Известия ТИНРО

2015 **Том 182**

УДК 556.541.4(265.54)

А.С. Важова, Ю.И. Зуенко*

Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр,
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4

ОЦЕНКА ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ В ЭСТУАРИЯХ РЕК РАЗДОЛЬНАЯ И СУХОДОЛ (ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

По данным гидрохимических исследований эстуариев двух рек с различным гидрологическим режимом, расположенных в бассейне зал. Петра Великого (Раздольная и Суходол), которые проведены в 2010–2013 гг., определён продукционно-деструкционный баланс на различных участках эстуариев в разные сезоны и оценена первичная продукция в летний сезон. Продукционные показатели рассчитаны по разности между фактическими концентрациями биогенных элементов в эстуариях и их потенциальными концентрациями, обусловленными только разбавлением речной воды. При прохождении речных вод через эстуарии концентрации минеральных форм биогенных элементов вначале возрастают выше потенциальных величин благодаря деструкции органического вещества, происходящей преимущественно во внутренних эстуариях, а затем в результате расходования на фотосинтез понижаются до уровней ниже потенциальных. Отмечено преобладание продукционных процессов весной, смена знака продукционно-деструкционного баланса от деструкции в верхних частях эстуариев к продукции в их нижних частях летом и преобладание деструкционных процессов осенью. Продуктивность эстуария р. Раздольной на всём его протяжении обеспечивается в основном утилизацией биогенов терригенного происхождения, а в эстуарии р. Суходол терригенные биогены быстро расходуются, и продукция обеспечивается в значительной степени за счёт рециклинга. С кубометра воды обеих рек при прохождении эстуария продуцируется в среднем 0,8–1,0 гС/м^{3}км, т.е. летом до 5,6 гС/м^{3}сутки с максимумом в верхней части внешних эстуариев при солёности 5–10 ‰, вблизи солёностного фронта, разделяющего слабосолёные воды внутреннего эстуария и солоноватые воды внешнего эстуария. С учётом деструкции органического вещества, «чистая продукция» имеет в основном отрицательные значения в речных частях эстуариев, возрастает до максимума в верхних частях внешних эстуариев (до 0,7–1,0 гС/м^{3}км, т.е. 3–5 гС/м^{3}сутки) и далее в море сохраняется на более низком, но положительном уровне. Таким образом, эстуарии являются одновременно «маргинальными фильтрами», ограничивающими проникновение терригенных биогенных элементов в море, и «фабриками биогенов».

Ключевые слова: эстуарий, биогенные элементы, продукционно-деструкционный баланс, первичная продукция, залив Петра Великого, р. Раздольная, р. Суходол.

Vazhova A.S., Zuenko Yu.I. Evaluation of primary production in the estuaries of the Razdolnaya/Suifen and Sukhodol Rivers (Peter the Great Bay, Japan Sea) // Izv. TINRO. — 2015. — Vol. 182. — P. 132–143.

* *Важова Анна Сергеевна, младший научный сотрудник, e-mail: anna.vazhova@gmail.com; Зуенко Юрий Иванович, доктор географических наук, заведующий лабораторией, e-mail: zuenko_yury@hotmail.com.*

Vazhova Anna S., junior researcher, e-mail: anna.vazhova@gmail.com; Zuenko Yury I., D.Sc., head of laboratory, e-mail: zuenko_yury@hotmail.com.

Production-destruction balance is determined and primary production is evaluated for different parts of the estuaries of two rivers with different hydrological regime in Peter the Great Bay basin (Razdolnaya/Suifen and Sukhodol) in different seasons on the data of chemical surveys conducted in 2010–2013. The values of production and destruction are calculated from the difference between observed nutrients (phosphorus) concentration in the estuaries and their potential concentration conditioned by the river water dilution. The nutrients concentration in the water passing through estuaries increased in their upper parts over the potential values due to the nutrients influx from destruction, then decreased below the potential values because of the consumption for photosynthesis. Production processes prevailed over the estuaries in spring, the sign of production-destruction balance changed in summer from destruction in the upper estuaries to production in the lower estuaries, and destruction processes prevailed in autumn-winter. Productivity of the Razdolnaya/Suifen estuary is based mainly on utilization of terrigenous nutrients dissolved in its highly mineralized water, but in the Sukhodol estuary the nutrients of terrigenous origin are consumed quickly and its productivity is maintained by recycling of nutrients. Passing the estuaries, 1 m^3 of both rivers water produces on average 0.8–1.0 gC/m^3km that corresponds to values of primary production up to 5.6 gC/m^3day in summer, with the maximum in the upper parts of the external estuaries under salinity 5–10 ‰, at the haline front dividing almost fresh water of the internal estuary from brackish water of the external estuary. Taking destruction of organic matter into account, net production is mostly below zero in the river parts of estuaries, particularly in autumn, it reaches the maximum in the upper part of external estuaries (up to 0.7–1.0 gC/m^3km or 3–5 gC/m^3day) and remains on lower but positive level further offshore. So, estuaries are simultaneously «marginal filters» limiting penetration of terrigenous nutrients into the sea and «factories of nutrients»: the latter process dominates in their internal parts and enhances considerably biological productivity of these water bodies.

Key words: estuary, nutrients, production-destruction balance, primary production, Peter the Great Bay, Razdolnaya/Suifen River, Sukhodol River.

Введение

Благодаря своему положению между рекой и морем эстуарии обладают специфическими морфологическими, гидрологическими, гидрохимическими и экологическими свойствами, отличающими их от других водных объектов, одним из которых является высокая биологическая продуктивность. Несмотря на очевидный источник поступления биогенных элементов в эстуарии, из многочисленных наблюдений известно, что их концентрации не просто постепенно снижаются по мере разбавления речных вод морскими, но могут резко и разнонаправленно меняться под действием происходящих в самом эстуарии процессов: либо продуцирования органического вещества, в ходе которого из воды изымаются минеральные формы некоторых химических элементов, либо деструкции органики, в результате чего в воду поступают регенерированные биогенные вещества (Eyre, Balls, 1999; Boonphakdee, Fujiwara, 2008; Süzal et al., 2008; Sarma et al., 2010; Лапин, 2011; Statham, 2012; Важова, Зуенко, 2015). Соотношение продукции и деструкции в эстуариях отличается высокой пространственной изменчивостью и к тому же меняется по сезонам, но механизмы этих изменений пока не ясны, а количественные оценки неоднозначны.

