

Ю.Н.Рябцев *, Н.С.Геворгиз *, О.В.Кривенко **

**Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

***Институт биологии южных морей НАН Украины, г.Севастополь*

ОЦЕНКА ВЫНОСА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ШЕЛЬФА В ГЛУБОКОВОДНУЮ ОБЛАСТЬ ЧЕРНОГО МОРЯ

На основе адаптационных расчетов величин потоков, выполненных по климатическим данным, и среднегодовых значений концентраций неорганических соединений азота, фосфора и кремнекислоты дана количественная оценка возможного переноса биогенных элементов с северо-западного шельфа в открытую часть Черного моря.

Устойчивое функционирование экосистемы Черного моря тесно связано с процессами новообразования органического вещества, которые в значительной степени контролируются уровнем поступления питательных солей. Северо-западное побережье, на долю которого приходится почти 80 % речного стока в Черное море [1], является важнейшим источником биогенных элементов для первичного продуцирования непосредственно на шельфе, а, возможно, и в глубоководной области моря. Однако до настоящего времени практически отсутствуют представления о количестве биогенных элементов, выносимых с северо-западного шельфа, и их вкладе в формирование продуктивности вод глубоководной части моря.

Цель настоящей работы заключается в оценке сезонного хода величин потоков через условную границу, проходящую по свалу глубин, и расчете выноса неорганических соединений азота, фосфора и кремнекислоты с северо-западного шельфа в глубоководную область Черного моря.

Для получения полей течений выполнены адаптационные расчеты по среднемесячным климатическим данным для всего моря. Использовалась девятислойная квазиизопикническая модель, основанная на примитивных уравнениях [2]. Применялся адаптационный подход, при котором решается прогностическая задача, причем в уравнения вводятся дополнительные члены типа источников, пропорциональные разности исходных и рассчитываемых полей с параметром релаксации γ . Кроме того, члены типа источника вводятся в уравнения эволюции толщин слоев, что приводит к появлению источников и стоков массы во внутренних слоях. Эти члены вводятся так, чтобы не было потоков массы через поверхность и дно моря. В уравнениях переноса тепла и соли дополнительные члены полагаются пропорциональными разности рассчитываемых и заданных тепло и солезапасов слоев. Без этих членов при расчетах в мелководных частях бассейна за время расчета происходит быстрое приспособление гидротермодинамических полей к внешним факторам, что приводит к их сглаживанию и потере реально существующих особенностей, заложенных в исходных полях температуры и солености. В модели принимается приближение «твердой

крышки». Для описания формирования верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) использовано уравнение баланса энергии турбулентности в одномерном и стационарном приближениях.

На твердых границах ставятся условия прилипания и отсутствия потоков тепла и соли. На жидких границах (проливы, реки) задаются потоки воды в каждом слое и толщины слоев и ставятся условия для суммарных (адвективного и диффузионного) потоков тепла и соли. В проливе Босфор предполагается два слоя: черноморские воды вытекают из ВКС, мраморноморские втекают во внутренний слой. Суммарный расход воды через Босфор задается, расходы воды в верхнем и нижнем течениях Босфора считаются связанными с суммарным расходом функциональной зависимостью и рассчитываются. Уравнения модели и их разностная реализация подробно описаны в [3].

Расчеты выполнены для всего моря на сетке с шагами $\Delta x = 9,35$ км, $\Delta y = 9,27$ км и шагом по времени $\Delta t = 0,5$ ч. Учитывались атмосферное воздействие, сток рек, пролив Босфор, осадки и испарение [4, 5]. Значения базовой условной плотности задавались следующими: $\sigma_3 = 12,8$; $\sigma_4 = 14,13$; $\sigma_5 = 14,5$; $\sigma_6 = 14,9$; $\sigma_7 = 15,65$; $\sigma_8 = 16,3$; значения параметров брались как в [3].

В качестве начальных условий задаются поля толщин слоев h , температуры и солёности, а также отсутствие движения. Для получения полей h , T , S использовался климатический массив температуры и солёности.

