

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Российский государственный гидрометеорологический университет

М.А. Нитишинский,

М.Б. Шилин

**РАСЧЕТ ПОТОКОВ БИОГЕННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ В МОРСКИХ
ПРИБРЕЖНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ**

Практическая работа



РГГМУ

Санкт-Петербург

2006

УДК (551.464.1+551.464.7)(268.53)

Нитишинский М.А., Шилин М.Б. Расчет потоков биогенных элементов в морских прибрежных экосистемах. Практическая работа. СПб.: изд-во РГГМУ. 2006. – 32 с.

Практическая работа выполняется по дисциплине «Экология Мирового океана». Основным содержанием работы является модель расчета потоков биогенных элементов. Данная модель может быть применена для шельфовых районов Мирового океана.

Работа предназначена для студентов океанологов и экологов. Предлагаемая модель может быть использована при проведении самостоятельных океанологических и экологических исследований в шельфовых морях Мирового океана.

Рецензенты:

канд. техн. наук, Санкт-Петербургский
политехнический университет М.В. Романов,

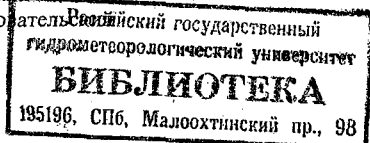
канд. хим. наук, ГНЦ РФ Арктический и Антарктический научно-
исследовательский институт В.М. Смагин

© Нитишинский Мирослав
Александрович, 2006.

© Шилин Михаил Борисович, 2006.

© Российский государственный
гидрометеорологический
университет (РГГМУ), 2006.

© Государственный научный центр
Российской Федерации Арктический
и Антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ), 2006



Введение

Биогенные элементы являются минеральной базой первичной продукции, создаваемой фитопланктоном в процессе фотосинтеза. К группе биогенных элементов в широком смысле можно отнести практически все вещества, встречающиеся в природе. В большинстве случаев, несмотря на низкие концентрации, их достаточно для образования и роста первичной продукции.

Есть вещества, которые требуются в больших количествах и, как правило, лимитируют развитие первичной продукции. Эти вещества выделяют в группу основных биогенных элементов. В первую очередь к таким веществам относятся азот* и фосфор**. В морских экосистемах эти вещества лимитируют образование и развитие фитопланктона.

В морских экосистемах интенсивное развитие фитопланктона приурочено к эстуариям рек, заливам и бухтам (Погребов, Шилин, 2001). Здесь происходит взаимодействие вод материкового стока и соленых морских вод. Эти экосистемы характеризуются большим количеством органического вещества, приносимого с материковыми водами, и высоким уровнем первичной продукции. Синтезируемое фитопланктоном органическое вещество потребляется консументами – зоопланктоном и зообентосом, которые в свою очередь формируют кормовую базу рыб. Таким образом, происходит поток биогенных элементов через пищевые цепи экосистемы. Интенсивность этого потока определяет особенности функционирования экосистемы.

Инструментом количественного изучения функционирования экосистем моря и миграционных процессов химических элементов служит расчет балансов органического вещества и биогенных элементов, включающий обмен экосистемы с окружающей средой, и химико-биологические процессы внутри экосистемы.

Расчеты потоков биогенных элементов нужны для комплексной оценки процессов, происходящих в морских экосистемах, и оценок биопродуктивности морских водоемов. Биогенные элементы при

* Азот (от лат. *Nitrogenium*) – химический элемент V группы периодической системы Менделеева; атомный номер 7, атомная масса 14,0067, структура внешней электронной оболочки $2s^2 2p^3$.

** Фосфор (от лат. *Phosphorus*) – химический элемент V группы периодической системы Менделеева; атомный номер 15, атомная масса 30,97376, структура внешней электронной оболочки $3s^2 3p^3$.

комплексном анализе экосистем могут рассматриваться как связующее звено между физическими (адвекция, диффузия, перемешивание, взаимодействие водных масс на границах фронтальных разделов), биологическими (образование первичной продукции, разложение органического вещества) и геофизикохимическими (взаимодействие на границах разделов вода – дно и вода – воздух, химическое взаимодействие в водной толще, сорбция и десорбция) процессами.

Для исследования любых процессов прежде всего необходимы натурные наблюдения. Но не всегда есть возможность измерить все необходимые для точных расчетов характеристики (скорости и направления течений, годовой ход гидрохимических и гидробиологических характеристик и т. д.). В связи с этим для оценок и расчетов используют моделирование.

В настоящей работе используется подход, предложенный специалистами Института Океанографии Бедфорта (Галифакс, Канада), (Gordon et. al., 1996) и разработанный в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте (Санкт-Петербург, Россия), (Nitishinsky, Pivovarov, 2003).

Предлагаемая практическая работа, составленная на основе указанного подхода, заключается в выполнении численных оценок скоростей и интенсивности переноса биогенных элементов (азота и фосфора) в морских прибрежных экосистемах. Работа выполняется в три этапа:

1. Расчет водного баланса прибрежной экосистемы.
2. Расчет бюджета биогенных элементов (азота и фосфора).
3. Оценка метаболизма экосистемы и стехиометрические расчеты.

Численные значения параметров уравнений для подставления в приводимые ниже формулы берутся из Приложения 2, составленного авторами по материалам собственных измерений, выполненных в экспедиционных условиях.

1. Расчет водного баланса прибрежной экосистемы

В общем случае бюджет потоков вещества в системе ($\frac{dM}{dt}$) складывается из количества поступающего вещества в систему ($M_{\text{приток}}$), убывающего из системы ($M_{\text{отток}}$) и изменений вещества внутри системы ($M_{\text{изменения}}$).

Запишем уравнение баланса вещества в системе:

$$\frac{dM}{dt} = \sum M_{\text{приток}} - \sum M_{\text{отток}} + \sum M_{\text{изменение}} \quad (1)$$

Оценка водообмена между исследуемым районом и открытым морем может быть описана через объединенный бюджет воды и соли. Объединённый бюджет воды и соли это – простой способ описать водный баланс, хотя и не позволяет исследовать понимание динамических процессов, управляющих характеристиками обмена воды в исследуемой системе.