Поскольку процессы синтеза-распада органического вещества и концентрация биогенных элементов в воде связаны между собой, продуктивность водоёмов вообще и эстуарных зон в частности может быть оценена по бюджету биогенов. Обычно для этого используются балансовые дифференциальные модели, например для эстуариев — боксовая модель Гордона (Gordon et al., 1996), учитывающая разбавление речной воды морской. Недостатком дифференциальных моделей является потребность в частых измерениях, так как для создания дифференциальных уравнений баланса биогенов нужно определить их концентрации как минимум дважды, причём в условиях установившегося гидрохимического режима. К тому же использование данных, осреднённых по большим объёмам (боксам), не позволяет локализовать продукционно-деструкционные процессы, поэтому в исследованиях бюджета биогенных элементов, выполненных для эстуариев нескольких рек в разных странах (Eyre, Balls, 1999; Boonphakdee, Fujiwara, 2008; Siizal et al., 2008; Sarma et al., 2010), пространственно-временные изменения про-

цессов продуцирования и минерализации органического вещества не рассматриваются, хотя результаты этих исследований в целом подтверждают концепцию А.П. Лисицына (1994), согласно которой утилизация большей части биогенного стока рек происходит во внешнем эстуарии. Другой принципиальный недостаток дифференциальных моделей — невозможность раздельной количественной оценки продукции и деструкции. В лучшем случае в моделях оценивается разность продукции и деструкции (Boonphakdee, Fujiwara, 2008), обычно же при исследовании продукционных процессов в эстуариях вклад рециклинга вообще не учитывается, а все выносимые рекой биогенные элементы рассматриваются как терригенные (Ефимова, Цыцарин, 2002; Звалинский и др., 2005; Лапин, 2011; Statham, 2012), что приводит к занижению оценок продукции.

Учитывая перечисленные проблемы, целью данной работы были пространственная локализация продукции и деструкции и оценка сезонных изменений этих процессов. Оказалось, что в эстуариях участки активного продуцирования и минерализации пространственно разобщены. Эта особенность продукционно-деструкционных процессов в эстуариях позволила разделить, во всяком случае отчасти, оценки продукции и деструкции, т.е. в значительной степени избежать методического занижения оценок первичной продукции.

Для достижения этих целей определён продукционно-деструкционный баланс биогенных элементов (на примере фосфора) на различных участках эстуариев двух рек бассейна зал. Петра Великого с различным гидрологическим режимом, выявлены особенности его сезонных изменений и сделаны количественные оценки продукционных показателей.

Материалы и методы

Материалом для работы послужили данные, полученные в 2010–2013 гг. при проведении гидролого-гидрохимических съемок эстуарных зон рек Раздольная и Суходол (см. таблицу, рис. 1). Съемки характеризовали разные фазы водного режима рек: зимнюю межень (декабрь), летний паводок (июль-август) и переходные фазы.

Даты проведения гидролого-гидрохимических съемок в эстуариях
Dates of samplings

Река	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.
Раздольная	30 августа	30 июня	22 мая 31 октября	10 сентября
Суходол	4–5 августа	5 июля 25 августа	25 апреля 8 августа 4 сентября 25 октября 25 декабря	

Температуру и соленость измеряли во всей толще вод океанологическим зондом YSI-6600V2 (США), с интервалом по глубине 0,5 м, прозрачность — диском Секки, пробы для лабораторных определений pH и концентраций биогенных элементов (фосфора, кремния и основных форм азота) отбирали на поверхности и у дна (при глубине более 1 м) при помощи батометра Нискина. Лабораторные гидрохимические определения выполнены по стандартным методикам (Руководство …, 2003), концентрации биогенных элементов измеряли с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-1800 (Япония), результаты измерений приводятся в размерности микромоль на литр (мкМ/л).

Данные о расходах рек Раздольная и Суходол получены из научной литературы (Савельева и др., 2005; Budaeva et al., 2013). Поскольку расход обеих рек очень изменчив, эти данные могут характеризовать лишь порядок величин расходов, и результаты расчётов с их использованием могут рассматриваться только как приблизительные оценки.

Для удобства описания эстуарии по структуре вод разделены на внутреннюю и внешнюю части, по Ю.И. Зуенко (2008). Во внутреннем эстуарии поверхност-

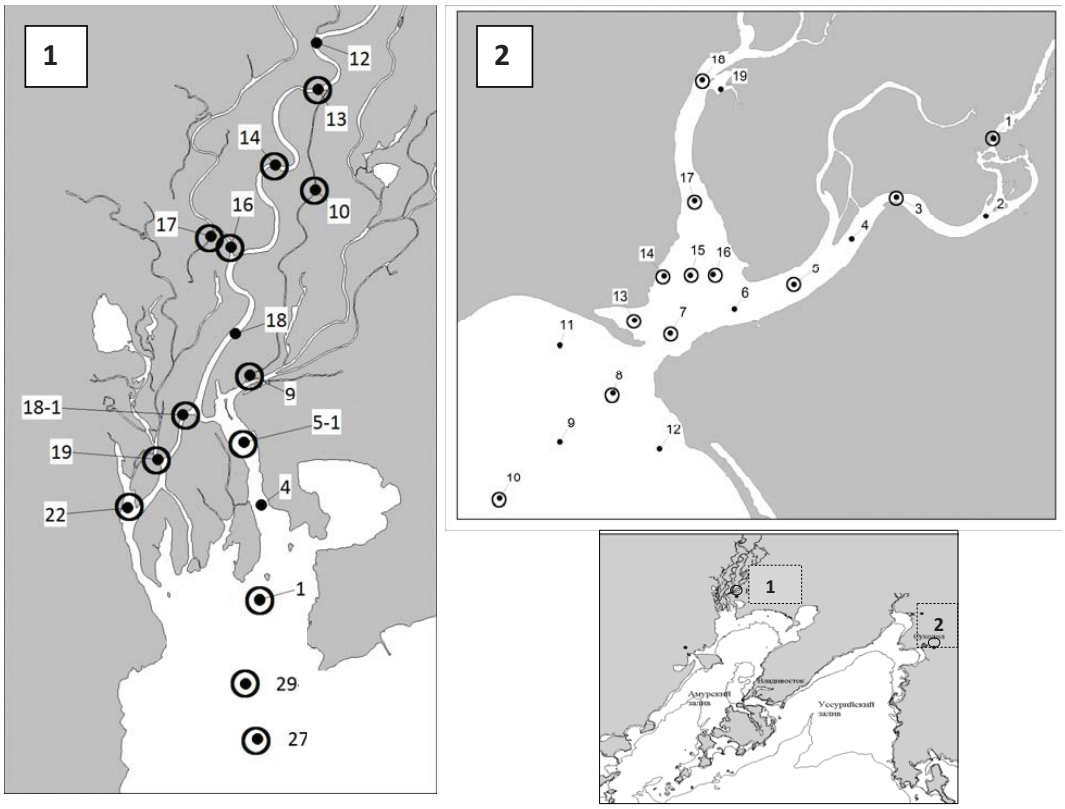

Рис. 1. Схемы исследования эстуариев рек зал. Петра Великого: Раздольная (**1**) и Суходол (**2**). Точками обозначены все исследованные станции, кружками — станции, на которых измеряли гидрохимические параметры

