

Научная статья

УДК 551.464.618(265.53)

DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-917-932

EDN: IZYFHO

**ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПРОДУКЦИОННО-ДЕСТРУКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ФОСФАТОВ В ЭСТУАРИЯХ РЕК УДА И УСАЛГИН  
(ОХОТСКОЕ МОРЕ)****А.С. Курносова<sup>1</sup>, Ю.И. Зуенко<sup>1</sup>, М.Г. Швецова<sup>2\*</sup>**<sup>1</sup> Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),  
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4;<sup>2</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

**Аннотация.** По данным гидрохимических наблюдений, выполненных экспедицией Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН в июле 2016 г., определена локализация зон преобладания продукции и деструкции органического вещества в эстуариях рек Уда и Усалгин (Охотское море) по признаку неконсервативных изменений концентрации фосфатов. На протяжении зон смешения вод обеих рек с морскими водами отмечена смена знака продукционно-деструкционного баланса: от преобладания деструкции во внутренних эстуариях к преобладанию продукции в верхних частях внешних эстуариев. При этом для продуцирования большей части органического вещества в обоих эстуариях использован не речной ионный сток, а реминерализованный в эстуариях фосфор. Более интенсивный рециклинг отмечен в эстуарии р. Усалгин, дренирующей болотистую местность.

**Ключевые слова:** эстуарий, фосфаты, неконсервативное смешение, продукционно-деструкционный баланс

**Для цитирования:** Курносова А.С., Зуенко Ю.И., Швецова М.Г. Локализация продукционно-деструкционных процессов по распределению фосфатов в эстуариях рек Уда и Усалгин (Охотское море) // Изв. ТИНРО. — 2022. — Т. 202, вып. 4. — С. 917–932. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-917-932. EDN: IZYFHO.

Original article

**Localization of production-destruction processes by distribution of phosphate  
in the estuaries of Uda and Usalgin Rivers (Okhotsk Sea)****Anna S. Kurnosova\*, Yury I. Zuenko\*\*, Maria G. Shvetsova\*\*\***

\*, \*\* Pacific branch of VNIRO (TINRO), 4, Shevchenko Alley, Vladivostok, 690091, Russia

\*\*\* Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

\* leading specialist, anna.vazhova@gmail.com, ORCID 0000-0002-4026-9456

\*\* D.Geogr., head of laboratory, zuenko\_yury@hotmail.com, ORCID 0000-0003-1312-542X

\*\*\* researcher, chippers@rambler.ru, ORCID 0000-0002-6415-0329

\* Курносова Анна Сергеевна, ведущий специалист, anna.vazhova@gmail.com, ORCID 0000-0002-4026-9456; Зуенко Юрий Иванович, доктор географических наук, заведующий лабораторией, zuenko\_yury@hotmail.com, ORCID 0000-0003-1312-542X; Швецова Мария Геннадиевна, научный сотрудник, chippers@rambler.ru, ORCID 0000-0002-6415-0329.

© Курносова А.С., Зуенко Ю.И., Швецова М.Г., 2022

**Abstract.** The areas with prevalence of either production or decomposition of organic matter are localized in the estuaries of Uda and Usalgin Rivers (western coast of the Okhotsk Sea) on the data of chemical survey conducted in conditions of summer flood in July, 2016, interpreting patterns of non-conservative variations of inorganic phosphorus concentration (deflections of observed values from potential values determined by the river water mixing with the seawater). Sign of production-destruction balance changed along both surveyed estuaries: the organic matter decomposition prevailed in the internal estuaries but its production prevailed in the upper part of the external estuaries. Another common feature of both estuaries was active recycling: the larger portion of organics was produced with utilizing the phosphorus mineralized within the estuaries, but not the terrestrial phosphorus provided by the rivers ionic discharge. Extremely intensive recycling was observed in the Usalgin estuary that drained swampy lands.

**Keywords:** estuary, phosphate, non-conservative mixing, production-destruction balance

**For citation:** Kurnosova A.S., Zuenko Yu.I., Shvetsova M.G. Localization of production-destruction processes by distribution of phosphate in the estuaries of Uda and Usalgin Rivers (Okhotsk Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 4, pp. 917–932. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-917-932. EDN: IZYFHO.

## Введение

В ходе продукционно-деструкционных процессов в экосистемах синтезируется либо разлагается органическое вещество, выделяется либо потребляется кислород, обеспечиваются потребности живых организмов в обмене веществ. Интенсивность и баланс продукционно-деструкционных процессов оцениваются по косвенным показателям: по количеству хлорофилла или углерода в составе органического вещества [Lee et al., 1996; Marra et al., 2007], по динамике (росту или убыванию) содержания растворенного кислорода [Винберг, 1960], по отношению валовой первичной продукции к суммарной деструкции планктона, по изменениям связанных с ними компонент в экосистемных моделях [Дмитриев и др., 2019], а также гидрохимическим методом — по балансу биогенных веществ в эстуарных водах [Леонов, Стыгар, 2001; Звалинский и др., 2005; Важова, Зуенко, 2015]. Гидрохимический подход основывается на допущении, что соотношение потребляемых сообществом фитопланктона биогенных веществ и связываемого в процессе продуцирования углерода существенно не меняется и соответствует стехиометрическому соотношению [Redfield et al., 1963].

Для понимания закономерностей функционирования эстуарных экосистем важно оценивать: какие процессы преобладают в экосистеме на конкретном участке эстуария — синтез или разложение органического вещества? В зависимости от этого выстраивается вся биологическая надстройка экосистемы: в ее нижних звеньях преобладают либо фитофаги, либо детритофаги. Ранее такие исследования проведены для эстуариев рек южного Приморья, где выявлена значительная пространственная разобщенность зон с разными знаками продукционно-деструкционного баланса, а именно: во внутренних частях эстуариев преобладают деструкционные, а во внешних — продукционные процессы [Важова, Зуенко, 2015; Важова, 2019]. Для рек, находящихся в иных климатических и океанологических условиях, подобные работы не проводились. Реки Уда и Усальгин, впадающие в западную часть Охотского моря, находятся в области сурового климата с отрицательной среднегодовой температурой воздуха. Река Уда дренирует горную таежную местность, площадь водосбора 61 300 км<sup>2</sup>, среднегодовой расход воды 510 м<sup>3</sup>/с. Долина р. Усальгин — это в основном заболоченная местность, площадь водосбора 2420 км<sup>2</sup>, расчетный среднегодовой расход — около 15 м<sup>3</sup>/с [Ресурсы..., 1970]. Водный режим этих рек в основном определяется количеством атмосферных осадков. Важнейшей особенностью эстуариев обеих рек являются сильные приливы, высота которых достигает 6 м\*. Эстуарий р. Усальгин отличается тем, что полностью занимает куттовую часть длинного и узкого зал. Николая, в то время как р. Уда впадает в море на открытом участке побережья обширного Удского залива.

\* Луция Охотского моря (№ 1406). Вып. 1. Южная часть моря. СПб.: ГУНиО, 1998. 390 с.

Целью данной работы является определение особенностей локализации зон преобладания продукции и деструкции органического вещества в эстуариях рек, находящихся в своеобразных климатических и океанологических условиях, на основе анализа изменений концентрации минерального фосфора по градиенту солености, на примере рек Уда и Усалгин, впадающих в западную часть Охотского моря.

### Материалы и методы

Материалом для расчетов продукционно-деструкционного баланса послужили данные о температуре, солености и концентрации неорганического фосфора в поверхностном слое эстуариев (в котором распространяются и разбавляются речные воды), полученные в экспедиции Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН на НИС «Профессор Гагаринский» в район Шантарского архипелага в июле 2016 г. В ходе экспедиции с использованием маломерных плавсредств в эстуариях рек Уда и Усалгин были выполнены съемки, охватывающие нижнее течение рек и обширную зону смешения речных и морских вод, распространявшуюся далеко в море, поскольку съемки проводились в период летнего паводка (рис. 1). Результаты экспедиции подробно представлены в сообщениях ее участников [Тищенко и др., 2018; Семкин и др., 2020a].