Соль является консервативным веществом, которое внутри системы не имеет никаких источников поступления и оттоков, следовательно, количество соли в системе зависит только от поступления и выноса ее с морской водой.

Примем, что средний объем воды в системе (за определенный промежуток времени) постоянный. Тем самым мы исключим кратковременные изменения объема воды в системе, связанные с приливными и стонно-нагонными колебаниями уровня. В этом случае приток воды в системе должен компенсироваться стоком.

Учитывая это, и, соответственно, упростив уравнение (1), мы можем написать систему уравнений водного и солевого баланса:

$$\frac{dV}{dt} = \sum V_{\text{приток}} - \sum V_{\text{отток}} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = \sum S_{\text{приток}} - \sum S_{\text{отток}} = 0, \quad (3)$$

где $\frac{dV}{dt}$ – изменение объема бокса во времени; V – объем воды, поступающий в систему (*приток*) и из системы (*отток*); $\frac{dS}{dt}$ – изменение количества соли в системе; S – потоки соли в систему (*приток*) и из системы (*отток*). Следует отметить, что при использовании данного метода мы предполагаем, что за период расчета объем воды и количество соли в системе остаются неизменными. Данный метод, как будет показано ниже, применим только к морским системам, для которых выполняются следующие условия: существует разность в солёности между системой и открытым морем и водообмен с соседними водоемами относительно прост. В случае рассмотрения двухслойной системы необходимо также условие разности солёности между верхним и нижним слоями системы.

В системах с малой разницей солёности и сложным водообменом необходимо использовать иные подходы оценки бюджета воды, например, многоблочные численные модели водообмена.

В общем случае вода поступает в систему с речным стоком, с грунтовым стоком, с осадками и через открытую границу «система – море»; а из системы – при испарении и с потоком в открытое море (рис. 1).

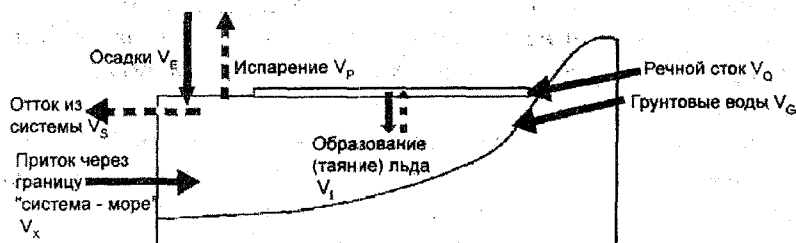


Рис. 1. Общая схема потоков в прибрежной системе.

Обозначим: поток воды с речными водами как v_Q , с грунтовыми — v_G , приток через открытую границу «система-море» — v_X , с осадками — v_P , с испарением — v_E , образование или таяние льда — v_I^* и поток из системы через открытую границу — v_S .

Выделим пресноводный баланс (v_R) в нашей системе:

$$v_R = v_Q + v_G + v_P - v_E \pm v_I. \quad (4)$$

В природных системах, как правило, доминирующими в водном балансе оказываются приток и сток через открытую границу «система — море», а не пресноводный сток. Используя наше предположение о неизменности объема системы в течение промежутка времени, для которого выполнится уравнение (2), запишем полное уравнение баланса воды:

$$v_R + v_X = v_S. \quad (5)$$

Для определения величин v_X воспользуемся следующим: в случае расчета потоков в системе мы используем средние характеристики всех величин; вследствие установившихся потоков воды и соли формируется средняя соленость. Здесь надо отметить, что в системе происходят следующие процессы, определяющие количество соли: за счет поступления пресных вод соленость системы уменьшается, уменьшение солености компенсируется потоком соли через открытую границу «система — море». Так как соль — консервативное вещество, то внутренние процессы, способные изменить количество соли в системе, отсутствуют.

* Знак потока v_I зависит от сезона. При таянии льда потоки имеют положительный знак, при замерзании — отрицательный.

Запишем уравнение солевого баланса:

$$V_X S_{OCEAN} + V_R S_R - V_S S_S = 0, \quad (6)$$

где S_{OCEAN} – соленость воды района моря, с которым взаимодействует наша система через границу «система – море», S_R – минерализация пресных вод, S_S – соленость системы. Решая систему уравнений (5) и (6) и принимая соленость S_R равной нулю, получим:

$$V_X = \frac{V_R S_S}{(S_{OCEAN} - S_S)}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что необходимо отмеченное нами ранее условие о разнице в солености между системой и районом моря, с которым взаимодействует наша система через границу «система – море».

Уравнения (4) – (7) описывают однослойную систему, в которой все характеристики (соленость, плотность, биогенные элементы) перемешаны по вертикали. Но в природе в системах со значительным пресным стоком, как правило, наблюдается стратификация, и использование простой модели для расчета потоков воды приведет к значительным ошибкам при их численных оценках.

Рассмотрим расчеты потоков воды для двухслойной системы.

На рис. 2 приводится схема всех водных потоков в двухслойной системе. В модели будем руководствоваться следующими положениями:

- Пресноводный сток V_R (речные воды, осадки, таяние льда) поступает в поверхностный слой и вытесняет морскую воду из поверхностного слоя.
- Поток воды через открытую границу «система – море» (V_{DEEP}) поступает в систему через открытую границу нижнего слоя, далее поступает в поверхностный слой (V_{DEEP}) и покидает систему из поверхностного слоя.
- Объединенный поток из поверхностного слоя (V_{SURF}) складывается из $V_R + V_{DEEP}$.
- Равновесие бюджета соли в системе поддерживается вертикальным потоком обмена (V_Z) между поверхностным и нижним слоями.

- Границы слоев выбираются в соответствии с гидрологическими условиями системы. Верхний слой – от поверхности до пикноклина. Нижний слой – от пикноклина до дна.

