

УДК 551.464.6(267)

**ЭЛЕМЕНТЫ БАЛАНСА БИОГЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА,
ФОСФОРА И КРЕМНИЯ В ИНДИЙСКОМ ОКЕАНЕ**

Максимова М. П.

Океан представляет динамически сбалансированную биогеохимическую систему.

В. И. Вернадский [3] рассматривает геохимическое постоянство океана как совокупность бесконечного количества самых разнообразных, непрерывно происходящих динамических, химических, физико-химических, геохимических, биогеохимических равновесий.

В океане происходит непрерывный круговорот веществ и энергии. Все химические элементы, входящие в состав океанской воды в растворенном, коллоидном, взвешенном состоянии и включенные в организмы, населяющие океан, находятся в постоянном движении, измеряемом подчас несопоставимыми единицами времени.

Одним из важнейших процессов, происходящих в океане, является круговорот органического вещества, он тесно связан с круговоротом важнейших биогенных элементов — азота, фосфора, кремниевой кислоты. Эти химические элементы включены в круговорот: минеральные соединения, растворенные и взвешенные в океанской воде — живые организмы — отмершее органическое вещество — минеральные соединения. Малый круг предопределяет прохождение всех этих фаз в фотическом слое океана и, как покажут расчеты, значение его, особенно в низких широтах, чрезвычайно велико. Но частично биогенные элементы выпадают из малого круга и включаются в большой круговорот.

Потеря биогенных элементов из малого круга происходит при гравитационном выносе их из фотического слоя с неразложившимися остатками органического вещества, при переходе на высшие уровни трофической цепи и миграции живых организмов этих звеньев в глубины, а также при физической миграции свободного восстановленного азота в атмосферу и чисто физической потери из фотического слоя в зонах опускания поверхностных вод. Наблюдающееся постоянство во времени содержания биогенных элементов в фотическом слое в масштабе всего Мирового океана в целом свидетельствует об установившемся равновесии процессов, приводящих к потере биогенных элементов фотическим слоем, и процессов, способствующих компенсации — выполнению этих потерь.

В настоящей статье нас интересует так называемый «малый круговорот» — потеря биогенных элементов фотическим слоем и их компенсационное пополнение в этом слое. К компенсационным процессам относятся: поступление биогенных элементов в фотический слой при подъеме глубинных вод и с атмосферными осадками и речным стоком.

Подъем глубинных вод является основным источником пополнения фотического слоя биогенными элементами. Приближенная оценка поступления биогенных элементов в фотический слой при подъеме глу-

бинных вод сделана для динамически активной акватории Индийского океана, расположенной к северу от зоны субтропического антициклонического круговорота (САК). Расчеты выполнены на основе данных по подъему вод в области основных апвеллингов северной муссонной области Индийского океана [18, 19, 21, 22, 23, 25] и приавстралийской области [21, 24]; а также гидрохимических материалов, полученных в результате обработки автором всех репрезентативных первичных данных химических анализов биогенных элементов советских и зарубежных экспедиционных исследований.

Согласно этим расчетам, в фотический слой к северу от зоны САК поступает из глубины ежегодно порядка 35 млн. т фосфатного фосфора, 200 млн. т нитратного азота и 400 млн. т растворенного кремния. Эти же цифры правомерно отнести и ко всей акватории Индийского океана, расположенной к северу от зоны субтропической конвергенции (СТК) (40° ю. ш.), включая зону субтропического антициклонического круговорота (САК), поскольку в этой зоне подъем вод практически отсутствует. Незначительное количество биогенных элементов в фотический слой зоны САК поступает только при адвекции из других зон, а также с атмосферными осадками и речным стоком.

Поступление биогенных элементов в фотический слой при подъеме глубинных вод для акватории Индийского океана, расположенной южнее зоны СТК, в настоящее время не поддается учету. Но это обстоятельство с гидробиологической точки зрения менее важно, так как южнее зоны СТК содержание биогенных элементов в фотическом слое круглый год достаточно высокое и не ограничивает продуктивность фитопланктона.