Расчеты проводились до выхода на квазистационарный режим интегральной характеристики: средней по объему и по слоям кинетической энергии. В результате расчетов получены поля течений, а также согласованные между собой (и с полями течений) поля температуры и солёности.

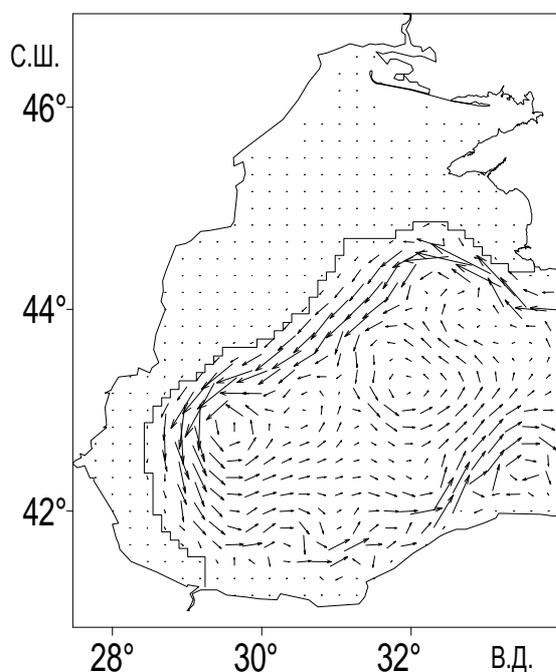
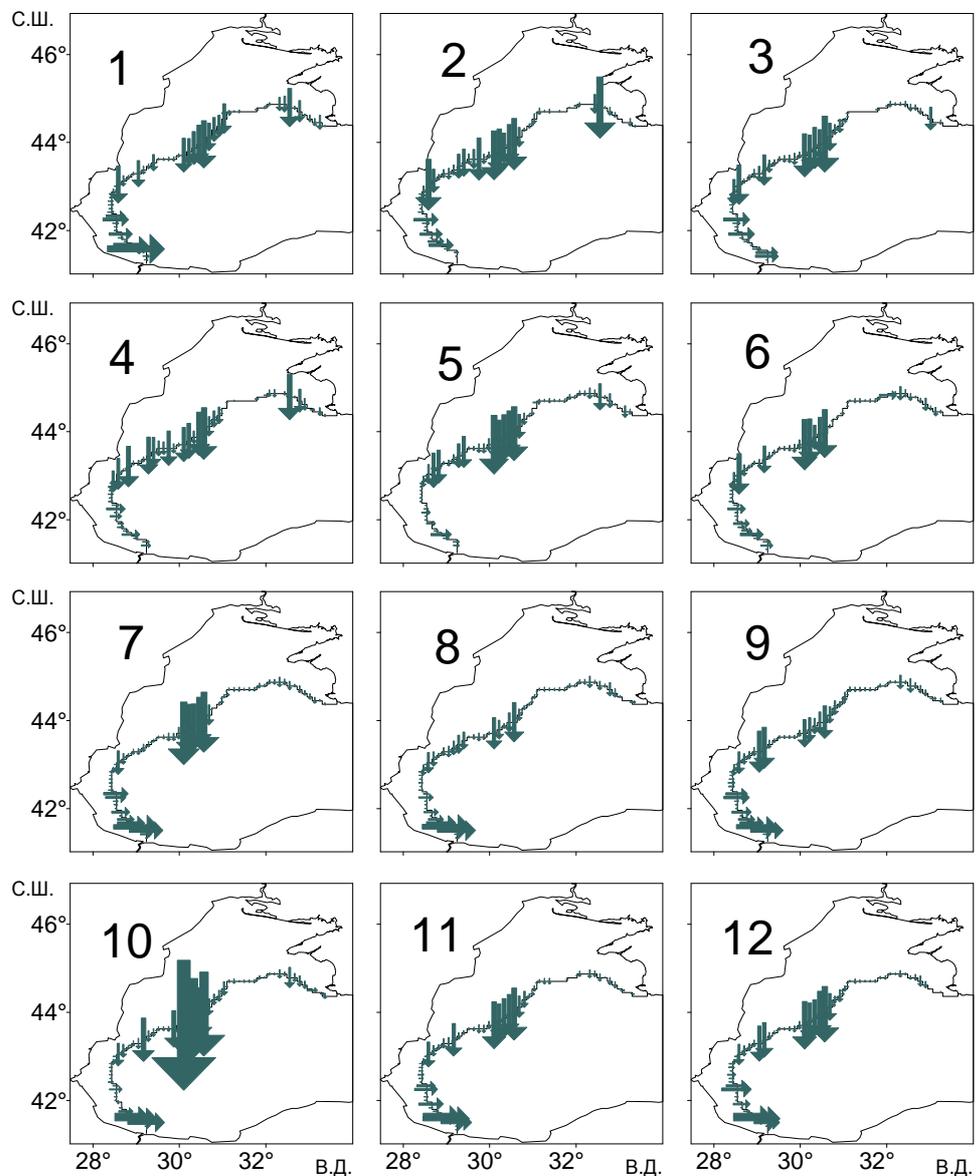