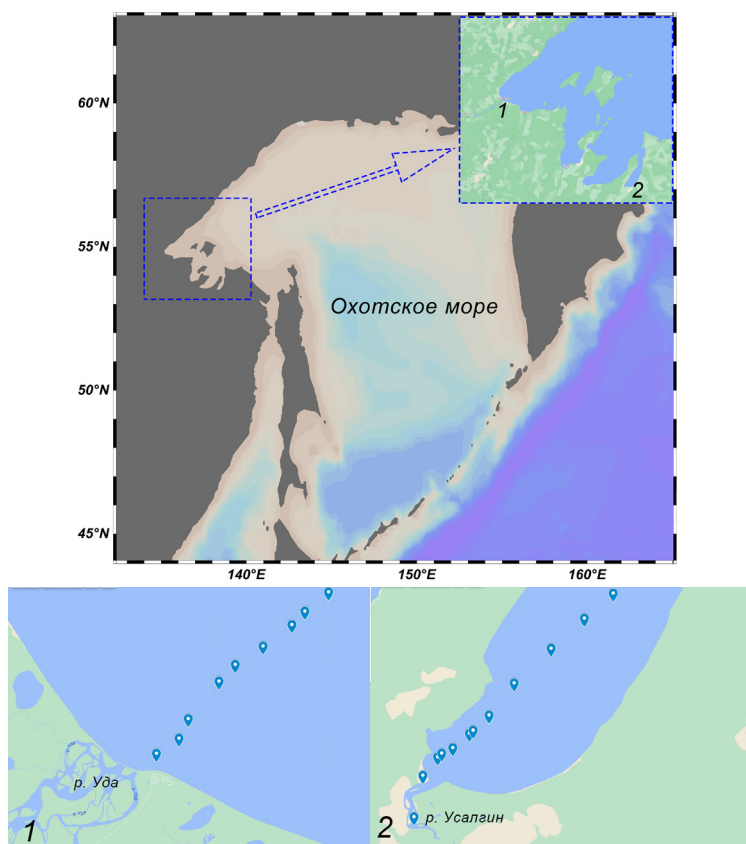


Рис. 1. Схемы исследованных акваторий: 1 — р. Уда; 2 — р. Усалгин. Обозначены станции, данные которых использованы для расчета продукционно-деструкционного баланса

Fig. 1. Schemes of the surveyed estuaries (1 — Uda River, 2 — Usalgin River). The stations are marked which data are used for calculation of the production-destruction balance

Фосфор входит в состав продуцируемого растениями органического вещества и потому является непрямым участником продукционно-деструкционных процессов, более того, в зоне смешения речных и морских вод продукция органического вещества обычно лимитируется наличием растворенных в воде минеральных соединений

фосфора [Doering et al., 1995]. В процессе фотосинтеза фосфор дигидро- и гидрофосфатов связывается в органических соединениях, при этом наиболее предпочтительной формой для фитопланктона являются ортофосфаты [Correll et al., 1975]. В процессе деструкции органического вещества фосфор вновь минерализуется с образованием фосфатов. Строго говоря, определить истинную скорость оборота фосфора посредством прямых измерений изменений во времени концентрации какой-либо из его форм невозможно, так как эти концентрации являются результатом одновременного протекания прямой и обратной реакций [Рыжаков, Степанова, 2016], однако можно определить, какая из них преобладает. Для расчета продукционно-деструкционного баланса использована методика, основанная на анализе неконсервативных изменений концентрации неорганического фосфора (преимущественно в составе растворимых ортофосфатов) в зоне смешения речных и морских вод [Liss, 1976; Михайлов, 1997; Звалинский и др., 2005; Гордеев, 2012], усовершенствованная авторами настоящей статьи ранее [Важова, Зуенко, 2015] с учетом возможного влияния на концентрацию фосфора в эстуариях водообмена с богатыми биогенными элементами подповерхностными морскими водами [Howarth et al., 2021]. Суть метода состоит в расчете отклонений фактически наблюдаемых концентраций фосфора от «потенциальных» значений концентрации этого биогенного элемента, обусловленных только разбавлением речных вод. В случае консервативного поведения растворенных в речной воде фосфатов изменение его концентрации (потенциальной концентрации) в эстуарии по направлению градиента солености должно происходить пропорционально росту солености, и зависимость концентрации фосфора от солености имеет вид линейной функции. Превышение на каком-либо участке эстуария фактических концентраций фосфора над его потенциальной концентрацией интерпретировано как результат преобладания процесса деструкции органики, а недостаток фосфора относительно потенциальных значений — как результат преобладания процесса продукции. По этим отклонениям можно оценить значение продукционно-деструкционного баланса, а если пренебречь деструкцией на участках преобладания продукции и продукцией на участках преобладания деструкции — то и получить минимальные оценки величин продукции и деструкции. Если же в эстуарии смешиваются три водные массы (речная вода, поверхностная и подповерхностная морские водные массы), то предварительно с применением TS-анализа [Мамаев, 1987] для каждой станции по температуре и солености оценивали вклад каждой водной массы в смесь и, соответственно, в величину потенциальной концентрации фосфора и для анализа использовали значения потенциальной концентрации с вычетом вклада подповерхностных морских вод. Такой подход позволяет аналитически сделать систему замкнутой для дальнейших расчетов. В частности, такая поправка имеет значения для внешней периферии эстуария, где поступление фосфора с глубины может значительно превышать потенциальную концентрацию; неучет этого процесса приводит к завышению величины продукции во внешнем эстуарии. Концентрацию фосфора в ядрах водных масс определяли по экстремальным измеренным значениям, TS-индексы ядер водных масс — «графическим» методом по треугольникам смешения, поскольку доли водных масс в смеси на каждой станции обратно пропорциональны евклидову расстоянию в TS-координатах от точки, соответствующей температуре и солености на станции, до углов треугольника смешения, соответствующих ядрам трех водных масс.

В случае преобладания продукции по разностям фактических и потенциальных концентраций фосфора для каждой станции ( $i$ ) с использованием соотношения Редфилда  $C : P = 106 : 1$  [Redfield et al., 1963] определялась масса органического вещества, которая образовалась в результате утилизации этого количества фосфора (удельная урожайность):

$$b_i = R(C_{i\_potential} - C_i) \text{ [гC/м}^3\text{]}, \quad (1)$$

где  $b_i$  — удельная урожайность;  $R$  — соотношение Редфилда;  $C_i$  — фактическая концентрация фосфора на станции  $i$ ;  $C_{i\_potential}$  — потенциальная концентрация фосфора на станции  $i$ .

Далее оценивался урожай органического вещества, продуцированного из единичного объема речной воды к моменту достижения им станции  $i$ , с учетом разбавления речной воды в эстуарии:

$$Y_i = b_i / \mu_i \text{ [гС/м}^3 \text{ речной воды]}, \quad (2)$$

где  $Y_i$  — урожай органического вещества с кубометра речной воды;  $b_i$  — удельная урожайность;  $\mu_i$  — доля речной воды в эстуарной воде.

Величина  $Y$  по определению может только возрастать вниз по течению реки, поскольку этот урожай продуцируется из фиксированного единичного начального объема речной воды. Рост урожая с единичного объема речной воды (например, с  $1 \text{ м}^3$ ) так же необратим, как необратимо разбавление речной воды по мере ее прохождения через эстуарий. Поэтому случаи локального роста концентрации фосфатов в этом объеме при перемещении его вниз по течению, когда формальный расчет дает «отрицательную продукцию», интерпретированы как преобладание деструкции. На таких участках удельную урожайность  $b$  обнуляли путем добавления в уравнении (1) к наблюдаемой концентрации  $C_i$  величины  $C_{i\text{-recycling}}$ , обусловленной деструкцией. Соответственно, на таких участках, где преобладала деструкция, вместо величины удельной урожайности определяли величину удельной деструкции:

$$\begin{aligned} b_i = 0 &= R (C_{i\text{potential}} + C_{i\text{-recycling}} - C_i), \\ d_i &= R C_{i\text{-recycling}} \text{ [гС/м}^3 \text{]}. \end{aligned} \quad (3)$$

Суммарная величина деструкции органического вещества из единичного объема речной воды к моменту достижения им станции  $i$  с учетом разбавления может быть определена аналогично определению урожая органического вещества из единичного объема речной воды по уравнению (2).