С материковым стоком поступление биогенных элементов в прибрежную зону Индийского океана происходит только севернее 35° ю. ш., так как южнее 35° ю. ш. в Индийский океан не впадает ни одна река. Но и южнее экватора в Индийский океан впадают только три крупные реки. Материковый сток сосредоточен в северной части Индийского океана, в основном в трех небольших предустьевых районах: в северных частях Аравийского и Андаманского морей и Бенгальском заливе. Влияние речного стока в обогащении биогенными элементами сказывается только в сравнительно небольших надшельфовых районах, примыкающих к устьям крупных рек. В Индийском океане, в районах, испытывающих непосредственное влияние стока больших рек — Инда (квадрат 102/3*), Ганга (100/2 и 99/1), Иравади и Салуина (63/4), — концентрация биогенных элементов значительно повышена — в 2—5 раз по сравнению с их содержанием в смежных квадратах.

Несмотря на усиленную механическую и химическую денудацию в областях с влажным и жарким климатом, к которым относится и большинство бассейнов рек Индийского океана, что приводит к большому выносу в океан не только твердого, но и растворенного материала, доля речного стока в пополнении запасов биогенных элементов в океане невелика. Это обстоятельство очевидно даже в результате приближенной оценки поставки биогенных элементов речным стоком в Индийский океан. Мы не располагаем материалами по химическому стоку рек, впадающих в Индийский океан, поэтому расчеты носят приближенный характер, дающий представление лишь о суммарном стоке.

Индийский океан получает ежегодно 5,1 тыс. км³ речных вод [2]: «Средний состав больших рек всех стран света, протекающих сотни верст по континентам среди меняющихся различных физико-географических условий, оказывается очень близким и почти совпадает со сред-

* $10^\circ/5^\circ$ — квадраты Марсдена.

ним составом речной воды, полученным из всех имеющихся анализов рек» [3].

Общая концентрация соединений азота в речной воде почти в 1,5 раза выше, чем в океанической. Если взять для приближенных расчетов средние цифры концентрации биогенных элементов в воде р. Миссисипи [16]*, то годовое поступление соединений азота в Индийский океан с речным стоком составит около 1,91 млн. т минерального и 1,78 млн. т органического азота. Суммарный вынос соединений азота реками достигает 3,7 млн. т.

Близкая цифра средней концентрации азота — около 0,6 мгN/л — использована для расчета выноса соединений азота реками в Тихий океан [13]. При использовании этой цифры мы получили бы суммарный сток соединений азота с речными водами в Индийский океан около 3,1 млн. т в год.

Дельвич [5] оценивает ежегодный вынос азота с суши в Мировой океан около 30 млн. т (средняя концентрация общего азота 0,8 мгN/л), на долю Индийского океана согласно этой цифре должно приходиться около 4,2 млн. т соединений азота. Дельвич считает, что $\frac{1}{3}$ азота выносится в форме нитратов и $\frac{2}{3}$ — в форме органических соединений.

Средняя цифра из трех вариантов приближенной оценки поступления соединений азота с речными водами в Индийский океан составит около 3,7 млн. т. Причем на северную часть Индийского океана, расположенную к северу от экватора, приходится около 70% речного стока и около 2,6 млн. т соединений азота, выносимых реками.

Речные воды в среднем содержат фосфора столько же, сколько его содержит океаническая вода $\sim 6 \cdot 10^{-6}\%$ [4]. В пересчете в весовую форму эта величина составит около 60 мкгP/л. При речном стоке в Индийский океан 5,1 тыс. км³ в год ежегодно в него должно поступать всего лишь 0,31 млн. т фосфора.

По Д. Хатчинсону [15], среднее содержание фосфора в речных водах земного шара составляет около 70 мкгP/л, в пересчете на объем стока рек в Индийский океан получим 0,36 млн. т фосфора. Несмотря на незначительность этих величин, следует принять во внимание, что реки являются практически единственным поставщиком фосфора в океан.

