

Научная статья

УДК 556.545

DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-961-975

EDN: UOJNTA



ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ФИТОПЛАНКТОН В ЭСТУАРИИ Р. КИЕВКА (ЯПОНСКОЕ МОРЕ) С РАСЧЕТОМ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ПО УТИЛИЗАЦИИ ФОСФОРА

А.С. Курносова¹, М.А. Шульгина^{2*}¹ Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО),
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4;² Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17

Аннотация. На основе комплексных исследований, проведенных в эстуарии р. Киевка в мае 2020 г., рассмотрены особенности распределения гидрохимических параметров (фосфаты, силикаты, нитритный азот, нитратный азот, аммонийный азот, железо общее, растворенный кислород, БПК₅), видового состава, численности и биомассы фитопланктона. Рассмотрены особенности изменений концентраций фосфатов и биомассы фитопланктона в зоне смешения речных и морских вод по градиенту солености. Высокие концентрации фитопланктона отмечены на границе внешнего эстуария. На протяжении нижнего течения реки величины биомассы фитопланктона варьируют от 0,05 до 0,48 г/м³, с максимумом в речной зоне. Величины первичной продукции, рассчитанные по балансу фосфора, изменяются от 0,02 до 0,23 гС/м³км, с максимумом на границе внешнего эстуария, где отмечено увеличение биомассы фитопланктона. Показано, что в эстуарии р. Киевка, воды которой весной сравнительно бедны биогенными веществами, первичная продукция обеспечивается за счет фосфатов, регенерированных при минерализации органического вещества во внутреннем эстуарии. Ранее исследования фитопланктона в нижнем течении р. Киевка не проводились.

Ключевые слова: эстуарий, река Киевка, первичная продукция, фитопланктон, фосфаты, растворенный кислород, гидрохимия

Для цитирования: Курносова А.С., Шульгина М.А. Гидрохимические условия и фитопланктон в эстуарии р. Киевка (Японское море) с расчетом первичной продукции по утилизации фосфора // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 4. — С. 961–975. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-961-975. EDN: UOJNTA.

* Курносова Анна Сергеевна, ведущий специалист, anna.vazhova@gmail.com, ORCID 0000-0002-4026-9456; Шульгина Мария Александровна, младший научный сотрудник, annekee@mail.ru, ORCID 0000-0002-4744-9230.

© Курносова А.С., Шульгина М.А., 2023

Hydrochemical conditions and phytoplankton in the Kievka estuary (Japan Sea) with calculation of primary production by phosphorus utilization

Anna S. Kurnosova*, Maria A. Shulgina**

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

** Institute of Marine Biology, National Scientific Center of Marine Biology, Far Eastern Branch, Russian Ac. Sci., 17, Palchevsky Str., Vladivostok, 690041, Russia

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

** junior researcher, annekee@mail.ru, ORCID 0000-0002-4744-9230

Abstract. Spatial distribution of chemical parameters, as concentration of dissolved inorganic phosphorus (DIP), inorganic silica, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, total iron, dissolved oxygen, and biochemical oxygen demand (BOD_5) is considered together with species composition, abundance and biomass of phytoplankton on the data of complex survey conducted in the estuary of the Kievka River in May 2020, with special attention to DIP and phytoplankton variations along the salinity gradient in the zone of mixing fresh and saline waters. In the lower Kievka, phytoplankton was studied for the first time. The phytoplankton biomass varied from 0.05 to 0.21 g/m³, proportional to changes in primary production calculated from the DIP balance in the river water moving downstream through the estuary (from 0.02 to 0.23 g/m³km). The highest production and the highest biomass were found in the upper part of the external estuary. The water of Kievka River was initially poor in nutrients, so primary production in its estuary was supported by DIP regenerated in the process of organic matter mineralization in the internal estuary.

Keywords: estuary, Kievka River, primary production, phytoplankton, phosphate, dissolved oxygen

For citation: Kurnosova A.S., Shulgina M.A. Hydrochemical conditions and phytoplankton in the Kievka estuary (Japan Sea) with calculation of primary production by phosphorus utilization, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 4, pp. 961–975. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-961-975. EDN: UOJNTA.