Основным показателем первичной продукции в данной работе является удельная продукция эстуария на единицу его протяженности:

$$p = \frac{Y_i - Y_{i-1}}{L_i - L_{i-1}} \mu_i \text{ [гС/м}^3 \text{км]}, \quad (4)$$

где  $p$  — удельная продукция;  $L_i - L_{i-1}$  — расстояние между станцией  $i$  и расположенной выше по течению станцией  $i-1$ ;  $Y_i$  — урожай органического вещества с кубометра речной воды до станции  $i$ ;  $Y_{i-1}$  — урожай органического вещества с кубометра речной воды до станции  $i-1$ ;  $\mu_i$  — доля речной воды на станции  $i$ .

Необходимым условием для такого расчета является монотонное убывание доли речной воды при движении вниз по течению, т.е. увеличение солености от реки к морю. Если известна скорость прохождения водой эстуария, этот показатель продукции может быть пересчитан в размерность гС/м<sup>3</sup>сут, однако для эстуариев рек Уда и Усалигин скорость течения неизвестна.

По вышеописанной методике оцениваются величины продукции, основанной на утилизации как терригенных фосфатов, принесенных в эстуарий речной водой, так и минерализованных в эстуарии фосфатов (фосфаты рециклинга). Предполагается, что в зону эстуария органическое вещество поставляется только с речным стоком, в отличие от фосфатов, которые поставляются также из глубинных морских вод — этот поток учитывается при расчете потенциальных концентраций и из расчета продукции речных вод исключен. Однако при нашем расчете не учитывается возможность неоднократного рециклинга за время прохождения речной водой эстуария, из-за чего оценки деструкции и «продукции рециклинга» могут быть завышенными, особенно для мористой периферии эстуария. Завышение оценки продукции рециклинга может происходить также, если часть минерализующегося в эстуарии органического вещества ранее была синтезирована на основе нетерригенных (глубинных морских) фосфатов.



## Результаты и их обсуждение

**Распределение солёности.** На обоих разрезах вдоль эстуариев при переходе от реки к морю солёность на поверхности быстро увеличивалась до значений  $\sim 25\text{‰}$ , которые в эстуарии р. Усалгин наблюдались в 30–40 км от бара реки, а в эстуарии более крупной р. Уда — в 60–70 км от бара (рис. 2). При дальнейшем удалении от берега значения солёности продолжали возрастать, но медленнее и, по-видимому, вне зависимости от влияния этих конкретных рек, поэтому районы исследования в данной работе условно ограничены изохалиной  $25\text{‰}$ .

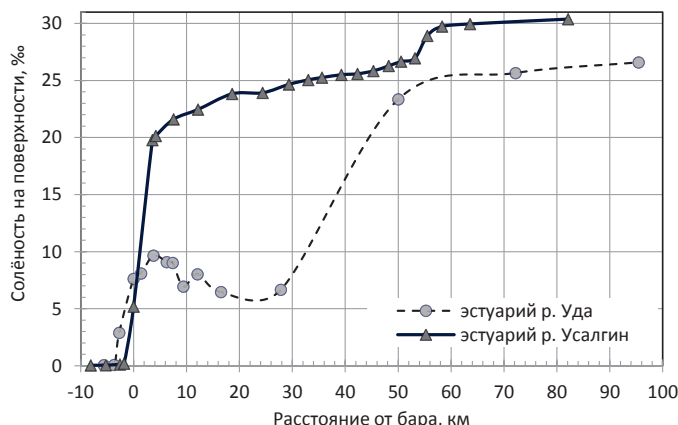


Рис. 2. Изменения солёности от реки к морю на поверхности эстуариев рек Уда и Усалгин

Fig. 2. Change of salinity from the rivers to the open sea at the surface of the Uda and Usalgin estuaries

На разрезе р. Усалгин — зал. Николая в эти пределы вошли 13 станций, расположенных на участке протяженностью 41 км (8 км по реке и 33 км по морю), а на разрезе р. Уда — Удская губа — 14 станций, расположенных на участке протяженностью 77 км (5 км по реке и 72 км по морю). При этом на карте расположения станций (см. рис. 1) в районе исследований видно, что так называемые речные станции расположены и за пределами устья р. Уда (в кутовой части Удской губы), и за пределами устьевового створа р. Усалгин (в кутовой части зал. Николая). Так, на дистанции 10–30 км от устья р. Уды наблюдалась обширная область с очень низкой солёностью ( $6,6\text{--}8,0\text{‰}$ ) и относительно высокими концентрациями биогенных элементов (фосфаты до  $0,3\text{ мкг/л}$ ). В условиях высокого расхода рек почти вся толща воды выше бара в обеих реках была занята пресной речной водой, а типичная для внутренних эстуариев стратификация с солоноватым клином у дна наблюдалась лишь с мористой стороны от бара (рис. 3). Внешний эстуарий р. Усалгин отличался слабой стратификацией вод, очевидно, вследствие сильного приливного перемешивания.

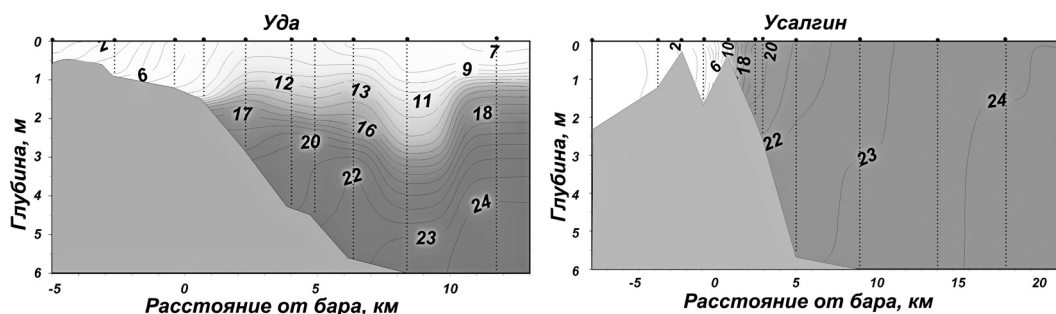


Рис. 3. Распределение солёности (‰) на разрезах вдоль эстуариев рек Уда и Усалгин.

Выделены зоны внутреннего эстуария

Fig. 3. Salinity (‰) at the sections along the Uda and Usalgin estuaries

**Реальные и потенциальные концентрации фосфора.** По результатам TS-анализа, в эстуариях рек Уда и Усалгин вклад речных вод в смешанной эстуарной воде убывал при перемещении от реки к морю от 100 практически до 0 %, а вклад подповерхностных морских вод возрастал соответственно изменению доли этих водных масс в смеси (рис. 4). В эстуарии р. Усалгин доля речных вод на поверхности стремилась к нулевым значениям на расстоянии 8 км от бара, а в эстуарии р. Уда — в 45–50 км от бара реки.