Реки приносят огромное количество кремнекислоты, причем главным образом в виде аморфной, растворенной H_4SiO_4 , взвесей глинистых частиц, осколков алюмосиликатов. При контакте с морской водой большая часть грубых взвесей выпадает. Растворимость аморфной кремнекислоты в океанической воде за счет более высокого значения pH и ионной силы выше, чем в речных водах. В реках мира среднее содержание кремнекислоты около $6 \cdot 10^{-4}\%$ [4], или около 6 мг/л. По Мэйсону [9], среднее содержание Si в речных водах также около 6 мг Si/л (13,1 мг/л SiO_2). При речном стоке 5,1 тыс. км³ и при средней концентрации Si в речных водах около 6 мг/л ежегодно в Индийский океан должно было бы выноситься около 30 млн. т кремния.

Ледниками Антарктиды поставляется весьма значительное количество кремния. Невыветренный тонкодисперсный материал горных пород, вносимый непосредственно в Южный океан, видимо, существенно влияет на баланс кремнезема в океане [10]. Если принять количество осадочного материала, ежегодно выносимого с материка Антарктиды в Индийский океан, 350 млн. т [8], при среднем содержании кремнезема около 52% [4], то общий вынос SiO_2 составит 180 млн. т.

По Данальду и др. [16], потенциально возможное количество кремнезема при ледовом антарктическом стоке составляет $1,4 \cdot 10^{15}$ г в год. Учитывая, что, по А. П. Лисицыну [8], количество материала, ежегодно

* Алекин О. А. (1966) дает близкие цифры среднего содержания минерального азота в речных водах.

сносимого в прилежащие океаны с материка Антарктиды, грубо приближенно распределяется в равных долях между Атлантическим, Тихим и Индийским, на долю Индийского сектора придется примерно 470 млн. т SiO_2 .

По данным Клауса [10], величина ежегодного выноса кремнезема с Антарктиды в Мировой океан составляет $(0,5 \div 0,8) \cdot 10^{15}$ г SiO_2 , что соответствует выносу в Индийский океан 170—270 млн. т. SiO_2 . Средняя цифра ежегодного выноса кремнезема в Индийский океан с Антарктиды близка к 350 млн. т SiO_2 . Количество кремния, переходящее в растворенную форму, нам не известно. Но, очевидно, вынос кремнезема с Антарктиды способствует обогащению антарктических вод растворенной кремнекислотой.

С атмосферными осадками в Индийский океан поступает около 74 тыс. км³ пресных вод. Максимум атмосферных осадков сосредоточен в восточной части Аравийского моря и Бенгальского залива, в Андамском море и у островов Зондского архипелага (около 300 см в год). Большое количество осадков выпадает также в экваториальной области (около 200 см в год) [12]. В атмосферных осадках находится довольно значительное количество соединений азота; фосфор и кремний практически отсутствуют. Дожди приносят ежегодно на каждый метр океанской поверхности в среднем 28 мг нитратного азота и 56—240 мг аммонийного азота [16]. Принимая во внимание эти цифры, на всю акваторию Индийского океана за год должно поступить около 2,05 млн. т нитратного азота и около 4,10—17,5 млн. т аммонийного, что составит в сумме 6,15—19,5 млн. т, а в среднем около 13 млн. т.

По сведениям, собранным Аллисоном [17], в разных точках земного шара на 1 га почвы с атмосферными осадками поступает от 2 до 20 кг азота, чаще всего 4—6 кг/га в год. Если для расчета использовать минимальную цифру (2 кг/га), мотивируя это обстоятельство тем, что над океаном атмосфера менее загрязнена промышленными выбросами, чем над сушей, что сказывается на концентрации азота в осадках, получим цифру поступления связанного азота в Индийский океан с атмосферными осадками — 14,7 млн. т, т. е. близкую первому варианту расчета, сделанному по Хорне; а при среднем значении 5 кгN/га — около 37 млн. т.