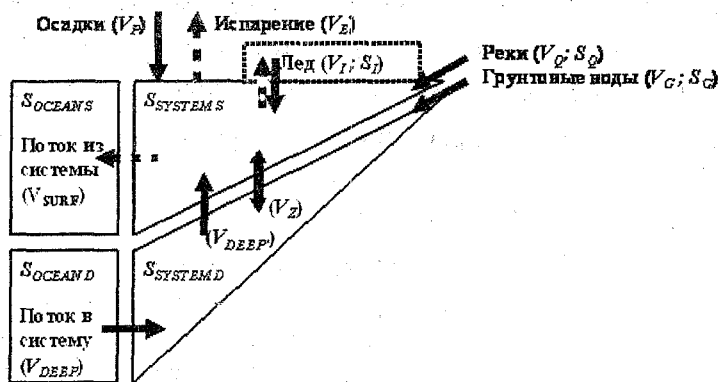


Рис. 2. Схема потоков в двухслойной прибрежной системе.

Учитывая все вышесказанное, запишем баланс воды для поверхностного слоя:

$$V_Q + V_G + (V_P - V_E) \pm V_I^* + V_{DEEP} - V_{SURF} = 0. \quad (8)$$

Баланс воды для нижнего слоя:

$$V_{DEEP} - V_{DEEP} = 0, \quad (9)$$

где V_I - количество образовавшегося или растаявшего льда. Приток воды из открытого моря сбалансирован вертикальным потоком к поверхностному слою; V_Z не входит в расчеты, так как это одна величина для поверхностного и придонного слоев.

Баланс соли поверхностного слоя выражается следующим образом:

$$V_Q S_Q + V_G S_G + (V_P - V_E) \pm V_I^* S_I + V_{DEEP} S_{SYSTEM-D} - V_{SURF} S_{SYSTEM-S} + V_Z (S_{SYSTEM-D} - S_{SYSTEM-S}) = 0, \quad (10)$$

где $S_{SYSTEM-S}$, $S_{SYSTEM-D}$ - соответственно соленость поверхностного и придонного слоев системы.

Баланс потоков соли для нижнего слоя:

$$V_{DEEP} S_{OCEAN-D} - V_{DEEP} S_{SYSTEM-D} + V_Z (S_{SYSTEM-D} - S_{SYSTEM-S}) = 0. \quad (11)$$

Заметим, что

$$V_{SURF} = V_R + V_{DEEP}, \quad (12)$$

$$V_R = V_Q + V_G + (V_P - V_E) \pm V_I^*. \quad (13)$$

Из уравнений бюджета соли и уравнений (8), (9) получаем:

$$V_{DEEP} = \frac{V_R S_{SYSTEM-S} - V_Q S_Q - V_G S_G \pm V_I^* S_I}{S_{OCEAN-D} - S_{SYSTEM-S}}, \quad (14)$$

$$V_Z = V_{DEEP} \frac{S_{OCEAN-D} - S_{SYSTEM-D}}{S_{SYSTEM-D} - S_{SYSTEM-S}}. \quad (15)$$

Учтем, что образование и таяние льда влияет на потоки веществ внутри системы. Летом происходит уменьшение концентрации веществ за счет поступления талых вод и увеличение их количества за счет поступления в бокс веществ, находящихся во льду. Зимой происходит увеличение концентрации веществ при ледообразовании и уменьшение их количества за счет вовлечения части веществ в образующийся лед. Учитывая направленность этих процессов, получим следующие формулы для расчета потоков воды и соли для лета (16.1) и зимы (16.2).

$$\left\{ \begin{array}{l} V_R = (V_P - V_E) + V_Q + V_G + V_I \\ V_{DEEP} = \frac{V_R \cdot S_{SYSTEM-S} - V_Q \cdot S_Q - V_G \cdot S_G - V_I \cdot S_I}{S_{OCEAN-D} - S_{SYSTEM-S}} \\ V_{DEEP}' = V_{DEEP} \\ V_Z = V_{DEEP} \frac{S_{OCEAN-D} - S_{SYSTEM-D}}{S_{SYSTEM-D} - S_{SYSTEM-S}} \\ V_{SURF} = V_R + V_{DEEP}' \end{array} \right\} \quad (16.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_R = (V_P - V_E) + V_Q + V_G - V_I \\ V_{DEEP} = \frac{V_R \cdot S_{SYSTEM-S} - V_Q \cdot S_Q - V_G \cdot S_G + V_I \cdot S_I}{S_{OCEAN-D} - S_{SYSTEM-S}} \\ V_{DEEP}' = V_{DEEP} \\ V_Z = V_{DEEP} \frac{S_{OCEAN-D} - S_{SYSTEM-D}}{S_{SYSTEM-D} - S_{SYSTEM-S}} \\ V_{SURF} = V_R + V_{DEEP}' \end{array} \right\} \quad (16.2)$$

Расчет периода полного водообмена в системе T_{SYSTEM} и в верхнем, и нижнем ее слоях будет проводиться по формуле

$$T_{SYSTEM} = \frac{Q_{SYSTEM}}{V_{SURF}}, \quad (17)$$

где Q_{SYSTEM} — объем воды в системе.

2. Расчет бюджета биогенных элементов (азота и фосфора)

Баланс воды и соли позволяет описать нам баланс любого вещества в системе. В данной работе мы остановимся на расчете баланса неорганических форм фосфора (фосфатов) и азота (нитратов)*. Фосфаты и нитраты – неконсервативные вещества. Это означает, что баланс этих веществ (появление и исчезновение в системе) зависит не только от переноса их течениями, но и от других процессов, проходящих внутри системы. Следовательно, для растворенных биогенных элементов разница между притоком в систему и оттоком из системы согласно уравнению (1) может быть существенной.

Уравнение (1) определяет роль системы как транзитной зоны или района, где происходит потребление для любого вещества. Вещества, которые поступают или покидают экосистему вместе с потоками воды и не подвергаются никаким преобразованиям и изменениям внутри системы (например - соль), считаются консервативными.