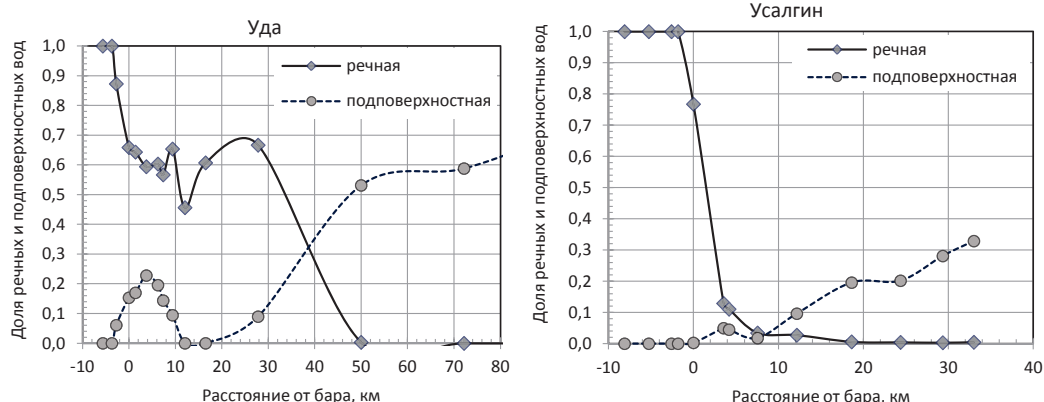


Рис. 4. Изменение от реки к морю доли речных и подповерхностных морских вод в смешанной эстуарной воде на поверхности эстуариев рек Уда и Усалгин

Fig. 4. Portions of the river freshwater and subsurface seawater in the mixed estuarine water at the surface of the Uda and Usalginsk estuaries, from the rivers to the open sea

Потенциальные концентрации фосфора в эстуариях, обусловленные только разбавлением речной воды морскими водами, были определены исходя из соотношения водных масс в смеси и следующих предполагаемых концентраций фосфора в ядрах этих водных масс:

$$\begin{aligned} C_{\text{р-Усалгин}} &= 1,6 \text{ мкМ/л}, C_{\text{р-Уда}} = 1,1 \text{ мкМ/л}, \\ C_{\text{р-подповерх. зал. Николая}} &= 1,6 \text{ мкМ/л}, C_{\text{р-подповерх. Удская губа}} = 0,6 \text{ мкМ/л}. \end{aligned}$$

Концентрация фосфора в ядре поверхностной морской водной массы принята нулевой, так как летом в этой водной массе происходит потребление, а не минерализация биогенных элементов.

Фактически во внутренних частях эстуариев рек Усалгин и Уда концентрации фосфора растут вниз по течению (рис. 5, 6), причем очень резко, возрастая на коротком участке нижнего течения рек протяженностью несколько километров более чем

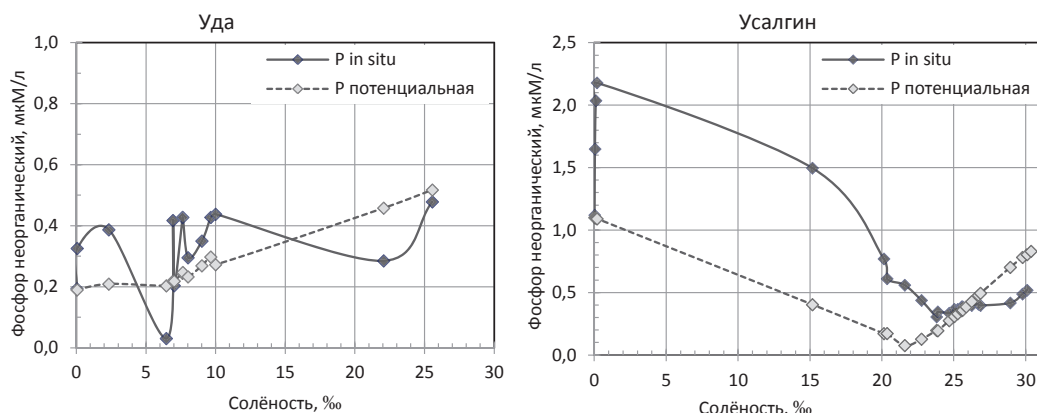


Рис. 5. Изменение от реки к морю потенциальных и реальных концентраций фосфора на поверхности эстуариев рек Уда и Усалгин по градиенту солёности

Fig. 5. Potential and factual concentration of phosphorus at the surface of the Uda and Usalginsk estuaries, by salinity gradient from the rivers to the open sea

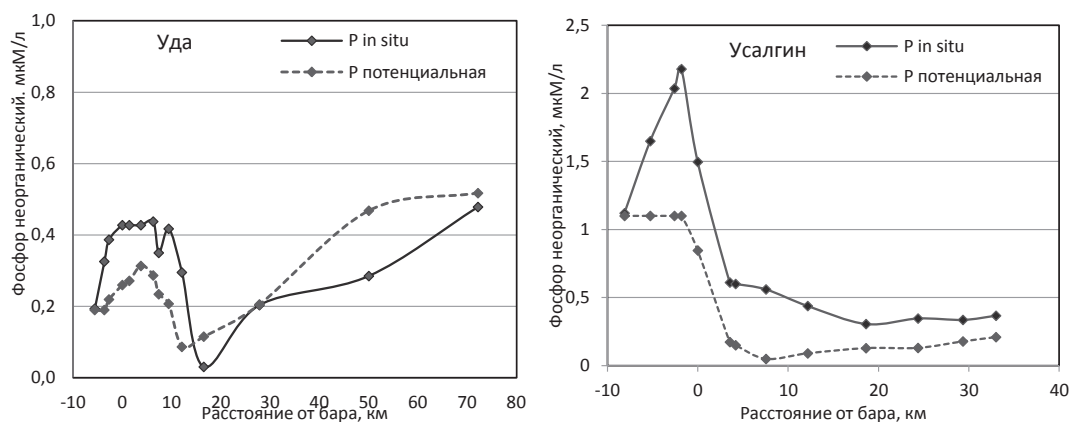


Рис. 6. Изменение от реки к морю потенциальных и реальных концентраций фосфора на поверхности эстуариев рек Уда и Усалгин, по протяженности разрезов

Fig. 6. Potential and factual concentration of phosphorus at the surface of the Uda and Usalgin estuaries, by distance along the transects from the rivers to the open sea

вдвое (соответственно от 1,0 до 2,2 и от 0,2 до 0,4 мкМ/л), что указывает на активные процессы деструкции органического вещества. Во внешних частях обоих эстуариев концентрации фосфора в целом снижаются (соответственно от 0,6 до 0,3 и от 0,4 мкМ/л практически до нуля) и постепенно приближаются к потенциальным значениям, что является признаком преобладания продукционных процессов. Однако в обоих эстуариях отмечена еще одна зона преобладания деструкции, когда фактическая концентрация фосфора вновь немного возрастает относительно потенциальных значений — она находится на внешней периферии эстуариев при солёности 20–25 ‰.

**Локализация продукции и деструкции в эстуариях.** По мере прохождения речной водой эстуария содержащиеся в ней терригенные фосфаты используются для фотосинтеза, соответственно, возрастает урожай органического вещества с 1 м<sup>3</sup> речной воды (рис. 7). Участки преобладания продукции с резким ростом урожая в эстуарии р. Усалгин локализуются в районе бара (где урожай возрастает от 0,0 до 0,3 гС), в 8–12 км мористее бара (от 0,3 до 2,7 гС) и на внешней кромке эстуария, примерно в 30 км от бара (до 4,2 гС). В эстуарии р. Уда для расчета урожая речных вод использованы только данные, полученные в один день (для избежания искажений, связанных с приливной адвекцией); согласно этим данным, ограниченной приустьевой областью, зона роста урожая органического вещества была локализована в 6–8 км от бара, где урожай увеличился до 0,3 гС.