Рис. 1. Положение условной границы, отделяющей шельф от глубоководной области моря, относительно ОЧТ.

Выбрана условная граница, проходящая приблизительно по изобате 150 м (рис.1), отделяющая шельф от глубоководной части моря. Пространственное распределение потоков с шельфа в открытую часть моря для каждого месяца представлено на рис.2.

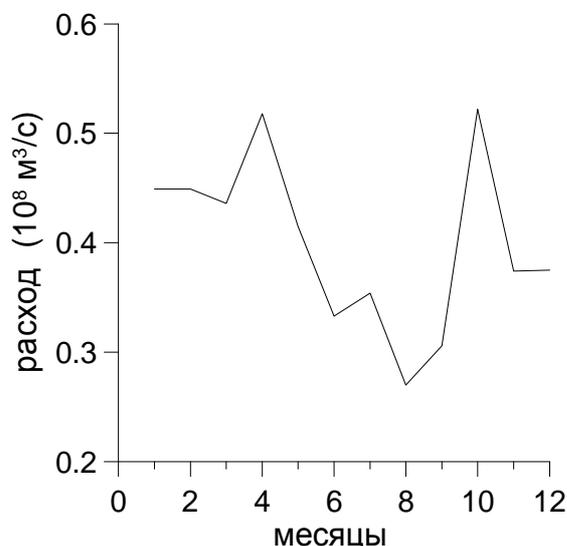
Постоянный максимум потоков существует напротив м.Калиакра. Самый большой расход здесь отмечается в октябре, и он в 2 – 3 раза больше расходов в этом месте в другие месяцы. Возможно, это связано с ослаблением циркуляции Основного черноморского течения (ОЧТ) в октябре. Можно также отметить усиление потоков через условную границу в районе пролива Босфор во второй половине года с июля по январь.



Р и с . 2 . Пространственное распределение потоков вдоль условной границы, отделяющей шельф от глубоководной области моря, по отдельным месяцам года.

Временной ход суммарного потока (от поверхности до дна) через условную границу представлен на рис.3. Максимальные значения потоков с шельфа приходятся на апрель и октябрь, что может быть связано с сезонными особенностями циркуляции вод в области ОЧТ.

Выполненные расчеты позволили подойти к оценке потоков основных биогенных элементов с северо-западного шельфа в глубоководную область Черного моря. Для этого были использованы данные по содержанию неорганических соединений азота, фосфора и кремнекислоты, полученные в северо-западной части Черного моря в районе, ограниченном координатами