Поведение неконсервативных веществ в системе связано с некими другими процессами, нежели адвективный перенос, управляющими их появлением или исчезновением в системе. Например, на концентрации в воде неорганического фосфора (Р) в системе кроме переноса течениями влияет жизнедеятельность фитопланктона. Изменение неорганического фосфора может быть представлено как его преобразование в растворенный органический фосфор или в общий фосфор. Азот (N) и углерод (C) также являются неконсервативными веществами и имеют более сложные биогеохимические циклы, чем фосфор: помимо потенциального преобразования между неорганическими, органическими и растворёнными формами азот и углерод могут преобразовываться в газообразные формы. Любое из этих преобразований описывает неконсервативное поведение C, N, и P, так как эти процессы не описываются водным бюджетом.

Выводы относительно фактических процессов, происходящих в системе, могут быть получены в результате сравнения бюджетов для различных веществ – стехиометрических расчетов*.

Еще раз отметим, что количество фосфатов и нитратов в системе кроме переноса их течениями зависит от жизнедеятельности фитопланктона и процессов разложения органического вещества. Изме-

* Предпочтительнее, чтобы при расчете азота учитывалась сумма нитратов, нитритов и аммония.

* **Стехиометрия** - изучение комбинации элементов в химических реакциях.

ние количества фосфатов внутри системы может быть представлено как их преобразование в органический или общий фосфор.

Нитраты имеют более сложный биогеохимический цикл, чем фосфаты. Помимо преобразований, описанных для фосфатов, нитраты могут быть, например, преобразованы в газообразную форму.

Вычислим потоки неорганических форм фосфора (РНФ) и азота (РНА).

Расчет потоков фосфатов и нитратов, связанный с их переносом течениями, выглядит следующим образом (18.1, 18.2 рис. 3).

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_Q^{PH\Phi} = PH\Phi \cdot Q_Q^V \\ Q_G^{PH\Phi} = PH\Phi \cdot Q_G^V \\ Q_I^{PH\Phi} = PH\Phi \cdot V_I \\ Q_D^{PH\Phi} = PH\Phi \cdot OCEAN-D^V \\ Q_{D'}^{PH\Phi} = PH\Phi \cdot SYSTEM-D^V \\ Q_Z^{PH\Phi} = V_Z (PH\Phi_{SYSTEM-D} - PH\Phi_{SYSTEM-S}) \\ Q_{SURF}^{PH\Phi} = PH\Phi_{SYSTEM-S} \cdot V_{SURF} \end{array} \right\} \quad (18.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_P^{PHA} = PHA \cdot V_P \\ Q_E^{PHA} = PHA \cdot V_E \\ Q_Q^{PHA} = PHA \cdot Q_Q^V \\ Q_G^{PHA} = PHA \cdot Q_G^V \\ Q_I^{PHA} = PHA \cdot V_I \\ Q_D^{PHA} = PHA \cdot OCEAN-D^V \\ Q_{D'}^{PHA} = PHA \cdot SYSTEM-D^V \\ Q_Z^{PHA} = V_Z (PHA_{SYSTEM-D} - PHA_{SYSTEM-S}) \\ Q_{SURF}^{PHA} = PHA_{SYSTEM-S} \cdot V_{SURF} \end{array} \right\} \quad (18.2)$$

Расчет баланса фосфатов и нитратов во всей системе и в ее слоях будет производиться по формулам:

$$\Delta PH\Phi_{SYSTEM} = -(Q_Q^{PH\Phi} + Q_G^{PH\Phi} \pm Q_I^{PH\Phi} + Q_D^{PH\Phi} - Q_{SURF}^{PH\Phi}) \quad (19)$$

$$\Delta PH\Phi_{SYSTEM-S} = -(Q_Q^{PH\Phi} + Q_G^{PH\Phi} \pm Q_I^{PH\Phi} + Q_{D'}^{PH\Phi} + Q_Z^{PH\Phi} - Q_{SURF}^{PH\Phi}) \quad (20)$$

$$\Delta PH\Phi_{SYSTEM-D} = -(Q_D^{PH\Phi} - Q_{D'}^{PH\Phi} - Q_Z^{PH\Phi}) \quad (21)$$

$$\Delta PHA_{SYSTEM} = -(Q_P^{PHA} - Q_E^{PHA} + Q_Q^{PHA} + Q_G^{PHA} \pm Q_I^{PHA} + Q_D^{PHA} - Q_{SURF}^{PHA}) \quad (22)$$

$$\Delta PHA_{SYSTEM-S} = -(Q_P^{PHA} - Q_E^{PHA} + Q_Q^{PHA} + Q_G^{PHA} \pm Q_I^{PHA} + Q_D^{PHA} + Q_Z^{PHA} - Q_{SURF}^{PHA}) \quad (23)$$

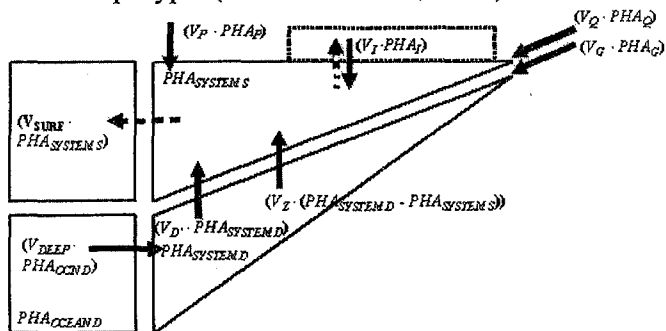
$$\Delta PHA_{SYSTEM-D} = -(Q_D^{PHA} - Q_{D'}^{PHA} - Q_Z^{PHA}) \quad (24)$$

3. Оценка метаболизма* экосистемы и стехиометрические расчеты

Для использования и анализа стехиометрических расчетов необходимо рассмотреть процессы образования и потребления неорганических форм фосфора и азота.

Неорганические соединения азота в морской воде представлены аммонийными NH_4^+ , нитритными NO_2^- и нитратными NO_3^- ионами, имеющими единый генетический источник. При фотосинтезе неорганический азот потребляется и переходит в органические соединения. Обратный переход азота из сложных органических соединений в его минеральные формы происходит в процессе прямой и непрямой регенерации (Алекин, Ляхин, 1984).