Поскольку на протяжении эстуария р. Усалгин доля речной воды в смешанной эстуарной воде последовательно уменьшалась, урожай и суммарная деструкция органического вещества с 1 м<sup>3</sup> речной воды возрастали монотонно, есть возможность оценить скорость продукции и деструкции на единицу протяженности эстуария (рис. 8). На графике этих показателей, помимо упомянутой основной зоны продукции во внешнем эстуарии, хорошо виден еще и небольшой участок преобладания продукции (до +0,12 гС/м<sup>3</sup>км) в районе бара, а также обширные зоны деструкции, занимающие как большую часть внутреннего эстуария (до бара и сразу после бара), так и часть внешнего эстуария, при этом в районе бара скорость деструкции достигает 0,23 гС/м<sup>3</sup>км, а в 8–12 км от бара — 0,17 гС/м<sup>3</sup>км. На том небольшом участке эстуария р. Уда, где данные были получены в один день, что обеспечило последовательное увеличение солёности на поверхности эстуария, во внутреннем эстуарии наблюдалось преобладание деструкции (до –0,09 гС/м<sup>3</sup>км), а во внешнем эстуарии преобладала продукция (до +0,03 гС/м<sup>3</sup>км) (рис. 9). Удельные величины и деструкции, и продукции в эстуарии р. Уда значительно ниже, чем в эстуарии р. Усалгин.



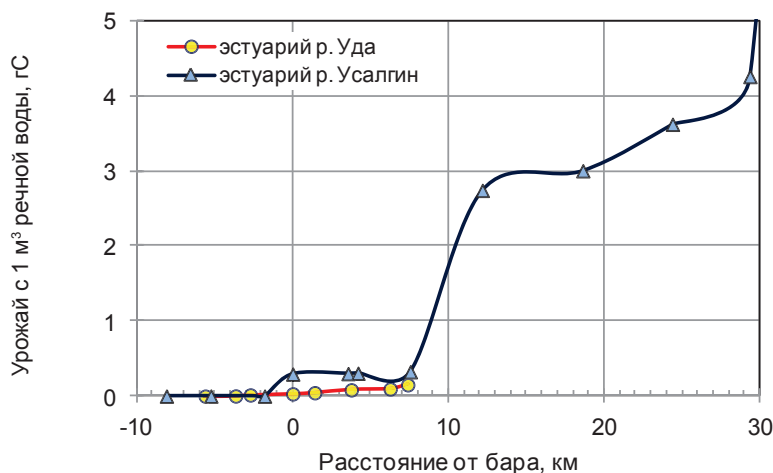


Рис. 7. Накопление урожая органического вещества с 1 м³ воды рек Уда и Усалин на разрезах вдоль оси их эстуариев (расчет произведен только для части эстуария р. Уда, где процесс разбавления речной воды не искажен приливной адвекцией)

Fig. 7. Accumulation of organic matter yielded from 1 m³ of the Uda and Usalgin Rivers freshwater on the sections along their estuaries (the yield is calculated for a part of the Uda estuary where the freshwater mixing with the seawater is not distorted by tidal advection)

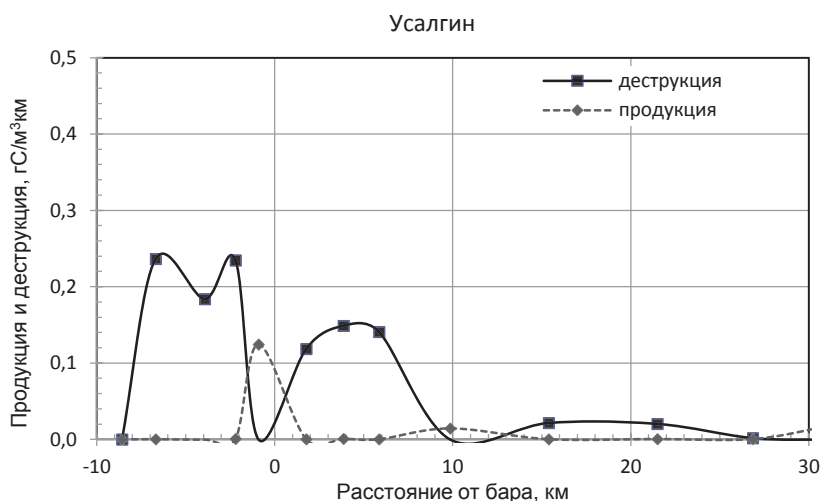


Рис. 8. Минимальные оценки удельной продукции и деструкции (по фосфору) эстуарных вод при прохождении ими 1 км вдоль оси эстуария р. Усалин

Fig. 8. The minimal estimations of net production and degradation of organic matter in the estuarine water (recalculated from phosphorous units) per 1 km of the water track along the Usalgin estuary

В реках южного Приморья, где продукционно-деструкционный баланс исследовался ранее [Важова, Зуенко, 2015], зона внутреннего эстуария хорошо выражена по наличию у дна реки клина солоноватых вод, а внешний эстуарий отделяется от прибрежных морских вод поверхностным эстуарным фронтом. В макроприливных эстуариях рек Уда и Усалин воды либо полностью перемешаны от поверхности до дна, либо наблюдается лишь слабая стратификация, а распределение термохалинных и гидрохимических показателей в мористой части очень подвижно под действием приливной адвекции (см. рис. 3). К тому же в период съемки на реках наблюдался паводок, оценки расходов рек (4390 м³/с для р. Уды и 173 м³/с для р. Усалин) значительно превышали их среднегоголетние расходы в июле — соответственно 1600 и 41 м³/с [Семкин и др., 2020б]. Поэтому структура вод в исследованных эстуариях существенно отличалась от структуры вод, известной для эстуариев рек южного Приморья. Так, судя

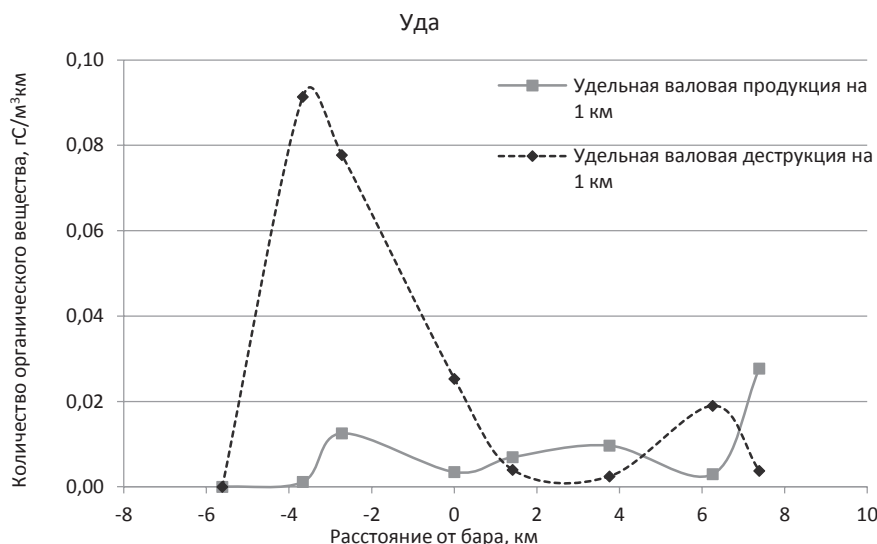


Рис. 9. Минимальные оценки удельной продукции и деструкции (по фосфору) эстуарных вод при прохождении ими 1 км вдоль оси эстуария р. Уда

Fig. 9. The minimal estimations of net production and degradation of organic matter in the estuarine water (recalculated from phosphorous units) per 1 km of the water track along the Uda estuary

по распределению солёности, зона внутреннего эстуария (где пресные речные воды подстилаются солоноватыми) у обеих рек располагалась с мористой стороны от бара, а все речное русло было занято только речными водами. Несмотря на такие различия, наиболее общие закономерности локализации продукционно-деструкционных процессов оказались свойственны и исследованным эстуариям, при ряде существенных местных особенностей.

Прежде всего привлекает внимание то, что в эстуариях рек Уда и Усалин концентрация фосфора на поверхности моря при удалении от устья рек не убывает, как следовало бы ожидать при смешении богатых биогенными элементами речных вод с бедными поверхностными морскими, а увеличивается из-за возрастающего влияния подповерхностных морских вод в условиях мощного приливного перемешивания. Поэтому график зависимости потенциальной концентрации фосфора от солёности не является прямой нисходящей линией, которая обычно анализируется в эстуарных исследованиях [например: Савенко, 2018], а имеет V-образную форму (см. рис. 5). Восходящая ветвь кривой отражает растущий вклад подповерхностных морских вод, который компенсирует убывающий вклад речных вод. В эстуарии р. Уда, где значительное влияние подповерхностных вод прослеживается уже в районе бара и еще более увеличивается мористее, представлена только правая часть V-образной кривой. В нашем исследовании эстуарных процессов, целью которых является оценка влияния именно материкового стока, вклад глубинных вод — это «шум», который искажает искомые результаты. Но удаление этого вклада из рассмотрения с использованием TS-анализа приводит динамику изменений концентрации фосфора в норму.