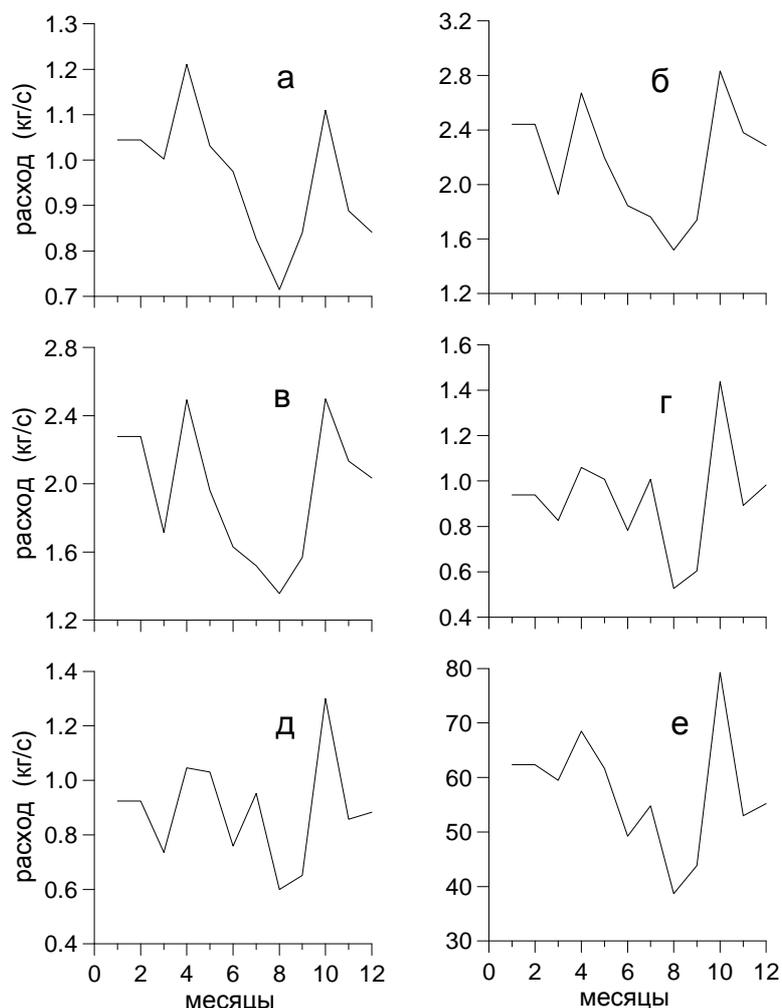
Р и с . 3 . Общий объем потока через условную границу, отделяющую шельф от глубоководной области моря.

44 – 45° с.ш. и 30,5 – 34° в.д. в период с 1980 по 2002 гг. [6]. Данные были сгруппированы по 0,5° × 0,5° квадратам простой географической сетки. Для каждого квадрата были рассчитаны среднегодовые значения концентраций и среднеквадратические отклонения этих показателей в слое 0 – 30 м. Выбор слоя был обусловлен тем, что он соответствует зоне наиболее активного фотосинтеза, и содержание минеральных солей в нем непосредственно влияет на продуктивность вод. Отметим, что южнее 45° с.ш. расчет переноса основных биогенных элементов с

шельфа в глубоководную область моря не проводился, и условная граница между этими районами моря была проведена вдоль 45° с.ш. к берегу.

Результаты расчетов временного хода возможного выноса биогенных элементов с северо-западного шельфа в глубоководную область моря представлены на рис.4. Видно, что полученные кривые с небольшими видоизменениями повторяют сезонный ход общего объема потока через условную границу (рис.3). Максимальные величины выноса биогенных элементов приходятся на середину весеннего (апрель) и осеннего (октябрь) сезонов. Использование при расчетах среднемесячных величин концентраций биогенных элементов, а не среднегодовых, может дать небольшое количественное изменение в результирующих графиках. Однако, слабая обеспеченность данными гидрохимических наблюдений не позволила получить регулярную картину сезонной изменчивости концентраций с пространственным разрешением, необходимым для расчетов. Поскольку качественное поведение кривых расхода биогенных элементов определяется общими потоками массы через условную границу, то использование среднегодовых значений, обеспечивающих достаточное разрешение по пространству, более корректно, чем применение имеющихся среднемесячных значений.