Самой распространенной и изученной формой фосфора в морской воде является растворенный неорганический фосфор ионов ортофосфорной кислоты (Руководство, 1993). Фосфаты в водном растворе подвергаются гидролизу и образуют равновесную систему из ионов PO_4^{3-} , PO_4^{2-} и $H_2PO_4^-$, количественное соотношение между которыми определяется величиной pH и константами равновесия, зависящими от температуры (Алекин и Ляхин, 1984).



* Метаболизм - обмен веществ. В более узком смысле метаболизм - промежуточный обмен, т.е. превращение определенных веществ внутри системы с момента их поступления до образования органических соединений.

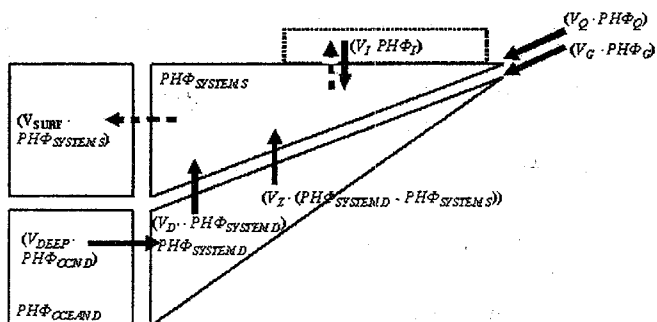


Рис. 3. Потoki биогенных элементов в двухслойной системе.

Переходы фосфатов и азота в органические формы и обратно тесно связаны между собой и с биологическими процессами. Рис. 4 иллюстрирует общую схему трансформации биогенных элементов в морских экосистемах. Образование органического вещества показано пунктирными стрелками, переход в неорганические формы – сплошными.

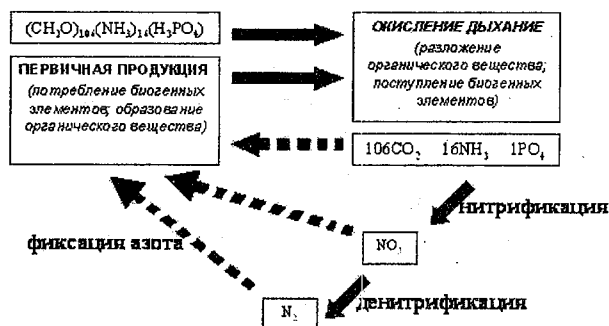


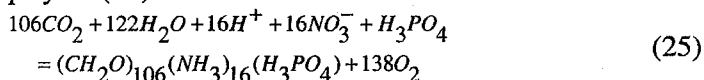
Рис. 4. Общая схема трансформации биогенных элементов и углерода в морских экосистемах.

Здесь важно отметить, что при образовании органического вещества происходит потребление неорганических форм азота и фосфора из морской воды, а при разложении – поступление их в воду. Кроме того, переходы азота более сложны, чем фосфора (David et. al., 2000).

Для морских экосистем важным показателем является разница между первичной продукцией и деструкцией. Эта разница определяется как «чистая продукция экосистемы», или «чистый метаболизм экосистемы».

При описании процессов, происходящих в морских экосистемах, принимаем, что нитраты являются доминирующей формой неоргани-

ческого азота и весь неорганический азот при разложении сразу преобразуется до нитратов и игнорируем процессы фиксации азота и денитрификации. В этом случае процессы преобразования биогенных элементов в органические и неорганические формы мы можем выразить в виде формулы (25):



Эта реакция проходит слева направо при образовании органического вещества и справа налево при его разложении и образовании неорганических форм биогенных элементов. Разница между этими двумя параметрами $[p-r]$ - критерий метаболизма экосистемы.

Разница в циклах биогенных элементов, иллюстрируемая на рис. 3, показывает, что фосфор и углерод имеют сходные биогеохимические циклы, в то время как цикл азота отличается от цикла этих двух элементов.

Неконсервативный поток растворённого неорганического фосфора ($\Delta\text{РНФ}$) может быть вычислен из бюджета. Фосфор является необходимым элементом для жизни, и во многих морских системах может быть принято, что метаболизм экосистемы (т. е. разница между первичной продукцией и разложением органического вещества $[p-r]$) описывается показателем $\Delta\text{РНФ}$. Отметим, что нами допускается упрощение цикла фосфора. Фосфор вовлечён в неорганические реакции, включающие сорбцию – десорбцию и осаждение – растворение. Однако эти реакции для цикла фосфора менее важны, чем для цикла азота. В наших расчетах $\Delta\text{РНФ}$ принимается как показатель метаболизма экосистемы. Из уравнения (1) мы получаем, что если в экосистеме производится органическое вещество, то ($[p-r] > 0$) и в системе потребляется фосфор ($\Delta\text{РНФ} < 0$); если в экосистеме происходит деструкция органического вещества, то ($\Delta\text{РНФ} > 0$ и $[p-r] < 0$). Заметим, что первичная продукция (p) и деструкция (r), взятая каждая в отдельности, будет намного большей, чем разница между этими величинами ($[p-r]$). Данная разница ($[p-r]$), или метаболизм экосистемы – индикатор роли органического метаболизма в системе и может трактоваться как источник или отток углерода. Зная $\Delta\text{РНФ}$ и вычислив соотношение $C:P$ в системе мы можем сделать численную оценку уровня метаболизма экосистемы $[p-r]$:

$$[p-r] = -\Delta\text{РНФ} \left(\frac{C}{P} \right). \quad (26)$$

В системах с особыми условиями окружающей среды (например, в экосистемах, где доминируют морские водоросли) отношение С:Р, вероятно, будет $\approx 300:1$ или выше. Поэтому в некоторых экосистемах используется собственное отношение С:Р для данных регионов.

Для расчета $[p-r]$ возможно использование баланса неорганического азота (ΔPNA), однако проблема с использованием ΔPNA состоит в том, что изменения азота внутри системы включают в себя другие процессы помимо органического метаболизма (обмен на границе поверхность моря – атмосфера и осаждение, о которых будет рассказано ниже).