Основной закономерностью локализации продукционно-деструкционных процессов, которая проявилась и в исследованных эстуариях рек бассейна Охотского моря, является преобладание деструкции во внутренних частях эстуариев и продукции — в их внешних частях. Важно отметить, что все указанные процессы рассматриваются только в самом верхнем фотическом слое (на поверхности эстуариев). Признаками активной деструкции во внутренних эстуариях рек Уда и Усалин, помимо резкого роста концентрации неорганического фосфора, являются высокие концентрации общего фосфора за счет его органических форм и относительно высокие значения парциального

давления углекислого газа и AOU (apparent oxygen utilization — кажущееся поглощение кислорода) [Семкин и др., 2020a]. О высокой продуктивности внешних частей обоих эстуариев свидетельствуют как снижение концентрации фосфора, с постепенным приближением к потенциальным значениям, так и высокие концентрации хлорофилла *a*, высокий pH, пониженные значения парциального давления углекислого газа и отрицательные величины AOU, т.е. избыточное насыщение воды кислородом [Семкин и др., 2020a]. Экстремальные значения этих показателей в эстуарии р. Уда отмечены в диапазоне солености 5–10 ‰, в эстуарии р. Усалгин — 5–12 ‰.

Особенность обоих эстуариев — еще одна зона преобладания деструкции на их внешней периферии при солености 20–25 ‰, где фактическая концентрация фосфора вновь немного возрастает относительно потенциальных значений, а также снижается парциальное давление углекислого газа и AOU и увеличивается pH [Семкин и др., 2020a]. Для эстуариев рек южного Приморья такая зона не была отмечена, возможно потому, что не была исследована их дальняя внешняя периферия, но в принципе ее следовало бы ожидать, так как продуцируемое во внешней эстуарии органическое вещество должно где-то утилизироваться. С другой стороны, процессы деструкции на внешней периферии эстуариев, строго говоря, не являются эстуарными, поскольку там утилизируется органическое вещество нетерригенного происхождения, синтезированное в морских частях эстуариев. Значительная часть фосфатов в этой зоне, по-видимому, высвобождается в процессе минерализации органического вещества донных отложений, которые в условиях сильного приливного перемешивания взмучиваются [Савенко, 2018]. Аккумуляция органического вещества в донных отложениях — типичное явление как для внутренней зоны эстуариев, где происходят флокуляция и седиментация органического вещества, содержащегося в речной воде, так и для высокопродуктивной внешней зоны, где осаждается новообразованное органическое вещество [Лисицын, 1994].

Поскольку на протяжении эстуария р. Усалгин вклад речной воды в смесь эстуарной воды последовательно уменьшается от реки к морю, а урожай и суммарная деструкция органического вещества с 1 м<sup>3</sup> речной воды возрастают монотонно, удалось оценить скорость продукции и деструкции на единицу протяженности эстуария (рис. 8). На протяжении эстуария знак продукционно-деструкционного баланса неоднократно менялся, чего не наблюдалось в эстуариях рек южного Приморья и других рек. По-видимому, лишь в первой зоне деструкции во внутреннем эстуарии, характерной для всех эстуариев мира [McLusky, Elliott, 2004], разлагается органическое вещество, поступающее с речной водой. В последующих же вниз по течению зонах преобладания деструкции, находящихся за пределами речного русла, разлагается органическое вещество, аккумулированное в донных отложениях вершины зал. Николая. Особенностью химического состава вод р. Усалгин является относительно высокое содержание гуминовых веществ, а также общее высокое содержание органического вещества (до 23 мгС/л), предположительно по причине большой заболоченности водосбора реки с обширными торфяниками [Семкин и др., 2020б]. По-видимому, из-за этой особенности переносимая рекой органика не разлагается полностью во внутреннем эстуарии, а в значительных количествах выносится в вершину зал. Николая, где оседает на дно эстуария и там разлагается окончательно, поставляя реминерализованные биогенные элементы в поверхностный слой внешнего эстуария.

Наблюдаемое в верхней части внешнего эстуария р. Усалгин преобладание продукции (до +0,22 гС/м<sup>3</sup>км) также типично для всех эстуариев [Лисицын, 1994]. Локализация зоны преобладания продукции в этом месте обусловлена осветлением речной воды после осаждения во внутреннем эстуарии загрязняющих ее минеральной взвеси и органических веществ. Но в условиях активного разложения органического вещества, сложившихся в вершине зал. Николая, деструкция преобладает и на части внешнего эстуария, разделив высокопродуктивную зону на участки в районе бара и

в 8–12 км от бара. Из-за чрезвычайно активной деструкции (до  $-0,23$  гС/м<sup>3</sup>км выше бара, до  $-0,17$  гС/м<sup>3</sup>км ниже бара) количество минерального фосфора, регенерированного в эстуарии, превышает количество фосфора, приносимого рекой, поэтому в зонах преобладания продукции органическое вещество синтезируется в основном на основе реминерализованных в эстуарии, а не терригенных фосфатов. Это дает существенную прибавку к продукции эстуария, вследствие чего эстуарий р. Усалгин отличается очень высокой продукцией, основой которой на 9/10 является рециклинг. Этот феномен подтверждается и высокими концентрациями феофитина и хлорофилла *a* в водах эстуария р. Усалгин [Семкин и др., 2020a]. Хотя во внешней эстуарии этой реки величины удельной продукции и деструкции эстуарных вод гораздо ниже, чем во внутренней его части и в районе бара, именно в морской части эстуария производится большая часть органического вещества, с учетом большой площади внешнего эстуария, на которой распределяется речная вода. Мощный рециклинг в эстуарии р. Усалгин стал причиной формирования нескольких чередующихся зон преобладания продукции и деструкции, что нехарактерно для других исследованных эстуариев, где наблюдается лишь одна зона преобладания деструкции во внутренней эстуарии и одна зона преобладания продукции во внешней эстуарии [Важова, Зуенко, 2015].

К сожалению, точно локализовать участки преобладания продукции и деструкции в пространственных координатах удалось только для эстуария р. Усалгин. На большей части эстуария р. Уда в период наблюдений процесс постепенного разбавления речной воды от реки к морю был искажен приливной адвекцией. Поэтому для эстуария р. Уды процессы продукции и деструкции не могут быть локализованы в географических координатах (по протяжению разреза от реки к морю), хотя в гидрологических координатах (по градиенту солености) отмечаются те же основные закономерности, что и в других эстуариях мира [McLusky, Elliott, 2004].

Результаты наших расчетов продукционно-деструкционного баланса по распределению фосфатов в эстуариях двух рек, впадающих в Охотское море, согласуются с выводом, сделанным на основе всей совокупности гидрохимических данных, полученных экспедицией 2016 г. [Семкин и др., 2020a], что высокие концентрации растворенного органического вещества, поступающего с водосборных бассейнов рек Уда и Усалгин, обеспечивают благоприятные условия для высокой биопродуктивности эстуариев этих рек, при этом раскрывают химические механизмы высокой продуктивности и позволяют сделать количественные оценки продукции и деструкции органического вещества.

### Заключение

Анализ локализации зон преобладания продукции и деструкции органического вещества в эстуариях рек Уда и Усалгин, впадающих в заливы Охотского моря в районе Шантарского архипелага, выявил как типичные для приливных эстуариев черты пространственных изменений продукционно-деструкционного баланса, так и особенности, обусловленные местными условиями. По неконсервативному изменению фосфатов в обоих исследованных эстуариях отмечена смена знака продукционно-деструкционного баланса от деструкции во внутренних частях эстуариев к продукции в верхних частях внешних эстуариев. Поскольку это явление отмечается разными исследователями для эстуариев рек разных типов, находящихся в разных климатических зонах, очевидно, оно является типичным для эстуариев вообще.