Fig. 1. Scheme of surveys in the estuaries of Razdolnaya/Suifen (**1**) and Sukhodol (**2**). Circles — sites of chemical samplings

ный слой занят пресной или почти пресной речной водой, а у дна (если глубина достаточно большая) находится клин солоноватых вод. Во внешнем эстуарии поверхностный слой занят шлейфом солоноватых вод, а придонный слой занимают солёные морские воды. Анализ структуры вод выполнен методом статистического TS-анализа (Мамаев, 1987), с использованием такого свойства водных масс, как однородность по температуре и солёности. На статистических TS-диаграммах водные массы соответствуют TS-классам максимальной повторяемости, а границы между ними — TS-классам минимальной повторяемости. Положение границы между двумя эстуарными типами структуры вод, соответствующей солёностному фронту на поверхности эстуария, менялось по сезонам: от весны к лету вверх по течению, а от лета к осени — в обратном направлении, что не соответствует сезонным изменениям водности рек и предположительно вызвано сезонными изменениями уровня моря (Важова, Зуенко, 2015).

Для оценки первичной продукции эстуариев рассматривались изменения концентрации минеральных форм фосфора, который присутствует в водоемах главным образом в виде ионов $H_2PO_4^-$ (кислые воды) и HPO_4^{2-} (нейтральные и щелочные воды). В пресноводных водоемах фосфаты активно потребляются при фотосинтезе фитопланктоном, фитобентосом и высшими водными растениями и в большей степени способны лимитировать первичную продукцию, поскольку относительно концентраций минерального азота и солей кремнекислоты они часто находятся в дефиците (Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990; Савенко, Савенко, 2007). В процессе деструкции органического вещества большая часть фосфатов, содержащихся в нём, минерализуется и возвращается в воду.

Для количественной оценки продукции и деструкции определяли отклонения наблюдаемых концентраций минерального фосфора от потенциальных, обусловленных только разбавлением речных вод. В случае консервативного поведения растворённых в речной воде фосфатов изменение его концентрации в эстуарии по направлению градиента солёности должно происходить пропорционально росту солености, и зависимость концентрации фосфора от солёности имеет вид линейной функции. Если же в процессе разбавления речной воды происходит изъятие либо добавление минерального фосфора, зависимость его концентрации от солености оказывается нелинейной. Отклонения наблюдаемых концентраций фосфора от прямой линейной зависимости от солёности указывают на наличие продукционных (при отклонении вниз) либо деструкционных (при отклонениях вверх) процессов. Этот метод, подробно описанный в работе В.И. Звалинского с соавторами (2005) для случая смешения двух водных масс: пресной (богатой биогенами) и соленой (бедной биогенами), пришлось немного усовершенствовать с целью учёта влияния ещё одного источника питательных веществ, присутствующего в эстуариях — глубинных морских вод (соленых, богатых биогенами). Фактически линейная зависимость потенциальных концентраций биогенных элементов от солёности удовлетворительно отображает продукционно-деструкционные процессы, происходящие в речных частях эстуариев (внутренних эстуариях), но завышает оценки деструкции в их морских частях (внешних эстуариях). Поэтому в данной работе для внешних эстуариев функции зависимости потенциальных концентраций биогенных элементов от солёности рассчитаны с учётом процентного содержания трёх водных масс, определённого методом TS-анализа (Мамаев, 1987). Для этого вначале по треугольникам смешения определено процентное содержание каждой водной массы для всех станций съемок, затем из рассчитанных соотношений получены потенциальные концентрации биогенных веществ, и, наконец, путём вычитания значений потенциальных концентраций из реальных значений содержания фосфора рассчитаны дефициты либо префициты концентраций, возникшие из-за потребления солей при продуцировании органического вещества и их высвобождения при минерализации органического вещества.

По разностям для каждой станции (i) с использованием соотношения Редфилда (C : P = 106 : 1) определена масса органического вещества, которая образовалась в результате утилизации биогенных веществ в этих объемах (*удельная урожайность*):

$$b_i = R \cdot (C_{i\text{-}potential} - C_i - C_{i\text{-}recycling}), \quad (1)$$

где C — концентрация минерального фосфора, г/м^3 (потенциальная, наблюдаемая и получаемая в результате рециклинга); R — соотношение Редфилда. Далее оценен урожай органического вещества, продуцированного из единичного объёма речной воды к моменту достижения им станции i, с учётом разбавления речной воды в эстуарии:

$$Y_i = b_i/\mu_i, \quad (2)$$

где μ — доля речных вод. Величины Y по определению могут только возрастать вниз по течению реки, поскольку они относятся к единичному начальному объёму речной воды. Случаи локального роста концентрации фосфатов в этом объёме вниз по течению, когда формальный расчёт даёт «отрицательную продукцию», интерпретированы как преобладание деструкции, т.е. удельную урожайность Y на таких участках обнуляли путём добавления к наблюдаемой концентрации C_i величины $C_{i\text{-}recycling}$ (см. уравнение 1), обусловленной деструкцией. Свойство монотонности роста продукции из единичного объёма речной воды даёт возможность сделать её минимальные оценки для участков преобладания продукции, где обратным процессом можно пренебречь. Аналогично можно сделать минимальные оценки деструкции для участков преобладания этого процесса, пренебрегая продукцией на этих участках:

$$d_i = R \cdot C_{i\text{-}recycling}. \quad (3)$$

Основным показателем первичной продукции в данной работе является *удельная продукция* эстуария на единицу его протяжённости, которая рассчитана для участков между парами соседних станций i и i–1, расположенных вдоль основных русел:

$$p = \frac{Y_i - Y_{i-1}}{L_i - L_{i-1}} \cdot \mu_i, \quad (4)$$

где L — дистанция, пройденная речной водой в эстуарии, км. Зная скорость течения, по удельной продукции эстуария на единицу его протяжённости можно рассчитать удельную продукцию в единицу времени P, которая обычно используется в качестве показателя первичной продукции:

$$P = p \cdot v, \quad (5)$$

где v — скорость течения, м/сутки. В ходе выполненных съёмок скорость течения не измерялась, но она оценена приближенно по данным о расходе рек:

$$v = Q/(a \cdot h), \quad (6)$$

где Q — расход реки, км^3/сутки; a — ширина русла эстуария, км; h — толщина слоя речной воды, км.