При расчете поступления связанного азота с атмосферными осадками на акваторию Тихого океана [15] среднее его содержание принималось равным 0,3 мг/л. Используя эту цифру для Индийского океана, получили бы величину поступления связанного азота с атмосферными осадками около 22 млн. т.

Очевидно, наиболее вероятная величина поступления связанного азота с атмосферными осадками на акватории Индийского океана, принимая во внимание вышеприведенные расчеты, составит около 15—20 млн. т в год.

Фиксация свободного азота производится некоторыми морскими водорослями, но количественных данных, характеризующих этот процесс, почти нет. По Е. Н. Мишустину [11], в водной среде земного шара фиксируется за год около 10 млн. т азота. Учитывая площадь Индийского океана, на его акватории возможна фиксация около 2 млн. т азота. Интенсивность азотфиксации водорослями в приповерхностных водах Черного моря, по многолетним данным, достигает 0,4 мгN/м³ в год [13]. Близкие показатели получены для озер умеренных широт — около 0,5 гN/м² [18]. При подобной интенсивности фиксации азота водорослями в Индийском океане в течение года его количество составило бы 3—4 млн. т, что не противоречит данным Е. Н. Мишустина.

На блок-схеме (рис. 1) представлены элементы баланса азота, фосфора и кремния в Индийском океане. Несмотря на ориентировочный

характер, порядок полученных величин составляющих баланса биогенных элементов, несомненно, является верным, что позволяет выявить значение этих факторов в пополнении фотического слоя Индийского океана биогенными элементами и установить их роль в обеспечении фитопланктона питательными солями.

Поступление биогенных элементов в фотический слой за счет всех основных факторов удалось приближенно учесть только для акватории

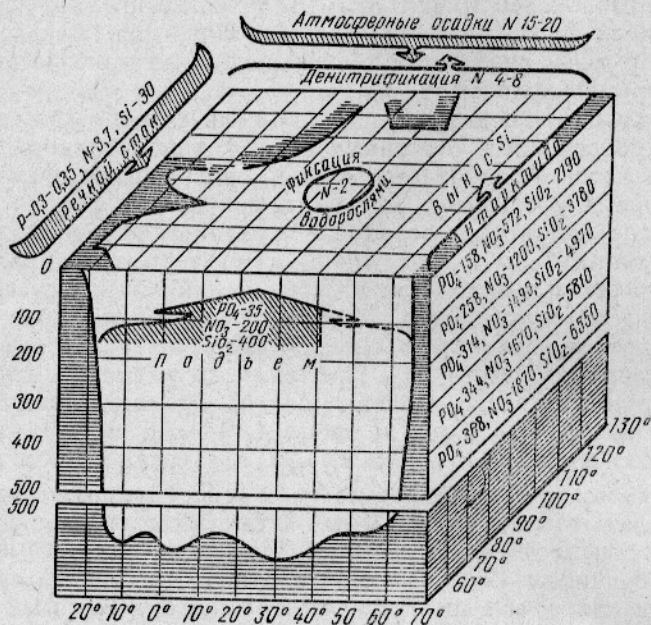


Рис. 1. Блок-схема формирования биогенной химической структуры поверхностной структурной зоны Индийского океана.

(N, P, Si в млн. т.)

к северу от Антарктического водного кольца (40° ю. ш.), составляющей около 70% площади океана. Согласно сделанной оценке в фотический слой Индийского океана, исключая антарктический сектор, поступает около 430 млн. т кремния, 225 млн. т азота и 35 млн. т фосфора. Из общей суммы вносимого за год в фотический слой азота около 89% поступает в результате подъема вод, около 9% — с атмосферными осадками и около 2% — с речным стоком. Из общего количества поступающего в течение года в фотический слой фосфора 1% приходится на долю речного стока, а 99% поступает при подъеме глубинных вод. Из общего количества поступающего за год в фотический слой кремния 93% обеспечивается подъемом глубинных вод и около 7% — речным стоком. Таким образом, в обогащении фотического слоя питательными солями подъем глубинных вод резко превалирует над другими источниками поступления биогенных элементов, поставляя в слой фотосинтеза около 90% азота, 99% фосфора и 93% кремния от суммы годового прихода.

