

УДК 551.464.6

ВОСХОДЯЩИЕ ПОТОКИ АММОНИЯ И БАЛАНС БИОГЕНОВ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Е. А. Кубрякова

Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины, г. Севастополь

Функционирование морской экосистемы возможно благодаря многочисленным взаимосвязям между ее компонентами, которые осуществляются за счет потоков различных веществ. Исследование распределения неорганических форм азота и изучение их потоков в бассейне является актуальным, поскольку эти вещества являются лимитирующим фактором процесса роста и развития живых организмов. Известно, что в процессе их жизнедеятельности образуется органическое вещество, которое оседает и минерализуется в эвфотическом слое. В процессе минерализации органического вещества образуется аммоний, который наряду с нитратами является источником пищи для фитопланктона. Кроме того, в процессе нитрификации аммонийный азот переходит в азот нитратов, пополняя запасы последних. По примерным оценкам [1] около 10 % органического вещества безвозвратно оседает в анаэробную зону, однако баланс нитратов не нарушается, следовательно, существует такой источник нитратов, который позволяет компенсировать потери органического вещества. Нитраты поступают в море с речными водами в прибрежные районы, а затем переносятся в центральную часть моря из-за сезонной изменчивости экмановского переноса [2] и мезомасштабными вихрями в летний период [3]. Преобладающая в центральной части Черного моря циклоническая циркуляция вызывает подъем вод, который приводит к возникновению другого источника – поступлению глубинного аммония из анаэробной зоны. Часть аммония окисляется на границе субкислородной – анаэробной зон, а оставшийся аммоний в процессе нитрификации переходит в нитраты (через промежуточную стадию – образование нитритов). Также питательные вещества поступают в море с осадками.

В настоящей работе на основе расчетов по одномерной физико-биогеохимической модели для глубоководной части моря оценены вклады всех слагаемых в уравнения переноса аммония и нитратов и определен вклад поступающего снизу аммония на продукцию нитратов в эвфотическом слое.

Одномерная модель включает в себя гидродинамическую и биогеохимическую подмодели. Подмодели связаны через коэффициент вертикальной турбулентной диффузии и поля температуры, которые рассчитываются в гидродинамической части и затем используются для расчета биогеохимических параметров.

Гидродинамическая подмодель построена на основе модели POM [4]. Эта модель была адаптирована для Черного моря в [5], однако модель [5] не учитывает влияния вертикальных движений на динамику жидкости. Как было показано в [6], вертикальные движения необходимы для корректного воспроизведения термохалинной структуры моря. В данной модели с целью учета вертикальных движений задаются поля вертикальной скорости, полученные в результате параметризации. Подробное описание параметризации, а также уравнения модели и граничные условия приводятся в [2, 6].

По вертикали расчет проводится при z , равной 0; 0,5; ...; 50; 52; ...; 150; 170; ...; 590; 592; ...; 600,0 м. Нижняя граница области моделирования H составляет 600 м. Система уравнений для всех компонентов модели численно решалась методом прогонки с временным шагом 10 минут. Расчет проводился на 10 лет до установления периодического решения. Затем, используя полученные значения физических и биогеохимических параметров, расчет был проведен на один год. Сезонная изменчивость атмосферных параметров задается по данным реанализа ERA-40¹, проведенного в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF²) с временной дискретностью 6 ч [7] и осредненного по глубоководной части Черного моря за период 1971 – 2001 гг.

Биогеохимическая подмодель основана на модели [8]. Она состоит из биологического, азотного и окислительно-восстановительного блоков. Временная изменчивость всех биогеохимических параметров описывается уравнениями переноса диффузии, которые имеют общий вид:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (W + w_s) \frac{\partial F}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_H + v_b) \frac{\partial F}{\partial z} \right] + R(F),$$

где F – концентрация компоненты биогеохимической подмодели, мкМ; W – вертикальная скорость, м/с; w_s – скорость оседания параметра (отлична от нуля только для диатомовых водорослей, растворенного органического вещества и взвешенного марганца), м/с; K_H – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии, м²/с²;

¹ 40 Year Re-analysis Data Archive. (ECMWF Re-Analysis) – проект повторного анализа данных о параметрах глобальной атмосферы и условиях на поверхности за 45-летний период с сентября 1957 по август 2002 гг.