Результаты и их обсуждение

Продукционно-деструкционный баланс фосфатов

Для оценки продукционно-деструкционного баланса фосфора рассмотрим распределение концентрации его солей вдоль градиента солености. На поверхности эстуария р. Суходол солёность обычно начинает возрастать за 1–2 км до бара, и лишь во время весенних паводков речные воды распространяются до самого бара, при этом соленость резко возрастает уже в море. На поверхности эстуария р. Раздольной летом солёность начинает увеличиваться ещё раньше, в 2–5 км от бара, но весной и осенью зона распространения олигогалинных вод достигает бара (рис. 2).

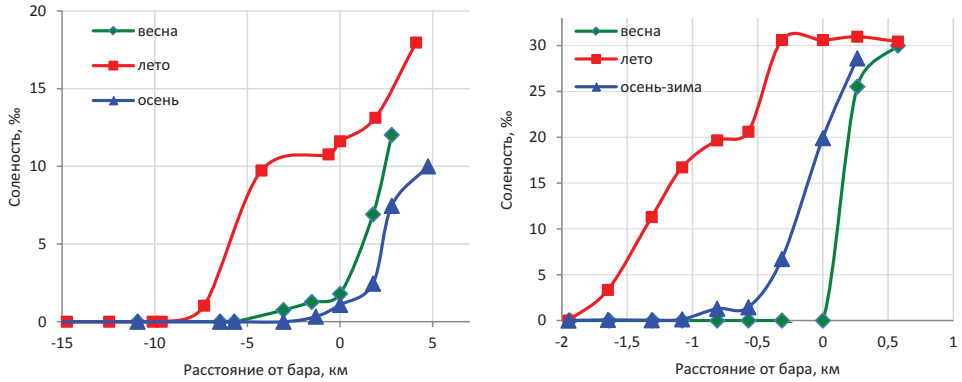

Рис. 2. Изменения солености на поверхности эстуариев рек Раздольная (**а**) и Суходол (**б**) вдоль главного русла в среднем по сезонам (отсчёт расстояний от бара в сторону моря)

Fig. 2. Salinity changes at the surface along the main channels of the Razdolnaya/Suifen (**а**) and Sukhodol (**б**) estuaries, averaged by seasons (distance is measured seaward)

Изменения концентрации фосфатов носят неконсервативный характер (рис. 3), что обусловлено потреблением фосфора при фотосинтезе, которое приводит к снижению концентрации, а при минерализации органики концентрация возрастает. Весной на всём протяжении эстуариев обеих рек концентрации фосфатов ниже значений, обусловленных разбавлением речной воды, т.е. в этот сезон происходит активное потребление фосфора, свидетельствующее о преобладании продукционных процессов. Летом концентрации фосфатов у поверхности внутренних эстуариев выше консервативных, т.е. там преобладает реминерализация приносимого реками органического вещества, но в целом по эстуариям и в этом сезоне продукционные процессы преобладают. Осенью величины концентраций фосфатов находятся выше прямых консервативного поведения почти на всём остальном протяжении эстуариев, что свидетельствует о преобладании процессов деструкции органического вещества.

Повсеместное преобладание продукционных процессов весной указывает на низкое содержание растворённого и взвешенного органического вещества в весенних речных

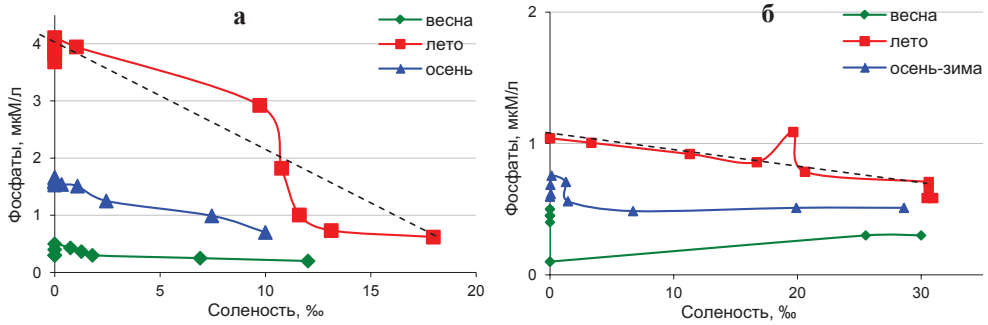

Рис. 3. Изменения средних по сезонам концентраций минеральных форм фосфора вдоль градиента солености на поверхности эстуариев рек Раздольная (**а**) и Суходол (**б**). Для лета показаны примеры прямых консервативного поведения фосфатов (*пунктир*)

Fig. 3. Changes of phosphate concentration averaged by seasons along salinity gradient at the surface of the Razdolnaya/Suifen (**а**) and Sukhodol (**б**) estuaries. Examples of conservative behavior of nutrients are shown for summer only as strait *dotted lines*

водах. Летом процессы деструкции активизируются во внутреннем эстуарии, что может быть обусловлено как ростом органического загрязнения речных вод, так и формированием внутриэстуарного источника регенерированных биогенов в придонном слое внутреннего эстуария, однако во внешнем эстуарии по-прежнему преобладают продукционные процессы. Осенью процессы минерализации органики в эстуарии настолько активизируются, что продукционные процессы лишь компенсируют, причём не всегда полностью, поступление регенерированных питательных солей, и в целом баланс смещается в сторону деструкции. Таким образом, эстуарии обеих исследованных рек являются одновременно и «маргинальными фильтрами», утилизирующими терригенный ионный сток рек (Лисицын, 1994), и «фабриками биогенов», восстанавливающими минеральные формы биогенных элементов, с тенденцией сезонной экспансии минерализации от весны к осени.

Расчёт потенциальных концентраций фосфатов

Распределение биогенов вдоль градиента солености отражает продукционно-деструкционные процессы качественно. Для количественной оценки продукции и деструкции определены отклонения наблюдаемых концентраций от потенциальных, соответствующих наблюдаемой степени разбавления речных вод морскими (рис. 4).