Исходя из наших расчетов, суммарный расход биогенных элементов через условную границу между северо-западным шельфом и глубоководной областью моря варьирует в пределах (0,2 – 0,3)·10⁷ кг/мес для аммония и фосфатов, (0,4 – 0,7)·10⁷ кг/мес для суммы нитратов и нитритов и (10 – 21)·10⁷ кг/мес для кремниевой кислоты. Полученные значения сопоставимы с количеством данных соединений, поступающих в северо-западную часть Черного моря с речным стоком. Аммоний и фосфаты, которые отличаются высокими скоростями биотического оборота в толще воды и осадках, переносятся через условную границу в объеме, равном их поступлению с речным



Р и с . 4 . Суммарный расход аммония (а), нитратов и нитритов в сумме (б), нитратов (в), нитритов (г), фосфатов (д), кремнекислоты (е) через условную границу.

стоком [7, 8]. Нитраты, которые активно потребляются фитопланктоном в приустьевой зоне [9], но медленно регенерируются как в водной толще, так и на дне [7], переносятся в несколько раз меньшем объеме, по сравнению с их выносом реками. Исходя из данных [7], в летне-весенний период поступление нитратов с речным стоком может быть оценено в $(3 - 5) \cdot 10^7$ кг/мес и в среднем $1,9 \cdot 10^7$ кг/мес по данным [10]. Количество кремнекислоты, переносимой с шельфа в глубоководную область, почти на порядок превышает значения, характерные для речного стока $((1,5 - 3) \cdot 10^7$ кг/мес) [7, 8]. Это может быть связано с особенностями биотического круговорота кремния, включение которого в органическое вещество связано с жизнедеятельностью только одной группы водорослей – диатомовых.

Таким образом, сезонный ход величин потоков через условную границу, проходящую по свалу глубин, характеризуется равнозначными по величине максимумами в апреле и октябре. Аналогичный вид имеет сезонная динамика переноса неорганических соединений азота, фосфора и кремнекислоты с северо-западного шельфа в глубоководную область Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Региональная океанология.– М.: Изд-во Московского ун-та, 1992.– 224 с.
2. *Рябцев Ю.Н., Шапиро Н.Б.* Моделирование сезонной изменчивости Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.*– 1997.– 1.– С.12-24.
3. *Алаев В.Г., Рябцев Ю.Н., Шапиро Н.Б.* Адаптационный расчет скорости течений на шельфе с помощью квазиизопикнической модели // *Морской гидрофизический журнал.*– 1999.– 4.– С.64-79.
4. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.4. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия.*– Л: Гидрометеоздат, 1991.– 430 с.
5. *Rachev N.H., Roussenov V.M., Stanev E.V.* The Black Sea climatological wind stress // *Bulg. J. Meteorol. Hydrol.*– 1991.– 2.– P.72-79.
6. *Геворгиз Н.С., Кривенко О.В., Кондратьев С.И.* Обобщение данных многолетних исследований гидрохимического режима вод северо-западной части Черного моря за период 1980-2002 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005.– настоящий выпуск.
7. *Friedrich J., Dinkel C., Friedl G. et al.* Benthic nutrient cycling and diagenetic pathways in the north-western Black Sea // *Estuarine, Coastal and Shelf Science.*– 2002.– 54.– P.369-383.
8. *Cociasu A., Dorogan L., Humborg C., Popa L.* Longterm ecological changes in the Romanian coastal waters of the Black Sea // *Marine Pollution Bulletin.*– 1996.– 32.– P.32-38.
9. *Ragueneau O., Lancelot C., Egorov V. et al.* Biogeochemical transformations of inorganic nutrients in the mixing zone between the Danube river and the north-western Black Sea // *Estuarine, Coastal and Shelf Science.*– 2002.– 54.– P.321-336.
10. *Mee L.D.* The Black Sea in crisis: a need for concentrated international action // *AMBIO.*– 1994.– 21, № 4.– P.278-286.

Материал поступил в редакцию 24.02.2005 г.