Вместе с тем расчеты показывают, что в эстуарии р. Усалгин существует еще одна мощная зона преобладания деструкции, расположенная в его внешней части, которая разделила надвое высокопродуктивную мористую зону. Активная деструкция не только во внутренней эстуарии, но и на части внешнего эстуария р. Усалгин обусловлена массовым поступлением органических веществ с водами этой реки, дренирующей заболоченную местность, а также орографическими условиями зал. Николая, куда впадает река, способствующими аккумуляции органических отложений в вершине

залива, где они разлагаются. Это дает существенную прибавку к продукции эстуария, вследствие чего эстуарий р. Усалин отличается очень высокой продукцией, основой которой (по расчетам на 9/10) является рециклинг. В эстуарии р. Уда вторая, мористая, зона деструкции выражена слабее, но также прослеживается.

Новые данные подтвердили авторскую концепцию, ранее [Важова, Зуенко, 2015] сформулированную на основе результатов исследования продукционно-деструкционного баланса в эстуариях рек южного Приморья, что благодаря пространственной разобщенности участков преобладания продукции и деструкции органического вещества эстуарии являются одновременно и маргинальными фильтрами, задерживающими терригенные биогенные вещества (в частности, фосфаты), преобразуя их в первичную продукцию, и «фабриками биогенов», поставляющими минерализованные биогенные элементы в морские экосистемы. Основная граница, разделяющая зоны преобладания продукции и деструкции в эстуариях, проходит примерно по изохалинам 8–12 ‰, что в целом согласуется с известным в морской экологии понятием первой зоны критической солености и представлениями о нелинейности биологических процессов по градиенту солености с резким изменением их скоростей (или даже направления) в узком соленостном диапазоне [Хлебович, 1974; Telesh, Khlebovich, 2010].

### **Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)**

Коллектив авторов выражает глубокую благодарность сотрудникам лаборатории гидрохимии ФГБУН Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичева ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН), принимавшим участие в сборе образцов проб воды и их лабораторном анализе, использованных в подготовке материалов для данной статьи.

The authors are deeply grateful to the researchers of Hydrochemistry Lab. of the Pacific Oceanological Institute who collected and analyzed the water samples and whose results were used in the study.

### **Финансирование работы (FUNDING)**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

The study had no sponsor funding.

### **Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)**

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с животными в качестве объектов.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

The article does not concern to animal studies.

The authors declare that they have no conflict of interest

### **Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)**

Концепция исследования — Ю.И. Зуенко, А.С. Курносова; проведение лабораторных анализов — М.Г. Швецова; расчеты, написание статьи, рисунки — А.С. Курносова; редакторская правка — Ю.И. Зуенко.

Research concept — Yury Zuenko and Anna Kurnosova; laboratory analysis — Maria Shvetsova; data processing, text writing, figures — Anna Kurnosova; text editing — Yury Zuenko.

### **Список литературы**

**Важова А.С.** Влияние структуры вод и особенностей продукционно-деструкционных процессов в эстуариях на структурно-функциональные характеристики биоценозов // Проблемы региональной экологии. — 2019. — № 3. — С. 14–22. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-13014.

**Важова А.С., Зуенко Ю.И.** Оценка первичной продукции в эстуариях рек Раздольная и Суходол (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 182. — С. 132–143. DOI: 10.26428/1606-9919-2015-182-132-143.



- Винберг Г.Г.** Первичная продукция водоемов : моногр. — Минск : АН БССР, 1960. — 329 с.
- Гордеев В.В.** Геохимия системы река–море : моногр. — М. : ИП Матушкина И.И., 2012. — 452 с.
- Дмитриев В.В., Боброва О.Н., Грачева И.В. и др.** Мониторинг и моделирование продукционно-деструкционных отношений в водных экосистемах // Успехи соврем. естествознания. — 2019. — № 1. — С. 82–87.
- Звалинский В.И., Недашковский А.П., Сагалаев С.Г. и др.** Биогенные элементы и первичная продукция в эстуарии реки Раздольной (Амурский залив Японского моря) // Биол. моря. — 2005. — Т. 31, № 2. — С. 107–116.
- Леонов А.В., Стыгар О.В.** Математическое моделирование процессов биотрансформации органогенных веществ для изучения условий евтрофирования вод поверхностного слоя Каспийского моря // Вод. ресурсы. — 2001. — Т. 28, № 5. — С. 587–605.
- 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.
- Михайлов В.Н.** Гидрологические процессы в устьях рек : моногр. — М. : ГЕОС, 1997. — 176 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 18 : Дальний Восток. Вып. 2 : Нижний Амур (от с. Помпеевки до устья) / под ред. А.П. Муранова.** — Л. : Гидрометеоиздат, 1970. — 592 с.
- Рыжаков А.В., Степанова И.А.** Оценка скорости потребления минерального фосфора в природных водах с использованием ингибиторов щелочной фосфатазы // Экол. химия. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 172–175.
- Савенко А.В.** Типы распределения растворенных форм химических элементов в устьевых областях рек // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. — 2018. — № 2. — С. 53–59.
- Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Тищенко П.П. и др.** Параметры карбонатной системы и растворенный органический углерод эстуариев рек Уда и Усалгин (Охотское море) в летний сезон // Тр. ГОИ. — 2020а. — Т. 221. — С. 195–210.
- Семкин П.Ю., Тищенко П.П., Тищенко П.Я. и др.** Характеристика продукционно-деструкционных процессов в эстуариях рек Уда и Усалгин (Охотское море) в период летнего паводка // Вестн. ДВО РАН. — 2020б. — № 2. — С. 88–96. DOI: 10.37102/08697698.2020.210.2.011.
- Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Шулькин В.М. и др.** Комплексные исследования прибрежных акваторий Японского и Охотского морей, находящихся под влиянием речного стока (71-й рейс научно-исследовательского судна «Профессор Гагаринский») // Океанол. — 2018. — Т. 58, № 2. — С. 340–342. DOI: 10.7868/S5003957418020193.
- Хлебович В.В.** Критическая соленость биологических процессов : моногр. — Л. : Наука, 1974. — 235 с.
- Correll D.L., Faust M.A., Severn D.J.** Phosphorus flux and cycling in estuaries // Estuarine research: chemistry, biology, and the estuarine system. — N.Y. : Acad. Press, 1975. — Vol. 1. — P. 108–136.
- Doering P.H., Oviatt C.A., Nowicki B.L. et al.** Phosphorus and nitrogen limitation of primary production in a simulated estuarine gradient // Mar. Ecol. Prog. Ser. — 1995. — Vol. 124. — P. 271–287.
- Howarth R.W., Chan F., Swaney D.P. et al.** Role of external inputs of nutrients to aquatic ecosystems in determining prevalence of nitrogen vs. phosphorus limitation of net primary productivity // Biogeochemistry. — 2021. — Vol. 154. — P. 293–306. DOI: 10.1007/s10533-021-00765-z.
- Lee Z.P., Carder K.L., Marra J. et al.** Estimating primary production at depth from remote sensing // Applied Optics. — 1996. — Vol. 35, Iss. 3. — P. 463–474.
- Liss P.S.** Conservative and non-conservative behavior of dissolved constituents during estuarine mixing // Estuarine Chemistry. — L. : Acad. Press, 1976. — P. 93–130.
- Marra J., Trees C.C., O'Reilly J.E.** Phytoplankton pigment absorption: A strong predictor of primary production in the surface ocean // Deep-Sea Res. I. — 2007. — Vol. 54, Iss. 2. — P. 155–163.
- McLusky D.S., Elliott M.** The Estuarine Ecosystem: ecology, threats and management, 3rd edn. — Oxford : OUP, 2004. — 216 p.
- Redfield A.C., Ketchum B.H., Richards F.A.** The Influence of organisms on the composition of sea-water // The Sea. — 1963. — Vol. 2. — P. 26–77.
- Telesh I.V., Khlebovich V.V.** Principal processes within the estuarine salinity gradient: A review // Mar. Poll. Bull. — 2010. — Vol. 61, Iss. 4–6. — P. 149–155. DOI: 0.1016/j.marpolbul.2010.02.008.