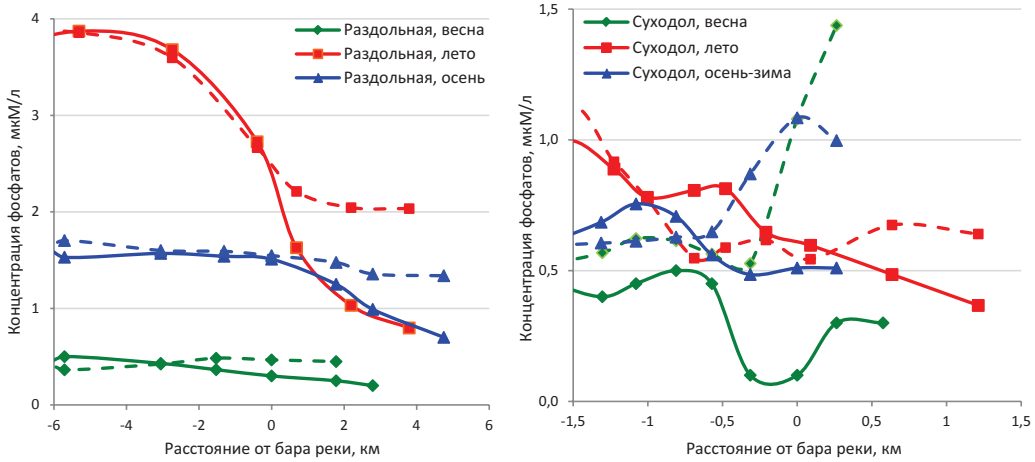

Рис. 4. Концентрации фосфатов на поверхности эстуариев вдоль основных русел рек (*сплошные линии*) относительно их потенциальных концентраций, обусловленных смешением речных вод с поверхностными и глубинными морскими водами (*пунктир*)

Fig. 4. Phosphate concentration along the main channels at the surface of the Razdolnaya/Suifen (left) and Sukhodol (right) estuaries relative to its potential concentration conditioned by the river water mixing with the sea surface and subsurface waters (*dotted lines*)

Если бы концентрации фосфора зависели только от степени разбавления речной воды, то во внешних эстуариях они были бы выше наблюдаемых как для р. Раздольной, так и для р. Суходол, более низкие наблюдаемые концентрации отражают преобладание продукционных процессов во внешних эстуариях. В области внешнего эстуария р. Раздольной эта разница сравнительно невелика в весенний и осенний сезоны и резко возрастает летом, когда реальные концентрации вдвое ниже потенциальных. Во внешнем эстуарии р. Суходол разница между потенциальными и реальными концентрациями фосфатов значительна во все сезоны: весной наблюдаемые концентрации ниже потенциальных в 3,0–4,0 раза, летом — в 2,0 раза, осенью-зимой — в 1,5 раза. И наоборот, в областях внутренних эстуариев обеих рек, особенно выше по течению, реальные концентрации, как правило, выше потенциальных. Это означает, что в верхней части внутренних эстуариев процессы деструкции преобладают над продукцией, а в нижней части внутренних эстуариев и во внешних эстуариях продукция преобладает над деструкцией.

По разности между потенциальными и реально наблюдаемыми концентрациями фосфатов, с учётом того, что единичным объёмом речной воды по мере прохождения эстуария (сопровождающего увеличением объёма смеси речной и морской воды) продуцируется монотонно возрастающее количество органического вещества, вплоть до полной утилизации принесённых терригенных биогенов, для каждой съёмки рассчитаны кривые удельной урожайности единичного объёма речной воды, монотонно возрастающей вниз по течению (уравнение 2; рис. 5). Количество фосфатов, реминерализованных из единичного объёма речной воды, т.е. кумулятивный показатель деструкции, естественно, также монотонно возрастает вниз по течению (рис. 6). Свойство монотонности роста урожайности и кумулятивной деструкции в единичном объёме речной воды даёт возможность сделать раздельные оценки этих противоположно направленных процессов за счёт преобладания то одного, то другого из них на разных участках эстуариев, где обратным процессом пренебрегаем. Однако следует иметь в виду, что таким способом можно оценить только минимальные объёмы обоих процессов, и нельзя исключать, что даже на участке преобладания какого-нибудь процесса, например продукции, обратный процесс (деструкции) также может происходить: в таком случае реальная продукция на этом участке больше своей минимальной оценки на величину неучитываемой деструкции.

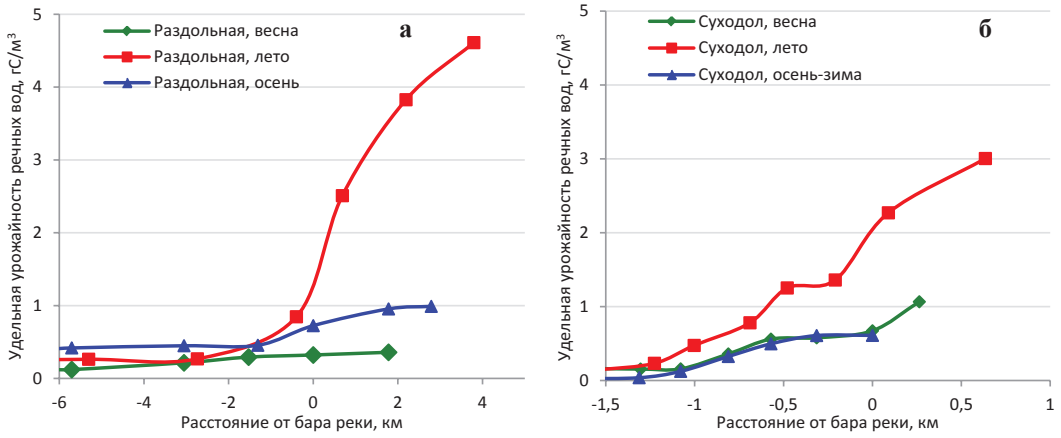

Рис. 5. Удельная урожайность речных вод рек Раздольная (**а**) и Суходол (**б**), осреднённая по сезонам

Fig. 5. Gross production (gC/m³) in river water from the Razdolnaya/Suifen (**а**) and Sukhodol (**б**) rivers, averaged by seasons

Летом удельная урожайность вод обеих рек существенно возрастает: каждый кубометр речной воды продуцирует 3,0–4,6 гС против лишь 0,3–1,0 гС весной и осенью. Для р. Раздольной рост летней урожайности очевидно связан с увеличением минерализации паводковых вод. В водах р. Суходол содержание биогенных элементов летом возрастает не столь сильно, но сравнительно малая концентрация терригенных биогенов