Введение

Реки являются основными поставщиками терригенного материала в прибрежную зону морей и океанов через эстуарии [Лисицын, 1994], которые при этом характеризуются как высокопродуктивные области [Одум, 1986]. Несмотря на активные комплексные изучения эстуариев Японского моря [Звалинский, Тищенко, 2005; Колпаков и др., 2010; Важдова, Зуенко, 2015; Семкин и др., 2015, 2018; Тищенко и др., 2017, 2018], гидрохимические и гидробиологические исследования эстуария р. Киевка ранее не проводились. Известно, что гидрохимический состав речных вод может существенно влиять на экологическое состояние эстуарной биоты, а в зоне эстуария при переходе из речной зоны к морю концентрации биогенных элементов могут резко и разнонаправленно меняться либо под действием процессов продуцирования, либо при деструкции органического вещества [McLusky, Elliott, 2004]. Ранее [Важдова, Зуенко, 2015] знак и интенсивность продукционно-деструкционных процессов в эстуариях некоторых рек южного Приморья были оценены по балансу фосфора, при этом показано, что продукционные процессы локализуются во внешней части эстуарной зоны, а деструкция происходит в основном во внутренней эстуарии; кроме этого, были оценены величины первичной продукции эстуариев. Фосфор входит в состав продуцируемого растениями органического вещества и потому является неременным 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 данной статье основной целью исследования стало определение расположения зон преобладания продукции и деструкции органического вещества и величин первичной продукции в эстуарии р. Киевка, причем в сравнении с особенностями пространственного распределения фактической биомассы фитопланктона. Кроме того, в работе впервые освещены гидрохимический режим нижнего течения р. Киевка в весенний сезон и видовой состав, численность и биомасса фитопланктона этого района.

Материалы и методы

Река Киевка (до 1972 г. Судзухэ, длина — 105 км, площадь бассейна — 3 120 км²) впадает в бухту Киевка Японского моря, расположенную на юго-востоке Приморского края. Река берет начало на юго-западных склонах хребта Сихотэ-Алинь и в верхнем течении направляется на запад, но после впадения относительно крупного притока р. Лазовка резко поворачивает на юг, к морю. В питании реки преобладают дождевые воды, на долю подземного питания приходится около 15 %, снегового — около 5 %. Бассейн реки имеет горный характер. В нижнем течении (75 км до устья) долина реки прямая, пойменная. Ширина ее колеблется от 0,5 до 6,6 км, глубина от 0,4 до 5,0 м, скорость течения воды 0,4–1,2 м/с. Водность реки внутри года распределена неравномерно: в теплую часть (с апреля по ноябрь) проходит до 90–96 %, зимой 4–10 % годового объема. Наиболее многоводной река бывает с апреля по июнь и в сентябре-октябре, а наиболее низкий сток наблюдается в январе-феврале [Ресурсы..., 1972]. Годовой сток р. Киевка составляет в среднем около 1 км³, но в наиболее водные годы может возрастать вдвое [Зуенко, Рачков, 2003].

Относительно небольшая величина приливов в устье р. Киевка позволяет отнести ее эстуарий к микроприливному, для которых характерна резкая стратификация вод и выраженные фронты [Михайлов, 1997]. По своим физико-географическим характеристикам р. Киевка типична для рек, стекающих с Сихотэ-Алиня в Японское море, поэтому можно предположить, что гидрохимические условия в ее эстуарии характерны для горных рек Приморья с минимальным антропогенным влиянием [Важова, 2017], а продукционно-деструкционные процессы характеризуют фоновый режим функционирования их эстуарных экосистем.

В эстуарной зоне реки развита сеть протоков и слепых рукавов. На расстоянии 1,3–1,7 км вверх по течению от восточного приустьевых мыса правый рукав р. Киевка разделен несколькими островами на три протоки — западную, среднюю и главную. Исследована главная протока левого рукава реки. Ширина русла протоки — до 250 м, глубина — до 5 м.