## References

- Vazhova A.S.** Effect of water structure and characteristics of the production-destructive processes in estuaries on structural and functional characteristics of biocenoses, *Problemy regional'noy ekologii*, 2019, no. 3, pp. 14–22. doi 10.24411/1728-323X-2019-13014
- Vazhova, A.S. and Zuenko, Yu.I.**, Evaluation of primary production in the estuaries of the Razdolnaya/Suifen and Sukhodol Rivers (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2015, vol. 182, no. 3, pp. 132–143. doi 10.26428/1606-9919-2015-182-132-143
- Vinberg, G.G.**, *Pervichnaya produktsiya vodoyemov* (Primary production of reservoirs), Minsk: AN BSSR, 1960.
- Gordeev, V.V.**, *Geokhimiya sistemy reka–more* (Geochemistry of the river–sea system), Moscow: IP Matushkina I.I., 2012.
- Dmitriev, V.V., Bobrova, O.N., Gracheva, I.V., Kolodkin, P.A., Primak, E.A., Sedova, S.A., and Chetverova, A.A.**, Monitoring and modeling of production and destruction relations in aquatic ecosystems, *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2019, no. 1, pp. 82–87.
- Zvalinsky, V.I., Nedashkovsky, A.P., Sagalaye, S.G., Tishchenko, P.J., and Shvetsova, M.G.**, Nutrients and primary production in the Estuary of the Razdol'naya River (Amur Bay, Sea of Japan), *Russ. J. Mar. Biol.*, 2005, vol. 31, no. 2, pp. 91–101.
- Leonov, A.V. and Stygar, O.V.**, Mathematical modeling of the processes of biotransformation of organogenic substances to study the conditions of eutrophication of the waters of the surface layer of the Caspian Sea, *Vodnyye resursy*, 2001, vol. 28, no. 5, pp. 587–605.
- Lisitsyn, A.P.**, Marginal filter of the oceans, *Oceanology*, 1994, vol. 34, no. 5, pp. 735–747.
- Mamaev, O.I.**, *Termokhalimnyy analiz vod Mirovogo okeana* (Thermohaline analysis of the waters of the World Ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987.
- Mikhailov, V.N.**, *Gidrologicheskie protsessy v ust'yakh rek* (Hydrological Processes in River Estuaries), Moscow: GEOS, 1997.
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Gidrologicheskaya izuchennost'. T. 18: Dal'nii Vostok, vyp. 2: Nizhniy Amur (ot s. Pompeyevki do ust'ya)* (Surface Water Resources of the USSR, Hydrological study, vol. 18: Far East, no. 2: Lower Amur (from the village of Pompeevka to the mouth)), Muranova, A.P., ed., Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970.
- Ryzhakov, A.V. and Stepanova, I.A.**, Determination of rate of mineral phosphorus acceptance in natural waters by using of alkaline phosphatase inhibitors, *Ekol. khimiya*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 172–175.
- Savenko, A.V.**, Types of distribution of dissolved components in river mouth areas, *Vestn. Mosk. Gos. Univ., Ser. 5. Geografiya*, 2018, no. 2, pp. 53–59.
- Semkin, P.Yu., Tishchenko, P.Ya., Tishchenko, P.P., Pavlova, G.Yu., Sagalaev, S.G., Khodorenko, N.D., Shvetsova, M.G., and Shkirnikova, E.M.**, Parameters of the carbonate system and dissolved organic carbon in estuaries of Uda and Usalgin Rivers (Okhotsky Sea) in the summer season, *Tr. Gos. Okeanogr. Inst.*, 2020, vol. 221, pp. 195–210.
- Semkin, P.Yu., Tishchenko, P.P., Tishchenko, P.Ya., Pavlova, G.Yu., Sagalaev, S.G., Khodorenko, N.D., Shkirnikova, E.M., and Shvetsova, M.G.**, Characterization of production/destruction processes in the Uda and Usalgin estuaries of the Sea of Okhotsk during the summer flood, *Vestn. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2020, no. 2, pp. 88–96. doi 10.37102/08697698.2020.210.2.011
- Tishchenko, P.Y., Lobanov, V.B., Mel'nikov, V.V., Tsoi, I.B., Semkin, P.Y., Tishchenko, P.P., Bannov, V.A., Belous, O.V., Vasil'eva, L.E., Elovskaya, O.A., Sagalaev, S.G., Fedorets, Y.V., Shul'kin, V.M.**, Comprehensive research of the coastal water area of the Sea of Japan and Sea of Okhotsk under the influence of river runoff (cruise 71 of the R/V professor Gagarinskii), *Oceanology*, 2018, vol. 58, no. 2, pp. 325–327. doi 10.1134/S0001437018010150
- Khlebovich, V.V.**, *Kriticheskaya solenost' biologicheskikh protsessov* (Critical Salinity of Biological Processes), Leningrad: Nauka, 1974.
- Correll, D.L., Faust, M.A., and Severn, D.J.**, Phosphorus flux and cycling in estuaries, *Estuarine research: chemistry, biology, and the estuarine system*, New York: Acad. Press, 1975, vol. 1, pp. 108–136.
- Doering, P.H., Oviatt, C.A., Nowicki, B.L., Klos, E.G., and Reed, L.W.**, Phosphorus and nitrogen limitation of primary production in a simulated estuarine gradient, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1995, vol. 124, pp. 271–287.
- Howarth R.W., Chan F., Swaney D.P., Marino, R.M. and Hayn, M.**, Role of external inputs of nutrients to aquatic ecosystems in determining prevalence of nitrogen vs. phosphorus limitation of net primary productivity, *Biogeochemistry*, 2021, vol. 154, pp. 293–306. doi 10.1007/s10533-021-00765-z

**Lee, Z.P., Carder, K.L., Marra, J., Steward, R.G., and Perry, M.J.,** Estimating primary production at depth from remote sensing, *Applied Optics*, 1996, vol. 35, no. 3, pp. 463–474.

**Liss, P.S.,** Conservative and non-conservative behavior of dissolved constituents during estuarine mixing, *Estuarine Chemistry*, London: Acad. Press, 1976, pp. 93–130.

**Marra, J., Trees, C.C., and O'Reilly, J.E.,** Phytoplankton pigment absorption: A strong predictor of primary production in the surface ocean, *Deep-Sea Res., Part I*, 2007, vol. 54, no. 2, pp. 155–163.

**McLusky, D.S., Elliott, M.,** *The Estuarine Ecosystem: ecology, threats and management*, Glasgow: Blackie & Son, 1981.

**Redfield, A.C., Ketchum, B.H., and Richards, F.A.,** The Influence of organisms on the composition of sea-water, *The Sea*, 1963, vol. 2, pp. 26–77.

**Telesh, I.V. and Khlebovich, VV.,** Principal processes within the estuarine salinity gradient: A review, *Mar. Poll. Bull.*, 2010, vol. 61, no. 4–6, pp. 149–155. doi 0.1016/j.marpolbul.2010.02.008

*Lotsiya Okhotskogo morya (№ 1406). Vyp. 1. Yuzhnaya chast' morya* (Pilot of the Sea of Okhotsk (no. 1406). Issue 1. Southern part of the sea), St. Petersburg: GUNIO, 1998.

*Поступила в редакцию 13.09.2022 г.*

*После доработки 8.11.2022 г.*

*Принята к публикации 21.11.2022 г.*

*The article was submitted 13.09.2022; approved after reviewing 8.11.2022;  
accepted for publication 21.11.2022*