Для анализа метаболизма азота, процессов нитрификации* и денитрификации** снова рассмотрим цикл биогенных элементов, иллюстрируемый на рис. 4. Неконсервативные члены потоков азота в системе получены из бюджета биогенных элементов.

Запишем уравнение, подобное уравнению (26), которое описывают предполагаемое количество азота ($\Delta A_{\text{Зот}}_{\text{EXP}}$) в экосистеме. В этой записи потребление и освобождение азота связывается с потоком растворенного фосфора:

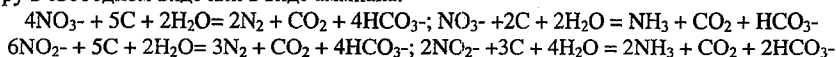
$$\Delta N_{\text{EXP}} = (\Delta PNA + \Delta POA)_{\text{EXP}} = (\Delta PNF + \Delta PROF) \left(\frac{\text{Фосфор}}{A_{\text{Зот}}} \right)_{\text{PART}} \quad (27)$$

Здесь ΔPOA и $\Delta PROF$ рассматриваются вместе с ΔPNA и ΔPNF для учета возможных переходов между органическими и неорганическими формами этих элементов. Но обычно данные об ΔPOA и $\Delta PROF$ отсутствуют или их крайне мало, и мы сделаем предположение, что потоки органических форм азота и фосфора малы.

Важной является разница между $\Delta A_{\text{Зот}}_{\text{OBS}}$ (наблюдаемым) и $\Delta A_{\text{Зот}}_{\text{EXP}}$ (рассчитываемым), показывающая процессы, отличные от органического метаболизма изменяющие количество фиксированного азота. Нитрификация азота и денитрификация являются важными факторами для неконсервативного потока азота во многих морских

* **Нитрификация** – превращение азота воздуха в нитраты, процесс окисления аммиака и NH_4^+ до NO_2^- (нитрит-ион), а затем до NO_3^- (нитрат-ион) под действием бактериальных нитрификаторов.

** **Денитрификация** – процесс восстановления нитратов и нитритов, протекающий при недостатке кислорода и наличии безазотистых веществ (крахмал, клетчатка и др.), на окисление которых расходуется кислород нитратов и нитритов. При этом азот выделяется в атмосферу в свободном виде или в виде аммиака:



системах, этот факт описывается разницей между нитрификацией и денитрификацией [*nfix-denit*]:

$$[nfix - denit] = \Delta Azom_{OBS} - \Delta Azom_{EXP} \quad (28)$$

или

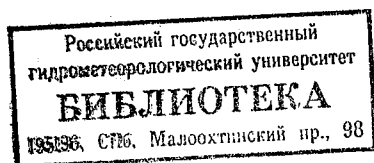
$$[nfix - denit] = \Delta PHA - \left(\Delta PH\Phi \left(\frac{N}{P} \right) \right). \quad (29)$$

Придонные слои прибрежных экосистем могут быть значительным ресурсом нитрификации азота. Вследствие этого прибрежная среда может играть важную роль в глобальном цикле азота. Однако относительно немного областей Мирового океана изучены достаточно, чтобы адекватно оценить эту роль.

Литература

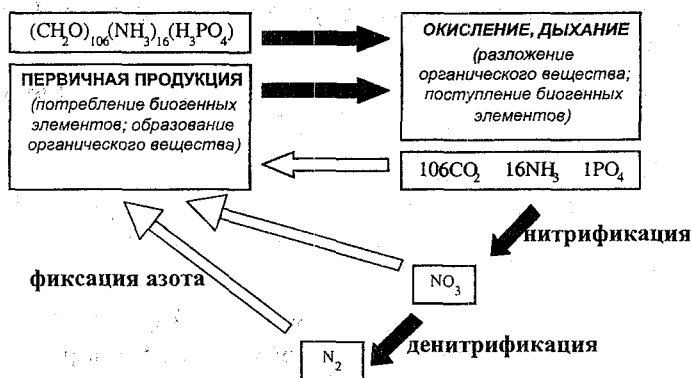
- Алекин О.А., Ляхин Ю.И. *Химия океана*. Гидрометиздат, 1984, 343 с.
Руководство по химическому анализу морских вод. Гидрометеиздат, 1993, 264 с.
- Погребов В.Б., Шилин М.Б. *Экологический мониторинг прибрежной зоны арктических морей*. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 95 с.
- David L.T., Diego-McGlone M.L., Crossland C.J., Smith S.V. *LOICZ biogeochemical budgeting procedure: A tutorial pamphlet*. LOICZ International Project Office Netherlands Institute of Sea Research, 2000, 30 p.
- Gordon, Jr., D. C., Boudreau P. R., Mann K. H., Ong J.-E., Silvert W. L., Smith S. V., Wattayakorn G., Wulff F. and Yanagi T. *LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines*. LOICZ Reports & Studies No. 5, 1996, 96 с.
- Nitishinsky M., Pivovarov S. *Nutrient distributions, variability, and budgets in the Laptev Sea System*. EGS - AGU - EUG Joint Assembly. Nice. France. April 06-11. 2003. EAE03-A-00243.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку настоящей работы, Российско-германской лаборатории морских и полярных исследований им. О.Ю. Шмидта, Гетеборгскому Университету и лично проф. Л. Андерсону и директору фирмы «СтаКос» К. А. Гурову.



Приложение 1

Графическое отображение метаболизма экосистемы.



$[p - r] > 0$ $\Delta PH\Phi < 0$	Система является автотрофной и в системе потребляются фосфаты
$[p - r] < 0$ $\Delta PH\Phi > 0$	Система является Гетеротрофной и в системе образуются фосфаты
$[Nfix - denit] > 0$	В системе происходит фиксация азота
$[Nfix - denit] < 0$	В системе происходит денитрификация

Здесь термин автотрофность понимается как сравнительная независимость системы от величин притока биогенных элементов с материковым стоком, гетеротрофность – наоборот.

Приложение 2. Справочные таблицы

В таблицах приведены значения параметров уравнений для различных прибрежных экосистем. Подставляя численные значения в формулы (1)–(26), и следуя алгоритму выполнения задания, можно получить конкретные величины баланса биогенных элементов для различных прибрежных экосистем.