Поскольку для океана в целом и для фотического слоя является закономерностью сохранение динамического равновесия в содержании биогенных элементов, очевидно, что величины годичного поступления биогенных элементов в фотический слой будут характеризовать и годичную потерю биогенных элементов этим слоем: за счет гравитационного выноса с неразложившимися органическими остатками; в результате

миграции с животными — при переходе биогенных элементов в другие звенья трофической цепи и при опускании вод в зонах конвергенции. Кроме того, некоторое количество связанного азота теряется за счет процессов денитрификации. По данным Е. Н. Мишустина [11], за счет денитрификации водные бассейны ежегодно теряют около 40 млн. т азота, в Индийском океане потери азота могут составить около 4—8 млн. т.

Годичное поступление биогенных элементов по отношению к их общему содержанию в поверхностном 100-метровом слое океана составляет: с речным стоком фосфора 0,10—0,15%, кремния — около 3%, азота — около 0,4%; а азота с речным стоком и атмосферными осадками — около 2—3%. Годичное же поступление биогенных элементов с речным стоком и с атмосферными осадками по сравнению с их общим запасом во всей толще океана исчисляется сотыми и тысячными долями процентов, однако роль их в геохимическом отношении чрезвычайно важна.

При сопоставлении размеров поступления биогенных элементов в фотический слой с годичным потреблением их фитопланктоном представляется возможность оценить значение различных факторов в обеспечении фитопланктона питательными солями. В области тропиков и субтропиков, к северу от Антарктического водного кольца, потребности фитопланктона удовлетворяются: в азоте на 0,2—0,3% за счет речного стока, 0,6—1% — за счет атмосферных осадков, 10—15% — при подъеме глубинных вод, 85—90% — при регенерации; в фосфоре на 0,1—0,2% за счет речного стока, 12—20% — при подъеме вод, 80—90% — при регенерации; в кремнии соответственно около 1,8—14 и 85—90%. В отдельных районах океана относительная роль этих факторов в обеспечении фитопланктона питательными солями, безусловно, меняется. В динамически активной северной муссонной области с обильным речным стоком и атмосферными осадками возрастает роль этих факторов; в зоне САК, наоборот, довлеющую роль приобретает регенерация.

Выводы

1. Произведенная оценка элементов баланса биогенных соединений в Индийском океане позволила выявить роль различных факторов в пополнении фотического слоя биогенными элементами. В течение года в Индийский океан вносится с речным стоком около 3,7 млн. т связанного азота, 0,3—0,35 млн. т фосфора, 30 млн. т растворенного кремния; около 15—20 млн. т связанного азота поступает с атмосферными осадками и 2 млн. т фиксируется водорослями.

2. В фотический слой Индийского океана, исключая Антарктическое водное кольцо, при подъеме глубинных вод ежегодно поступает около 200 млн. т азота, 35 млн. т фосфора и 400 млн. т кремния. Для этой акватории из общей суммы вносимого за год в фотический слой азота, составляющего примерно 225 млн. т, около 89% приходится на поступление в результате подъема вод, около 9% — с атмосферными осадками и около 2% — с речным стоком; фосфора при общем поступлении фосфора около 35 млн. т; на долю речного стока приходится 1% и около 99% — с глубинными водами; кремния (общее поступление около 430 млн. т) соответственно 7 и 93%.