² European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (г. Рединг, Великобритания).

v_b – фоновое значение турбулентной диффузии, m^2/c^2 ; $R(F)$ – слагаемое типа источников-стоков, описывающее взаимодействие компоненты F биогеохимической подмодели с другими.

В отличие от [8, 9], где рассматривался 150-метровый слой, в настоящей работе описываются верхние 600 м, следовательно, рассматриваются также процессы, протекающие в анаэробной зоне. Для корректного описания цикла марганца на границе субкислородной – анаэробной зон и внутри последней система химических уравнений была дополнена. Подробно о выборе уравнений в [10].

В модели представлены два компонента фитопланктона, микро- и мезозоопланктоном, бактериопланктоном, *динофлагеллятой Noctiluca scintillans*, растворенные и взвешенные органические вещества, аммоний, нитриты, нитраты, кислород, сероводород, растворенный и взвешенный марганец, элементная сера.

В качестве начальных условий принимаются равные малые концентрации всех компонент биологического блока и используются начальные профили аммония и нитратов, кислорода, сероводорода, растворенного марганца [8, 11]. Граничные условия в общем виде задаются следующим образом:

$$\left[(K_H + v_b) \frac{\partial F}{\partial z} \right] + (W + w_s) F = 0, \text{ при } z = 0, H$$

Для уравнения кислорода граничные условия на поверхности моря задаются следующим образом:

$$\left[(K_H + v_b) \frac{\partial O_2}{\partial z} \right]_{z=0} = V_p [O_2^{sat} - O_2]_{z=0}$$

где $V_p = 3$ м/день – скорость поступления кислорода из атмосферы в море; O_2^{sat} – концентрация насыщения кислородом, рассчитывается по уравнениям UNESCO через значения температуры и солености.

На нижней границе области моделирования задаются концентрации аммония, сероводорода, растворенного марганца, равные 44, 152,0 и 6,27 мкМ, соответственно. Эти величины взяты как значения концентраций данных веществ на нижней границе начального профиля.

Параметризация взаимодействия биологических компонент содержит безразмерные параметры, которые выбирались согласно данным, приведенным в [9]. Слагаемые типа источников-стоков для биологического и азотного блоков описываются выражениями аналогичным тем, что и в [8].

Учет сезонной изменчивости атмосферных параметров и вертикальной скорости течений позволил получить корректное периодическое воспроизведение как физических, так и биогеохимических параметров, однако в данной работе не приведены из-за ограниченного объема статьи.

Оценка вклада различных процессов на поддержание баланса нитратов. Нитраты являются основным источником пищи для фитопланктона. Для поддержания равновесия в экосистеме необходимо сохранять баланс питательных веществ.

Рассмотрим уравнение переноса нитрата и аммония:

$$\frac{\partial Na}{\partial t} + W \frac{\partial Na}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_H + v_b) \frac{\partial Na}{\partial z} \right] + R_{N_2} + R_{ND} + R_{NPh} + R_{NMn}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial NH_4}{\partial t} + W \frac{\partial NH_4}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_H + v_b) \frac{\partial NH_4}{\partial z} \right] + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9, \quad (2)$$

Первые слагаемые описывают изменение концентрации нитратов и аммония, соответственно, во времени; вторые слагаемые – перенос веществ за счет вертикальной скорости; третьи слагаемые – перенос веществ под действием диффузионного процесса; R_{N_2} – II ступень нитрификации; R_{ND} – процесс денитрификации; R_{NPh} – потребление нитратов фитопланктоном; R_{NMn} – окисление растворенного марганца нитратами; R_A – аммонификация; R_{ARe} – реминерализация; R_{Aph} – потребление аммония фитопланктоном; R_{ANI} – I ступень нитрификации; R_{AO} – окисление кислородом.