Сбор проб на гидрохимический анализ воды и проб фитопланктона в эстуарии р. Киевка проведен в мае 2020 г. на 11 станциях в нижнем течении реки и в эстуарии (рис. 1). Пробы отбирали у поверхности воды и у дна (при глубине более 1 м) при помощи батометра Нискина. Кроме того, на каждой станции определяли температуру и соленость воды океанологическим зондом ASTD-102 Rinko (Япония) от поверхности до дна с шагом по глубине 0,5 м, прозрачность измеряли диском Секки.

Гидрохимический анализ проб воды выполнен по стандартным методикам: фосфатный фосфор (µМ) определяли методом Морфи-Райли, неорганический кремний — по методу Динерта-Ванденбульке, нитратный азот восстанавливали до нитритного на кадмиевых редукторах, нитритный азот измеряли методом Бендшнайдера-Робинсона [Руководство..., 2003]. Спектрофотометрические определения проводили на спектрофотометре Shimadzu UV-1800 (Япония). Содержание растворенного кислорода (мл/л) и биохимического потребления кислорода (БПК₅, мл/л) определяли титрованием с визуальным окончанием по методу Винклера. По данным о содержании кислорода, температуре и солености воды рассчитано

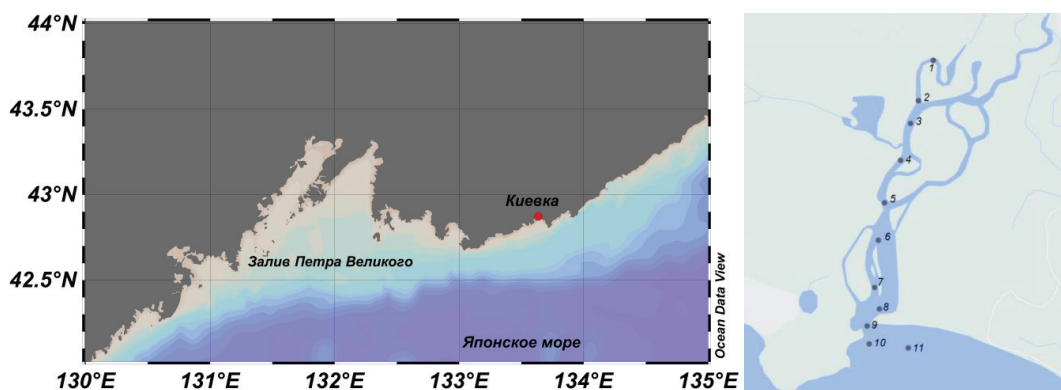


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб и измерений в нижнем течении и эстуарии р. Киевка. Указаны номера станций

Fig. 1. Scheme of samplings and measurements in the lower Kievka River and estuary. Station numbers are shown

кажущееся потребление кислорода (AOU, мл/л) как разница между расчетной концентрацией кислорода в состоянии равновесия с атмосферой при температуре и солености *in situ* и фактическим содержанием [Weiss, 1970].

Фитопланктонные пробы объемом 1 л отбирали в пластиковые емкости, фиксировали раствором Утермеля до бледно-желтого цвета и концентрировали методом осаждения [Utermöhl, 1958]. Численность клеток микроводорослей подсчитывали по видам визуально под световым микроскопом Carl Zeiss Axio Vert. A1 (Германия) в камере Нажотта объемом 0,05 мл [Федоров, 1979]. Биомассу микроводорослей оценивали объемным методом, используя литературные данные измерений объема клеток каждого вида [Нестерова, Василенко, 1986; Sun, Liu, 2003].

Для качественной оценки знака продукционно-деструкционного баланса рассмотрены изменения кажущегося потребления растворенного кислорода (AOU) и концентрации фосфатов в поверхностном слое вдоль оси эстуария. Показатель AOU предполагает, что в поверхностных водных массах кислород находится в равновесии с кислородом атмосферы, что дает 100 % насыщения кислородом. Если же AOU больше нуля, то принято считать, что в водах преобладают деструкционные процессы, если меньше — то продукционные [Libes, 2009].