Обская губа. Карское море. Лето.

Таблица 1

	Поверхностный слой	Придонный слой
Площадь (км^2)	5635	
Толщина слоя (м)	10	15
Число месяцев в сезоне	3	3
Осадки ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	10	-
Испарение ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	-3	-
Речной сток ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	1130	-
Грунтовые воды ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	53	-
Лед ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	125	-
Соленость океана	14,2	29,0
Соленость системы	5,5	16,5
РНФ океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	0,8
РНФ системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,9	1,4
РНФ в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,4	-
РНФ в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0	-
РНФ в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	-	-
РНФ во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	-
РНА океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	4,2	4,9
РНА системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	5,0	12,5
РНА в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	1,6	-
РНА в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	1,6	-
РНА в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	2,0	-
РНА во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-

Минерализация речных и грунтовых вод 0,02 psu. Соленость льда 2,50 psu.

Таблица 1

Обская губа. Карское море. Зима.

	Поверхностный слой	Придонный слой
Площадь (км ²)	5635	
Толщина слоя (м)	10	15
Число месяцев в сезоне	9	9
Осадки ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	12	-
Испарение ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	0	-
Речной сток ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	380	-
Грунтовые воды ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	160	-
Лед ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	41	-
Соленость океана	20,2	30,0
Соленость системы	5,5	17,4
РНФ океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,8	1,4
РНФ системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	1,5	2,1
РНФ в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,6	-
РНФ в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0	-
РНФ в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	-	-
РНФ во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	-
РНА океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	4,4	5,4
РНА системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	6,5	13,9
РНА в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	2,3	-
РНА в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	2,3	-
РНА в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,0	-
РНА во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-

Минерализация речных и грунтовых вод 0,02 psu. Соленость льда 2,50 psu.

Таблица 3

Енисейский залив. Карское море. Лето.

	Поверхностный слой	Придонный слой
Площадь (км ²)	19950	
Толщина слоя (м)	10	25
Число месяцев в сезоне	3	3
Осадки ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	10	-
Испарение ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	-19	-
Речной сток ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	1200	-
Грунтовые воды ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	27	-
Лед ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	443	-
Соленость океана	14,7	29,7
Соленость системы	10,2	23,1
РНФ океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,4	0,9
РНФ системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,4	0,9
РНФ в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,4	-
РНФ в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-
РНФ в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	-	-
РНФ во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	-
РНА океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	3,1	6,0
РНА системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	4,2	7,4
РНА в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	8,8	-
РНА в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	9,6	-
РНА в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	2,0	-
РНА во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-

Минерализация речных и грунтовых вод 0,02 psu. Соленость льда 2,50 psu.

Таблица 3

Енисейский залив. Карское море. Зима.

	Поверхностный слой	Придонный слой
Площадь (км ²)	19950	
Толщина слоя (м)	10	25
Число месяцев в сезоне	9	9
Осадки ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	12	-
Испарение ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	0	-
Речной сток ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	350	-
Грунтовые воды ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	80	-
Лед ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	148	-
Соленость океана	18,0	30,0
Соленость системы	12,8	23,9
РНФ океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,7	1,2
РНФ системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,6	0,9
РНФ в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-
РНФ в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-
РНФ в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	-	-
РНФ во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	-
РНА океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	4,7	6,8
РНА системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	6,5	8,5
РНА в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	9,6	-
РНА в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	9,6	-
РНА в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,0	-
РНА во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-

Минерализация речных и грунтовых вод 0,02 psu. Соленость льда 2,50 psu.

Таблица 5

Янский залив. Море Лаптевых. Лето.

	Поверхностный слой	Придонный слой
Площадь (км ²)	15350	
Толщина слоя (м)	5	11
Число месяцев в сезоне	4	4
Осадки ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	19	-
Испарение ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	6,3	-
Речной сток ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	240	-
Грунтовые воды ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	8,5	-
Лед ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	93	-
Соленость океана	19,9	29,4
Соленость системы	15,1	22,4
РНФ океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,2	0,6
РНФ системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	0,4
РНФ в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,3	-
РНФ в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,7	-
РНФ в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	-	-
РНФ во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	-
РНА океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	6,3
РНА системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	1,4
РНА в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	3,1	-
РНА в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	8,9	-
РНА в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	2,0	-
РНА во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-

Минерализация речных и грунтовых вод 0,02 psu. Соленость льда 2,50 psu.

Таблица 6

Янский залив. Море Лаптевых. Зима.

	Поверхностный слой	Придонный слой
Площадь (км ²)	15350	
Толщина слоя (м)	3	13
Число месяцев в сезоне	8	8
Осадки ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	8,7	-
Испарение ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	0	-
Речной сток ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	8,5	-
Грунтовые воды ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	8,5	-
Лед ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	660	-
Соленость океана	22,6	29,8
Соленость системы	15,9	24,8
РНФ океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	0,8
РНФ системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,4	0,7
РНФ в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,7	-
РНФ в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,7	-
РНФ в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	-	-
РНФ во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	-
РНА океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	3,2	7,0
РНА системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	2,1	3,6
РНА в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	8,9	-
РНА в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	8,9	-
РНА в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,0	-
РНА во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-

Минерализация речных и грунтовых вод 0,02 psu. Соленость льда 2,50 psu.

Губа Буор-Хая. Море Лаптевых. Лето.

	Поверхностный слой	Придонный слой
Площадь (км ²)	15535	
Толщина слоя (м)	5	11
Число месяцев в сезоне	4	4
Осадки ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	19	-
Испарение ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	6,4	-
Речной сток ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	2500	-
Грунтовые воды ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	320	-
Лед ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	94	-
Соленость океана	19,9	29,4
Соленость системы	7,9	22,3
РНФ океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,2	0,6
РНФ системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	0,5
РНФ в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,6	-
РНФ в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	1,5	-
РНФ в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	-	-
РНФ во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	-
РНА океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	6,3
РНА системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	1,5
РНА в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	14,6	-
РНА в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	33,9	-
РНА в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	2,0	-
РНА во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-

Минерализация речных и грунтовых вод 0,02 psu. Соленость льда 2,50 psu.