На рис.1 изображены средние профили каждого слагаемого в (1) на глубинах 0-115 м, где присутствуют нитраты. Основной вклад в поступление нитратов вносит процесс нитрификации, в результате которого происходит образование нитратов из аммония через промежуточную стадию – образование нитрита. Профиль соответствующего слагаемого R_{N_2} имеет два максимума: на глубине 20 м и 70 м. На обеих глубинах источником нитратов является аммоний, однако увеличение концентрации аммония на этих глубинах происходит по разным причинам.

Как видно на рис. 2, а, где изображены средние профили каждого слагаемого в (2), в пределах 0 – 60 м источниками аммония являются процессы аммонификации и реминерализации, т.е. разложение органического вещества. В зоне 60 – 115 м (рис. 2, б) основным источником аммония является процесс адвекции, поставляющий вещество из богатой им анаэробной зоны наверх. На глубине 70 м, где наблюдается максимум адвекционного слагаемого, находится и максимум стока аммония. Аммоний на этой глубине переходит в нитриты в результате первой стадии нитрификации. Нитриты в свою очередь переходят в нитраты во время второй стадии нитрификации (рис. 1), что таким образом «подпитывает» слой максимального содержания нитратов в нижней части нитроклина.

Оценим вклад различных слагаемых в образование и поглощение нитратов и аммония на глубинах 0 – 115 м.

Процентные вклады слагаемых типа источников и стоков (1) – (2) рассматриваются отдельно для двух слоев: 0 – 60 и 60 – 115. Основное потребление нитратов в слое 0 – 60 м (99,45 %) происходит в результате его поедания фитопланктоном. В слое 60 – 115 м нитраты расходуются в процессе денитрификации (31,34 %), незначительное истощение их запасов происходит в результате потребления фитопланктоном (4,34 %) и окисления растворенного марганца нитратами (0,76 %), кроме того, значительная часть нитратов переносится (63,16 %) с глубин 70 м под действием направленной вверх вертикальной скорости. Основным, а в верхних 60 м, и единственным источником образования нитратов, является процесс нитрификации. Таким образом, источником нитратов является аммоний, а преобладающим способом сокращения содержания нитратов является его потребление фитопланктоном.

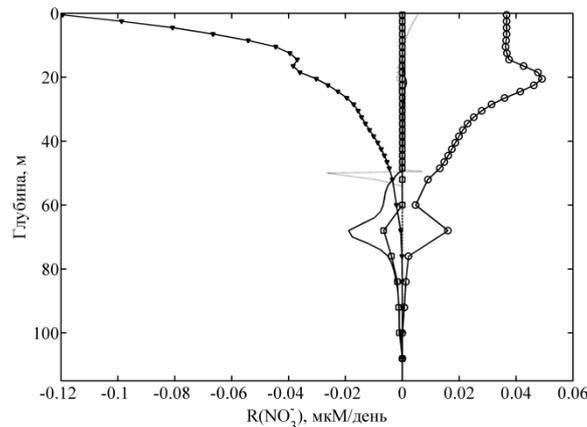


Рис.1. Профили адвективных (сплошная линия) и диффузионных (штрих-пунктирная) слагаемых, слагаемых правой части уравнения переноса нитратов, описывающих процессы: II ступень нитрификации (—○—), денитрификации (—□—), потребление фитопланктоном (—▼—), взаимодействие с растворенным марганцем (II) (штриховая).