Для количественной оценки продукции и деструкции органического вещества использована методика, основанная на анализе неконсервативных изменений концентрации неорганического фосфора в зоне смешения речных и морских вод [Liss, 1976; Михайлов, 1997; Звалинский и др., 2005; Гордеев, 2012], усовершенствованная с учетом возможного влияния на концентрацию фосфора в эстуариях водообмена с богатыми биогенными веществами подповерхностными морскими водами [Важова, Зуенко, 2015]. Для оценки первичной продукции по расходу минерального фосфора в эстуарной зоне были рассчитаны потенциальные концентрации фосфатов (обусловленные только смешением речных и морских вод) и определены отклонения от них реальных концентраций (рис. 2). Все расчеты выполнены только для поверхностного слоя. Эстуарные воды представляют смесь речной воды с поверхностными и подповерхностными морскими водами, каждая из этих водных масс характеризуется определенным сочетанием температуры и солености (TS-индексами). Вклад фосфатов, которые поступили на разные участки эстуария с речной водой и подповерхностными морскими водами, оценен в зависимости от температуры и солености образовавшейся смеси с помощью TS-анализа [Мамаев, 1987].

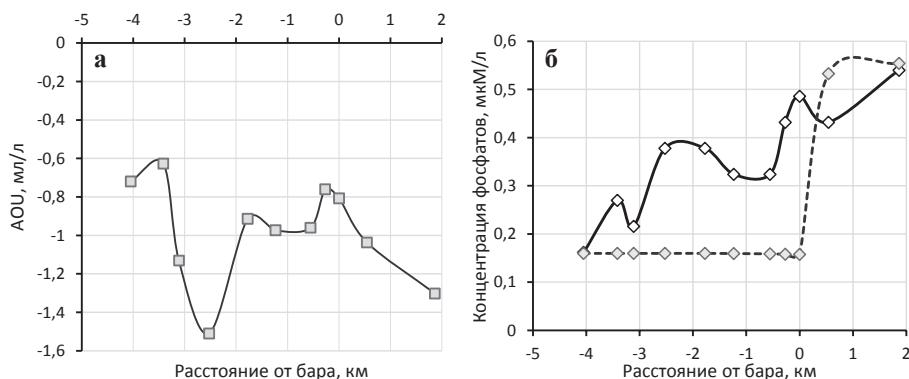


Рис. 2. Изменения кажущегося потребления растворенного кислорода (а) и концентрации фосфатов относительно их потенциальной концентрации, показанной пунктиром (б) вдоль эстуария р. Киевка по данным съемки 13 мая 2020 г.

Fig. 2. Variations of apparent oxygen utilization (а) and phosphorus concentration relative to its potential values shown by dotted line (б) along the Kievka estuary on May 13, 2020

Результаты и их обсуждение

Гидрологические и гидрохимические условия в нижнем течении р. Киевка

Съемка на р. Киевка выполнена 13 мая после весеннего паводка. В мае на водосборном бассейне реки выпало 66 мм осадков (12 мая выпало 11 мм) согласно архивным данным с сайта pogodaiklimat.ru. На большинстве станций в нижнем течении реки (от ст. 1 до ст. 6, см. рис. 1) речная вода занимала все русло. Примерно от 1,5 км до бара (до 0, рис. 3) в придонном слое наблюдался клин солоноватых вод, соленость которых при приближении к бару возрастала от 0 до 20 ‰, при этом поверхностный слой занимали речные воды. От ст. 7 вниз по течению реки соленость на поверхности резко увеличивалась от 0 до 30 ‰, а придонный слой во внешней зоне эстуария заняли морские воды с соленостью свыше 33 ‰. Температура в поверхностном слое на станциях с речной водой варьировала от 9,5 до 10,8 °C, резко снижаясь во внешнем эстуарии до 5,5–5,9 °C. В придонном слое температура речной воды варьировала от 8,2 до 9,5 °C, в зависимости от глубины, в клине солоноватых вод она резко снижалась до 2,4–4,2 °C и имела наименьшие значения у дна внешнего эстуария.