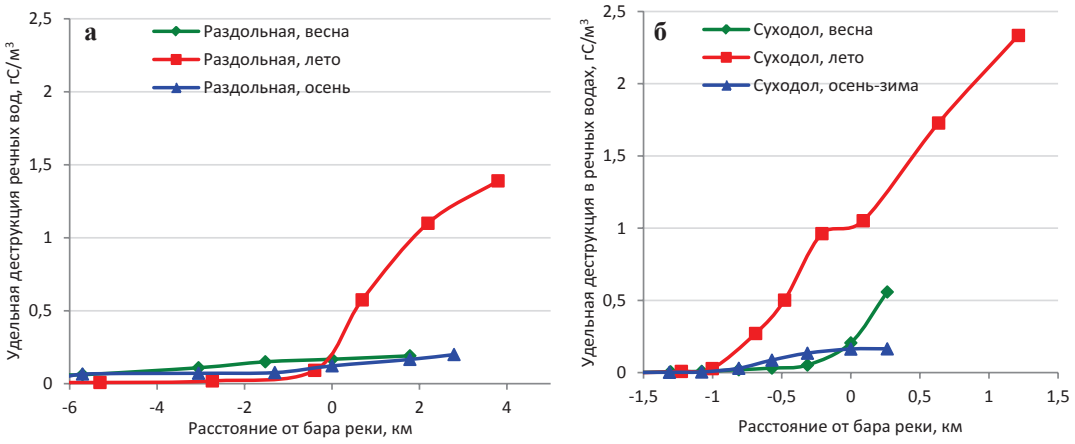

Рис. 6. Деструкция в единичном объёме речных вод рек Раздольная (**а**) и Суходол (**б**), осреднённая по сезонам

Fig. 6. Gross destruction (gC/m^3) of river water from the Razdolnaya/Suifen (**а**) and Sukhodol (**б**) rivers, averaged by seasons

в летний период компенсируется активным рециклингом, который в итоге обеспечивает более половины продукции (вклад рециклинга в продукцию вод р. Раздольной не превышает 20 %). Деструкционные процессы во внутреннем эстуарии р. Суходол летом настолько активны, что там формируется локальный максимум концентрации фосфатов. Осенью-зимой и продукционные, и деструкционные процессы ослабляются, но деструкционные — значительнее.

Расчёт первичной продукции

По удельной урожайности речных вод определена валовая продукция эстуарных вод (минимальная оценка), а после вычитания из неё аналогичного показателя для деструкции — «чистая» продукция эстуариев. Основной расчёт выполнен для удельной продукции и деструкции эстуарных вод на единицу протяжённости эстуария (уравнение 4), а для летнего сезона сделана также приближённая оценка первичной продукции эстуарных вод в единицу времени. Оценки годовых пиков валовой удельной продукции оказались сравнимыми для обеих рек: 0,7–1,0 гС/м^{3}км весной и осенью в р. Суходол и летом в р. Раздольной, с максимумом на границе между внутренним и внешним эстуарием (рис. 7). Но характер сезонных изменений продукции различается: в эстуарии р. Раздольной весной и осенью, когда воды этой реки бедны биогенами, максимум продукции намного ниже (до 0,2 гС/м^{3}км), чем летом, а в эстуарии р. Суходол, наоборот, летом максимум продукции снижается до 0,4 гС/м^{3}км. При среднем летнем расходе рек Раздольной и Суходол соответственно в 120 и 10 м^3/с и фактически наблюдаемых толщине и ширине потока речных вод полученные оценки соответствуют первичной продукции в 0,0–5,6 и 0,1–5,2 гС/м^{3}сутки в разных частях эстуариев этих рек (рис. 8). Порядок полученных величин первичной продукции совпадает с известными оценками продукции в эстуарии р. Раздольной (для р. Суходол такие оценки получены впервые), но максимальные расчётные величины продукции превышают полученные ранее — 1,3–2,2 гС/м^{3}сутки по оценке В.И. Звалинского, П.Я. Тищенко (2005). В литературе встречаются самые разные оценки первичной продукции в эстуариях различных типов, сделанные разными способами: от 0,5 до 6,0 гС/м^{3}сутки (Krasnik, Caperon, 1973; Sorokin, Sorokin, 1996; Kumari et al., 2002; Moigis, Gocke, 2003). Полученные нами результаты отражают эвтрофный характер экосистем эстуариев рек зал. Петра Великого.

Отметим, что распределение первичной продукции по градиенту солёности вдоль эстуариев обеих рек очень схоже — в обоих случаях максимум наблюдается при солёности 5–10 ‰, вблизи солёностного фронта, разделяющего слабосолёные воды внутреннего эстуария и солоноватые воды внешнего эстуария (шлейфа), с мористой стороны от него, т.е. в верхней

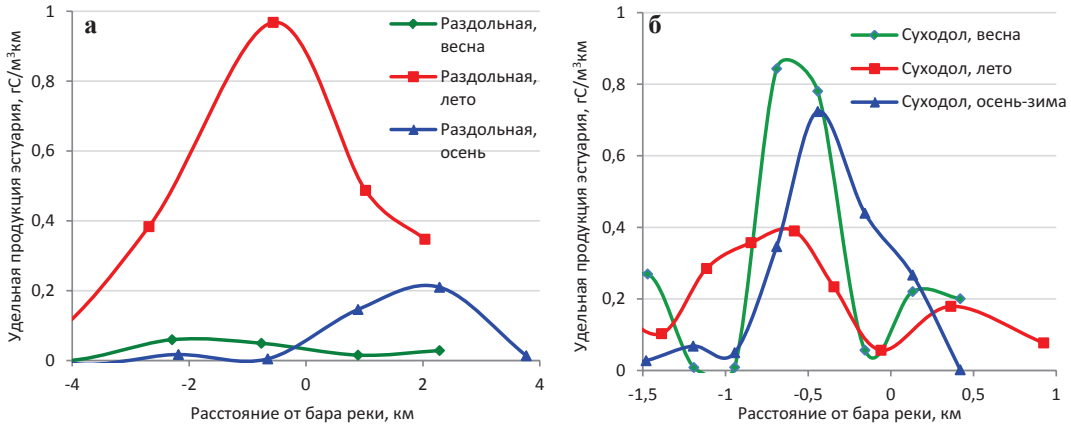

Рис. 7. Удельная продукция эстуариев рек Раздольная (**а**) и Суходол (**б**), осреднённая по сезонам

Fig. 7. Primary production (gC/m^{3}km) in the Razdolnaya/Suifen (**а**) and Sukhodol (**б**) estuaries, averaged by seasons