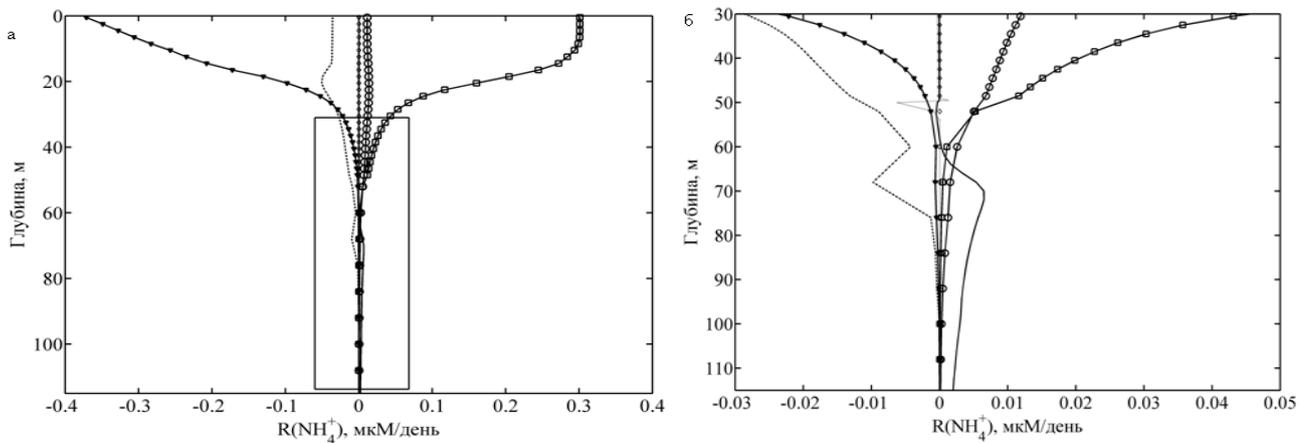


Рис.2
 Профили адвективных

адвективных (сплошная линия) и диффузионных (штриховая) слагаемых, слагаемых правой части уравнения переноса аммония, описывающих процессы: аммонификации (—○—), реминерализации (—□—), потребления аммония фитопланктоном (—▼—), I ступень нитрификации (штрих-пунктирная), окисления кислородом (◇)

Рассмотрим источник и стоки аммония на соответствующих глубинах. В верхних 60 м основным источником появления аммония является процесс реминерализации (92,09 %), также способствует образованию аммония процесс аммонификации (7,91 %). Большая часть аммония в верхнем рассматриваемом слое тратится на питание фитопланктона (78,24 %), на процесс нитрификации (21,64 %) и малая часть аммония переносится

за счет диффузионных и адвекционных процессов (0,1 и 0,02 %, соответственно). В слое 60 – 115 м преобладающим источником аммония является поступление аммония за счет вертикальных движений (76,38 %), остальная часть образуется в результате аммонификации (18,58 %), реминерализации (5,02 %) и поступает с диффузионными процессами (0,02 %). Потери аммония в этом слое связаны в первую очередь с процессом нитрификации, т.е. аммоний переходит в нитриты, затем в нитраты, и лишь меньшая доля потребляется фитопланктоном (12,48 %) и окисляется кислородом (0,3 %). Таким образом, основным способом поступления аммония в слой 0 – 60 м является процесс реминерализации, а в слое 60 – 115 м – вертикальные движения вод, поднимающие аммоний из богатой аммонийной зоны. Эти различные по своей природе процессы обеспечивают постоянство концентрации аммония, необходимого для пополнения запасов нитратов на этих глубинах.

Интегральное количество нитратов, которое поступает в слой 0 – 115 м, составляет $2,1 \cdot 10^{-5}$ мкМ/день, из них $1,90 \cdot 10^{-6}$ мкМ/день поступает в слой 60 – 115 м за счет преобразования аммония, поднимающегося снизу в эвфотическую зону, это примерно 9%.

Заключение. Было показано, что вертикальные движения, которые переносят аммоний из анаэробной зоны, могут обеспечить поддержание баланса нитратов в верхнем слое, компенсируя потери нитратов вследствие оседания детрита и перехода нитратов в N_2 . По примерным оценкам [1] из эвфотической зоны теряется 10% органического вещества, эти оценки согласуются с тем количеством нитрата, который вновь поступает в эвфотическую зону за счет подъема аммония по нашим расчетам.