Годичное потребление фитопланктоном биогенных элементов в зоне тропиков и субтропиков за счет речного стока удовлетворяется по азоту и фосфору менее чем на 1%; по кремнию — около 1%, за счет подъема вод — на 10—20% и за счет регенерации — на 80—90%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексин О. А. Химия Океана. Л., Гидрометеоздат, 1966, с. 1—246.
2. Алексин О. А., Бражникова Л. В. Солевой и биогенный сток в океан.— В кн.: Современные осадки морей и океанов. М., 1961. с. 28—38.
3. Вернадский В. И. Океанография и геохимия. Избранные сочинения. М., Изд-во АН СССР, 1960, т. V, с. 271—288.
4. Виноградов А. П. Введение в геохимию океана. М., «Наука», 1967. 212 с.
5. Дельвич К. Круговорот азота. — В кн.: Биосфера. М., 1972, с. 105—119.
6. Гусарова А. Н. Кремний. — В кн.: Химия Тихого океана. М., 1966, с. 185—209.
7. Конков В. А. Азот и его формы. — В кн.: Химия Тихого океана. М., 1966, с. 168—184.
8. Лисицын А. П. Осадкообразование в океане. М., «Наука», 1974. 438 с.
9. Мейсон Б. Основы геохимии. М., «Недра», 1971. 311 с.
10. Мери Д. Минеральные богатства океана. М., «Прогресс», 1969. 440 с.
11. Мишустин Е. Н. Азот в природе и плодородие почвы. — «Известия АН СССР. Сер. биол.» 1972, № 1, с. 5—22.
12. Муромцев А. В. Основные черты гидрологии Индийского океана. Л., Гидрометеоздат, 1959. 435 с.
13. Пшенин Л. Н. Интенсивность процесса азотфиксации в приповерхностных водах Черного моря. Материалы Всесоюзного симпозиума по изучению Черного и Средиземного морей. Киев, «Наукова думка», 1973, с. 155—162.
14. Сапожников В. В., Мокиевская В. В. Неорганический и органический фосфор. — В кн.: Химия Тихого океана. М., 1966, с. 116—167.
15. Хатчинсон Д. Лимнология. М., «Прогресс», 1969. 365 с.
16. Хорн Р. Морская химия. М., «Мир», 1972. 398 с.
17. Allison F. Soil Nitrogen. Amer. Soc. of Agronomy, 1965. p. 1—50.
18. Bottero J. S. An analysis of upwelling off the southeast Arabian Coast during the summer monsoon. M. Sc. Thesis, Oregon State University, 1969, p. 9—11.
19. Currie R. I., Fisher A. E., Hargreaves P. M. Arabian Sea Upwelling. Ecological Studies, v. 3, 1973, с. 37—52.
20. Cranhall U., Lundgren A. Nitrogen fixation in Lake Erken. *Limnol. and Oceanography*, 16, N 5, 1971, p. 1—12.
21. Smith R. L. Upwelling. *Oceanogr. Marine Biol. Ann. Rev.*, 6, 1968, p. 11—46.
22. Swallow J. C., Bruce J. G. Current measurements off the Somali Coast during the southwest monsoon of 1964. *Deep-Sea Res.* 13, 1966, с. 861—888.
23. Warren B., Stommel N., Swallow J. G. Water masses and patterns of flow in the Somali Basin during the southwest monsoon of 1964. *Deep-Sea Res.* 13, 1966, p. 825—860.
24. Wyrтки K. The upwelling in the region between Java and Australia during the southeast monsoon. *Aust. J. Mar., Fresh wat. Res.* 13, 1962, p. 217—225.
25. Wyrтки K. Physical Oceanography of the Indian Ocean. *Ecological Studies*, v. 3, 1973, p. 18—36.

Balance Elements of Nutrient compounds of Nitrogen, Phosphorus and Silicon in the Indian Ocean

M. P. Maximova

SUMMARY

The paper describes balance elements of nutrient compounds of nitrogen, phosphorus and silicon: inflow with the river runoff and precipitation, due to fixation of free nitrogen by algae and, as regards the photic layer, through upwelling. The relative significance is shown of each of these factors in the replenishment of the photic layer with the nutrients and in meeting the requirements of phytoplankton. The upwelling is shown to play the leading role. Though the annual inflow of nutrients with the river runoff and precipitation as compared to their amount in the ocean constitutes a hundredth or a thousandth part of one per cent, its geochemical significance is tremendous.