Таблица 8

Губа Буор-Хая. Море Лаптевых. Зима.

	Поверхностный слой	Придонный слой
Площадь (км ²)	15535	
Толщина слоя (м)	8	8
Число месяцев в сезоне	8	8
Осадки ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	8,8	-
Испарение ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	0	-
Речной сток ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	320	-
Грунтовые воды ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	320	-
Лед ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	670	-
Соленость океана	22,6	29,8
Соленость системы	9,2	28,3
РНФ океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	0,8
РНФ системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	0,9
РНФ в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	1,5	-
РНФ в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	1,5	-
РНФ в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	-	-
РНФ во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	-
РНА океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	3,2	7,0
РНА системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	3,3	7,5
РНА в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	33,9	-
РНА в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	33,9	-
РНА в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,0	-
РНА во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-

Минерализация речных и грунтовых вод 0,02 psu. Соленость льда 2,50 psu.

Оленекский залив. Море Лаптевых. Лето.

	Поверхностный слой	Придонный слой
Площадь (км ²)	9351	
Толщина слоя (м)	10	3
Число месяцев в сезоне	4	4
Осадки ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	11	-
Испарение ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	3,8	-
Речной сток ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	510	-
Грунтовые воды ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	23	-
Лед ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	68	-
Соленость океана	11,9	29,4
Соленость системы	8,2	24,2
РНФ океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,2	0,6
РНФ системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,2	0,5
РНФ в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,4	-
РНФ в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	1,2	-
РНФ в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	-	-
РНФ во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	-
РНА океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	6,3
РНА системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	1,5
РНА в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	13,5	-
РНА в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	29,3	-
РНА в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	2,0	-
РНА во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-

Минерализация речных и грунтовых вод 0,02 psu. Соленость льда 2,50 psu.

Таблица 10

Оленекский залив. Море Лаптевых. Зима.

	Поверхностный слой	Придонный слой
Площадь (км ²)	9351	
Толщина слоя (м)	5	8
Число месяцев в сезоне	8	8
Осадки ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	5,3	-
Испарение ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	0	-
Речной сток ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	23	-
Грунтовые воды ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	23	-
Лед ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	420	-
Соленость океана	22,6	29,8
Соленость системы	21,5	24,7
РНФ океана (ммоль·м ⁻³)	0,5	0,8
РНФ системы (ммоль·м ⁻³)	0,5	0,9
РНФ в речной воде (ммоль·м ⁻³)	1,2	-
РНФ в грунтовых водах (ммоль·м ⁻³)	1,2	-
РНФ в осадках (ммоль·м ⁻³)	-	-
РНФ во льду (ммоль·м ⁻³)	0,1	-
РНА океана (ммоль·м ⁻³)	3,2	7,0
РНА системы (ммоль·м ⁻³)	3,3	7,3
РНА в речной воде (ммоль·м ⁻³)	29,3	-
РНА в грунтовых водах (ммоль·м ⁻³)	29,3	-
РНА в осадках (ммоль·м ⁻³)	0,0	-
РНА во льду (ммоль·м ⁻³)	0,5	-

Минерализация речных и грунтовых вод 0,02 psu. Соленость льда 2,50 psu.

Хатангский залив. Море Лаптевых. Лето.

	Поверхностный слой	Придонный слой
Площадь (км ²)	10850	
Толщина слоя (м)	5	7
Число месяцев в сезоне	4	4
Осадки ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	13	-
Испарение ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	2,7	-
Речной сток ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	560	-
Грунтовые воды ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	16	-
Лед ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	130	-
Соленость океана	19,9	29,4
Соленость системы	8,2	21,3
РНФ океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,2	0,6
РНФ системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	0,3
РНФ в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,2	-
РНФ в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,3	-
РНФ в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	-	-
РНФ во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	-
РНА океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	6,3
РНА системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	1,4
РНА в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	2,7	-
РНА в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	5,3	-
РНА в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	2,0	-
РНА во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-

Минерализация речных и грунтовых вод 0,02 psu. Соленость льда 2,50 psu.

Таблица 12

Хатангский залив. Море Лаптевых. Зима.

	Поверхностный слой	Придонный слой
Площадь (км ²)	10850	
Толщина слоя (м)	5	7
Число месяцев в сезоне	8	8
Осадки ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	6,1	-
Испарение ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	0	-
Речной сток ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	16	-
Грунтовые воды ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	16	-
Лед ($10^6 \text{ м}^3 \cdot \text{день}^{-1}$)	490	-
Соленость океана	22,6	29,8
Соленость системы	21,6	22,8
РНФ океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	0,8
РНФ системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,4	0,6
РНФ в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,3	-
РНФ в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,3	-
РНФ в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	-	-
РНФ во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,1	-
РНА океана ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	3,2	7,0
РНА системы ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	2,1	3,6
РНА в речной воде ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	5,3	-
РНА в грунтовых водах ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	5,3	-
РНА в осадках ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,0	-
РНА во льду ($\text{ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$)	0,5	-

Минерализация речных и грунтовых вод 0,02 psu. Соленость льда 2,50 psu.

Учебное издание

**Мирослав Александрович Нитишинский
Михаил Борисович Шилин**

**РАСЧЕТ ПОТОКОВ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В МОРСКИХ ПРИБРЕЖНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ**

Практическая работа

Редакторы: Максимова И.Г., Крайнова О.С.

ЛР № 020309 от 30.12.96

РГТМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98

Отпечатано в ЦНИТ «АСТЕРИОН»

Заказ № 121. Подписано в печать 18.04.2006 г. Бумага офсетная.

Формат 60×84¹/₁₆. Объем 2 п. л. Тираж 100 экз. Санкт-Петербург, 191015, а/я 83,
тел. /факс (812) 275-73-00, 275-53-92, тел. 970-35-70