ლიტერატურა – REFERENCES – ЛИТЕРАТУРА

1. Brewer P.G., Murray J.W. Carbon, nitrogen and phosphorus in the Black Sea // Deep-Sea Res. 1973. Vol. 20. P. 803 – 818.
2. Кубрякова Е.А., Коротаев Г.К. Сезонная изменчивость циркуляции и формирование солёности поверхностных вод Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2013 (в печати).
3. Shapiro G.I., Stanichny S.V., Stanichna 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. V. 114. № 4. P. 867 – 875.
4. Mellor G.L. One-dimensional, ocean surface layer modeling: a problem and a solution // J. Phys. Oceanogr. 2001. V. 31. P. 790 – 809.
5. Oguz T., Ducklow H., Malanotte-Rizzoli P. et al. Simulation of annual plankton productivity cycle in the Black Sea by a one-dimensional physical-biological model // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № C7. P. 16585 – 16599.
6. Кубрякова Е.А., Коротаев Г.К. Влияние вертикальной скорости на воспроизведение изменчивости термохалинной структуры верхнего слоя морского бассейна // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. Вып. 25. Т. 2. С. 220-239.
7. Uppala S.M., Kallberg P.W., Simmons A.J. et al. The ERA-40 re-analysis // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2005. T. 131. № 612. P. 2961 – 3012.
8. Oguz T., Ducklow H., Malanotte-Rizzoli P. Modeling distinct vertical biogeochemical structure of the Black Sea: Dynamical coupling of the oxic, suboxic, and anoxic layers // Global Biogeochemical Cycles. 2000. Vol. 14, № 4. P. 1331-1352.
9. Oguz T., Murray J.W., Callahan A. Modeling redox cycling across the suboxic-anoxic interface zone in the Black Sea // Deep-Sea Res. I. 2001. Vol. 48. P. 761-787.
10. Кубрякова Е.А., Коротаев Г.К. Моделирование марганцевого цикла в рамках одномерной биогеохимической модели Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. Вып. 26. Т. 2. С. 272-286.
11. Kononov S.K., Murray J.W., Luther G.W. et al. Processes controlling the redox budget for the oxic/anoxic water column of the Black Sea // Deep-Sea Res. Part II. 2006. Vol. 53. P. 1817-1841.

UDC 551.465

UPWARD FLUX OF AMMONIUM AND BALANCE OF NUTRIENTS IN THE UPPER LAYER OF THE DEEP PART OF THE BLACK SEA/Kubryakova E.A./ Transactions of the Institute of Hydrometeorology, Georgian Technical University. - 2013. -V.119. -pp. 269-273 - Russ.; Summ. Eng., Russ.

The influence of upward flux of ammonium on the nitrate balance in the euphotic layer of the deep part of the Black Sea is investigated on the basis of a one-dimensional physical-biogeochemical model. The model includes physical, biological and redox blocks for 600 meters of the upper layer. Physical block is connected with others due to the fields of temperature, salinity, vertical diffusion coefficient and the vertical velocity, which is given by the parameterization. Upward ammonium fluxes and production

of nitrate and nitrite by nitrification are estimated as a result of numerical calculations. It is shown that upward ammonium fluxes have significant impact on maintaining the balance of nitrate in the upper layer for the deep part of the Black Sea.

УДК 551.465

ВОСХОДЯЩИЕ ПОТОКИ АММОНИЯ И БАЛАНС БИОГЕНОВ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ. /Кубрякова Е.А./ Сб. Трудов Института Гидрометеорологии Грузинского Технического Университета. -2013.-т.119.-с.269-273 - Рус., Рез. Англ., Рус.

В настоящей работе на основе одномерной физико-биогеохимической модели проводится исследование влияния восходящих потоков аммония на поддержание баланса нитратов в эвфотическом слое глубоководной части Черного моря. Модель охватывает верхний 600-метровый слой и представлена физическим, биологическим и окислительно-восстановительным блоками. Связь физического блока с остальными происходит через поля температуры, солёности, коэффициента вертикальной диффузии и вертикальной скорости, которая задается в модели путем параметризации. В результате численных расчетов оценены восходящие потоки аммония и производство нитратов и нитритов в результате реакции нитрификации. Показано, что для глубоководной части Черного моря существенное влияние на сохранение баланса нитратов в верхнем слое оказывают восходящие потоки глубинного аммония.