона и неорганического азота. Циркуляции с интенсивной струей ОЧТ, прижатой к кромке шельфа, соответствует картина распределения поверхностной концентрации в виде узкой полосы высоких значений вдоль западного и частично южного берегов Черного моря. Когда струя ОЧТ слаба или отходит от кромки шельфа, что наблюдается при невысоких значениях завихренности поля ветра, повышенные значения концентрации сосредоточены на СЗШ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tolmazin D.* Changing coastal oceanography of the Black Sea. I: Northwestern Shelf // *Progress in Oceanography*. 1985. Vol. 15, iss. 4. P. 217–276. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(85\)90038-2](https://doi.org/10.1016/0079-6611(85)90038-2)

2. Modelling the Danube-influenced north-western continental shelf of the Black Sea. I: Hydrodynamical processes simulated by 3-D and box models / J. M. Beckers [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2002. Vol. 54, iss. 3. P. 453–472. doi:10.1006/ecss.2000.0658
3. Демьшев С. Г. Численный прогностический расчет течений в Черном море с высоким горизонтальным разрешением // *Морской гидрофизический журнал*. 2011. № 1. С. 36–47.
4. Oguz T., Velikova V. Abrupt transition of the northwestern Black Sea shelf ecosystem from a eutrophic to an alternative pristine state // *Marine Ecology Progress Series*. 2010. Vol. 405. P. 231–242. doi:10.3354/meps08538
5. Modelling the Danube-influenced north-western continental shelf of the Black Sea. II: Ecosystem response to changes in nutrient delivery by the Danube River after its damming in 1972 / C Lancelot [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2002. Vol. 54, iss. 3. P. 473–499. doi:10.1006/ecss.2000.0659
6. Modeling the nitrogen cycling and plankton productivity in the Black Sea using a three-dimensional interdisciplinary model / M. Grégoire [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2004. Vol. 109, iss. C5. C05007. doi:10.1029/2001JC001014
7. Coastal–open ocean exchange in the Black Sea: Observations and Modelling / E. Stanev [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2002. Vol. 54, iss. 3. P. 601–620. doi:10.1006/ecss.2000.0668
8. Shapiro G. I., Stanichny S. V., Stanychna R. R. Anatomy of shelf–deep sea exchanges by a mesoscale eddy in the North West Black Sea as derived from remotely sensed data // *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114, iss. 4. P. 867–875. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.020>
9. Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Zatsepin A. G. Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem // *Journal of Marine Systems*. 2018. Vol. 179. P. 10–30. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.11.001>
10. Dorofeev V. L., Sukhikh L. I. Analysis of variability of the Black Sea hydrophysical fields in 1993 – 2012 based on the reanalysis results // *Physical Oceanography*. 2016. Iss. 1. P. 33–47. doi:10.22449/1573-160X-2016-1-33-47
11. Дорофеев В. Л., Сухих Л. И. Некоторые тенденции долговременной изменчивости гидрофизических полей Черного моря по результатам реанализа // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. Севастополь : МГИ, 2017. Вып. 1. С. 15–22.
12. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system / G. K. Korotaev [et al.] // *Ocean Science*. 2011. Vol. 7, iss. 5. P. 629–649. doi:10.5194/os-7-629-2011
13. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. Vol. 137, iss. 656. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828
14. River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: Major drivers for ecosystem changes during past and future decades? / W. Ludwig [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2009. Vol. 80, iss. 3–4. P. 199–217. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.02.001>
15. Suslin V., Churilova T. A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-a and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners // *International Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 37, iss. 18. P. 4380–4400. doi:10.1080/01431161.2016.1211350
16. Dorofeyev V., Sukhikh L. A model for monitoring the evolution of the Black Sea ecosystem on the basis of remote sensing data assimilation // *International Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 39, iss. 24. P. 9339–9355. doi:10.1080/01431161.2018.1523589

Об авторах:

Дорофеев Виктор Львович, старший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: G-1050-2014**, viktor.dorofeev@mhi-ras.ru

Сухих Лариса Ивановна, младший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: M-4381-2018**, l.sukhikh@gmail.com