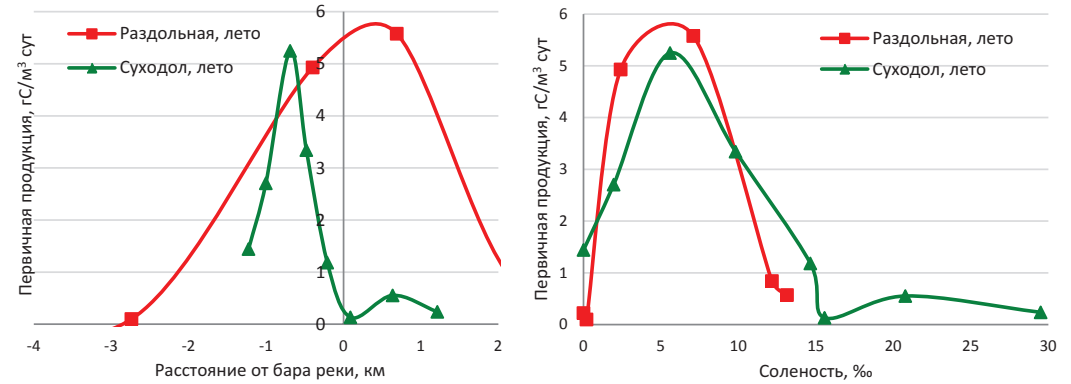

Рис. 8. Изменение средней за летний сезон первичной продукции вдоль основных русел эстуариев рек Раздольная и Суходол

Fig. 8. Изменение средней за летний сезон первичной продукции вдоль основных русел эстуариев рек Раздольная и Суходол

части внешнего эстуария. Однако положение участка максимальной продукции относительно речного бара, который считается географической границей между внутренней и внешней частями эстуария, существенно различно: в р. Раздольной максимальная величина рассчитанной первичной продукции располагается с морской стороны бара, а в р. Суходол — с его речной стороны. По-видимому, такое различие обусловлено гораздо большим стоком р. Раздольной, которая формирует обширный эстуарий, распространяющийся далеко в море, в то время как в эстуарии р. Суходол солёность возрастает очень быстро и гидрологическая граница между слабосолёными и солоноватыми водами смещена относительно бара в сторону реки, особенно летом, когда уровень моря повышается.

Аналогично определённый показатель удельной деструкции на единицу протяжённости эстуариев имеет максимум в верхних частях внутренних эстуариев, при этом в эстуарии р. Суходол удельная деструкция в 5 раз выше (рис. 9). Так, в летний период удельная деструкция во внутреннем эстуарии р. Раздольной не превышает 0,3 гС/м^{3}км, а в эстуарии р. Суходол достигает 1,4 гС/м^{3}км. Весной удельная деструкция в эстуариях обеих рек ничтожна — 0,1–0,2 гС/м^{3}км, так же мала она и в эстуарии р. Раздольной осенью, но во внутреннем эстуарии р. Суходол осенью она снижается не столь значительно — до 0,4 гС/м^{3}км.

«Чистая продукция» (т.е. продукция минус деструкция) вод р. Раздольной при прохождении эстуария меняется вслед за изменениями продукции, с максимумом в летний сезон до 1,0 гС/м^{3}км (3–5 гС/м^{3}сутки) в верхней части внешнего эстуария. На большей части эстуария р. Суходол летом деструкция превышает продукцию, т.е. чистая продукция

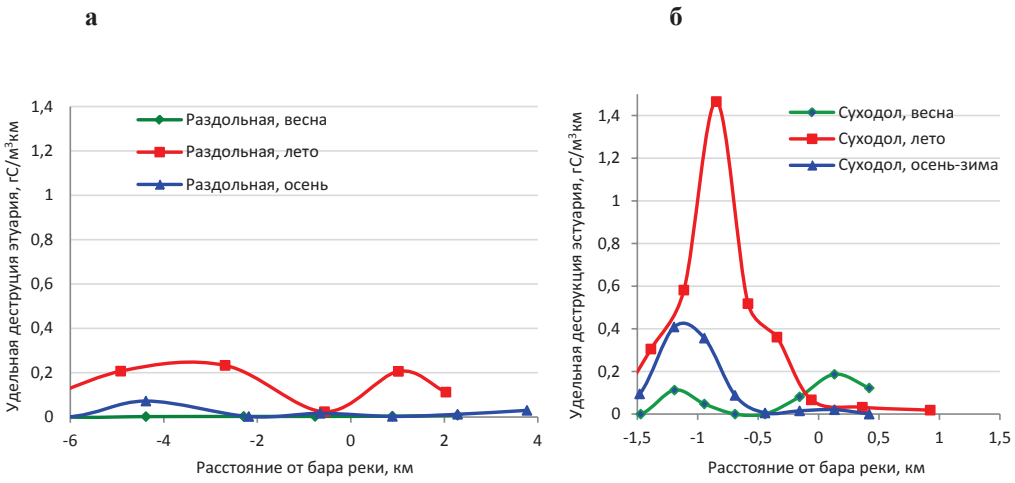

Рис. 9. Удельная деструкция эстуариев рек Раздольная (**а**) и Суходол (**б**), осреднённая по сезонам

Fig. 9. Destruction (gC/m^{3}km) in the Razdolnaya/Suifen (**а**) and Sukhodol (**б**) estuaries, averaged by seasons

отрицательна, и её положительные значения (не более 0,2 гС/м^{3}км) наблюдаются только в морской части. Весной и осенью значения чистой продукции в эстуарии р. Раздольной также положительны, с максимумом во внешнем эстуарии до 0,2 гС/м^{3}км, а в эстуарии р. Суходол деструкция превышает продукцию во внутреннем эстуарии, вблизи бара чистая продукция возрастает до 0,7–0,9 гС/м^{3}км, а в море снижается до 0,1–0,2 гС/м^{3}км, оставаясь положительной.

Заключение

Анализ результатов наблюдений выявил следующие общие черты продукционно-деструкционных процессов в двух исследованных эстуариях, относящихся к рекам, весьма различным по размерам и гидрологическому режиму:

— в верхних частях внутренних эстуариев обеих рек преобладают процессы деструкции органического вещества, а в нижних частях внутренних эстуариев и во внешних эстуариях — процессы продукции, т.е. эстуарии являются одновременно и «фабриками биогенов», и «фильтрами», не пропускающими биогенные элементы в море;

— по мере прохождения речных вод через эстуарии для продуцирования органического вещества используются вначале терригенные биогенные элементы, поступающие с речной водой, а затем продукты деструкции органического вещества, что обусловливает рост вклада рециклинга в продукцию в направлении от реки к морю, при этом валовая продукция эстуария существенно увеличивается;

— приближенные оценки первичной продукции в летний период сравнимы для обеих рек: для р. Раздольной — до 5,6 гС/м^{3}сутки, для р. Суходол — до 5,2 гС/м^{3}сутки.

Главная из полученных закономерностей — преобладание продукционных процессов вблизи баров и за барами, во внешнем эстуарии, — подтверждает результаты, полученные другими исследователями, рассматривавшими распределение биогенных элементов вдоль градиента солености в эстуариях (Boonphakdee, Fujiwara, 1998; Cabecadas et al., 1999). Однако в этом исследовании определены сезонные особенности продукционно-деструкционного баланса и уточнено положение высокопродуктивной зоны относительно структуры вод эстуариев. Важным новым результатом является также вывод, что продукционная способность эстуариев определяется не только потоком терригенных биогенов, поступающих с речным стоком, но и рециклингом органического вещества непосредственно в эстуариях.

При общем сходстве пространственных изменений продукционно-деструкционного баланса в эстуариях двух рек и величин первичной продукции выявлены особенности природы их высокой продуктивности. Продуктивность эстуария р. Раздольной, воды которой в летний период отличаются высокими концентрациями биогенных элементов, обеспечивается в основном утилизацией биогенов терригенного происхождения, причём

на всём его протяжении. В эстуарии р. Суходол, воды которой менее минерализованы, терригенные элементы быстро расходуются, а продукция обеспечивается в значительной степени (наполовину) за счёт рециклинга.

Список литературы

Важова А.С., Зуенко Ю.И. Особенности распределения биогенных элементов вдоль градиента солености в эстуариях рек Суходол и Раздольная (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 180. — С. 226–235.

Ефимова Л.Е., Цыцарин А.Г. Пространственно-временное распределение биогенных элементов в зоне смешения речных и морских вод Двинского залива Белого моря (на примере устьевой области Северной Двины и верхней части залива) // Тр. ГОИН. — 2002. — Вып. 208. — С. 217–225.

Звалинский В.И., Недашковский А.П., Сагалаев С.Г. и др. Биогенные элементы и первичная продукция эстуария реки Раздольной // Биол. моря. — 2005. — Т. 31, № 2. — С. 107–116.

Звалинский В.И., Тищенко П.Я. Биогенные элементы в эстуариях. Поведение и биохимия // Состояние морских экосистем, находящихся под влиянием речного стока. — Владивосток : Дальнаука, 2005. — С. 89–124.

Зуенко Ю.И. Промысловая океанология Японского моря : моногр. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2008. — 227 с.

Лапин С.А. Гидрохимическая структура вод Обской губы и оценка ее биопродуктивности // Вопр. промысл. океанол. — 2011. — Вып. 8, № 1. — С. 83–100.

Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанол. — 1994. — Т. 34, № 5. — С. 735–747.

Мамаев О.И. Термохалинный анализ вод Мирового океана : моногр. — Л. : Гидрометеоиздат, 1987. — 296 с.

Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / под ред. В.В. Сапожникова. — М. : ВНИРО, 2003. — 202 с.

Савельева Н.И., Аникиев В.В., Дударев О.В. Изменчивость стратификации вод в северной части Амурского залива Японского моря в летний период // Состояние морских экосистем, находящихся под влиянием речного стока. — Владивосток : Дальнаука, 2005. — С. 41–52.

Савенко В.С., Савенко А.В. Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле : моногр. — М. : ГЕОС, 2007. — 248 с.

Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х.Р. Умирающие озера : моногр. — Л. : Гидрометеоиздат, 1990. — 280 с.

Boonphakdee T., Fujiwara T. Temporal variability of nutrient budgets in a tropical river estuary: the Bangpakong River estuary, Thailand // Environment Asia. — 2008. — Vol. 1. — P. 7–21.

Budaeva V.D., Zuenko Y.I., Makarov V.G. Water structure and dynamics in Peter the Great Bay in conditions of strong summer desalination (2008–2009) // Pacific Oceanography. — 2013. — Vol. 6, № 1. — P. 10–17.

Cabecadas G., Nogueira M., Brogueira M.J. Nutrient dynamics and productivity in three European estuaries // Mar. Poll. Bull. — 1999. — Vol. 38, I. 12. — P. 1092–1096.

Eyre B.D., **Balls Ph.W.** A comparative study of nutrient processes along the salinity gradient of tropical and temperate estuaries // Estuaries and Coasts. — 1999. — Vol. 22, № 2. — P. 313–326.

Gordon D.C., Boudreau P.R., Mann P.R. et al. LOICZ Biogeochemical Modeling Guideline : LOICZ Reports & Studies. — 1996. — № 5, Second Edition. — 96 p.

Krasnick G., Caperon J. Primary productivity in a nutrient-limited tropical estuary // Pacific Science. — 1973. — Vol. 27, № 2. — P. 189–196.

Kumari K.L., Bhattathiri P.M.A., Matondkar S.G.P., John J. Primary productivity in Mandovi-Zueri estuaries in Goa // J. Marine Biology Assoc. India. — 2002. — Vol. 44. — P. 1–13.

Moigis A.G., Gocke K. Primary production of phytoplankton estimated by means of the dilution method in coastal waters // J. Plankton Res. — 2003. — Vol. 25, № 10. — P. 1291–1300.

Sarma V.V.S.S., Prasad V.R., Kumar B.S.K. et al. Intra-annual variability in nutrients in the Godavari estuary, India // Continental Shelf Research. — 2010. — Vol. 30, Iss. 19. — P. 2005–2014.

Sorokin Yu.I., Sorokin P.Yu. Plankton and primary production in the Lena River estuary and in the southeastern Laptev Sea // Estuarine, Coastal, and Shelf Science. — 1996. — Vol. 43, Iss. 4. — P. 399–418.

Statham P.J. Nutrients in estuaries — an overview and the potential impacts of climate change // Science of the total environment. — 2012. — Vol. 434. — P. 213–227.

Süzal A., Bizsel N., Bizsel K.C., Hüsrevoğlu Y.S. Dissolved nutrient behavior along the estuarine salinity gradient at the Gediz river mouth (Aegean Sea, Turkey) // Turkish Journ. of Engineering and Environmental Sciences. — 2008. — Vol. 32. — P. 67–84.

Поступила в редакцию 27.02.15 г.