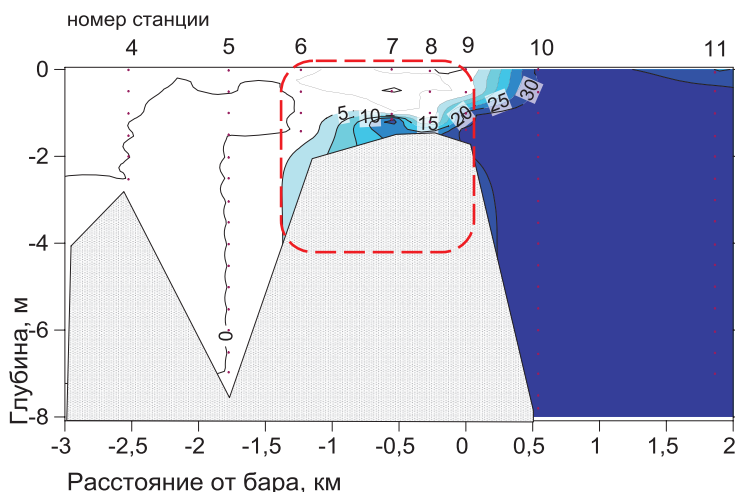


Рис. 3. Распределение солёности (‰) вдоль русла р. Киевка (выделена зона внутреннего эстуария)

Fig. 3. Variations of salinity (‰) along the lower Kievka and estuary (the zone of internal estuary is highlighted)

Для удобства описания наблюдаемых особенностей эстуарий районирован по вертикальной структуре вод [Зуенко, 2008]. Область внутреннего эстуария (с пресными водами в поверхностном слое и клином солоноватых вод в придонном) отделяется соленостным фронтом от внешнего эстуария, располагающегося в районе бара и далее в море, где поверхностный слой занимают солоноватые воды, а подповерхностный — соленая морская вода (рис. 3).

В период съемки воды р. Киевки отличались низкими концентрациями фосфатов и относительно высокими концентрациям кремния и минерального азота, в частности нитратов (табл. 1).

Таблица 1
Термохалинные и гидрохимические показатели вод в нижнем течении и эстуарии р. Киевка
Table 1
Thermohaline and chemical parameters of waters in the lower Kievka River and estuary

Параметр	Слой, м	Станция										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Т, °С	0	9,54	9,35	9,24	9,05	9,05	9,32	9,61	9,72	10,84	5,89	5,46
	Дно	9,54	9,35	9,24	9,05	8,86	8,25	8,29	9,53	4,19	2,40	2,46
S, ‰	0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,15	0,22	0,36	0,22	20,54	27,37
	Дно	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,22	21,40	3,20	32,90	33,30	33,30
PO ₄ , μМ	0	0,16	0,27	0,22	0,38	0,38	0,32	0,32	0,43	0,49	0,43	0,54
	Дно	0,27		0,32		0,32	0,32	0,49	0,54	0,51	0,54	0,92
Si, μМ	0	188,0	185,8	186,9	186,9	187,7	186,6	184,8	182,4	182,9	8,5	86,8
	Дно	188,2		187,7		186,6	182,2	98,5	107,3	86,6	10,2	16,0
NO ₃ , μМ	0	19,82	17,88	23,99	21,41	20,21	23,60	5,59	27,47	26,24	0,97	14,01
	Дно	17,68		24,85		23,94	16,02	7,20	12,04	14,05	0,72	1,20
NO ₂ , μМ	0	0,25	0,23	0,25	0,23	0,25	0,31	0,31	0,31	0,31	0,27	0,29
	Дно	0,25		0,25		0,31	0,31	0,45	0,31	0,31	0,29	0,31
NH ₄ , μМ	0	0,28	0,14	0,25	0,19	0,18	0,16	0,15	0,25	0,38	0,37	0,39
	Дно	0,11		0,17		0,16	0,18	0,49	0,31	0,42	0,42	0,43
Fe, мкг/л	0	36,81	43,30	36,81	32,48	41,14	54,13	49,80	56,29	62,79	15,16	19,08
	Дно	36,81		47,63		45,47	42,31	80,11	38,97	10,23	8,66	15,16
O ₂ , мл/л	0	8,61	9,15	9,55	8,99	9,05	8,98	8,72	8,74	8,77	8,75	8,68
БПК ₅ , мл/л	0	0,70	0,80	0,45	0,49	0,66	0,54	0,49	0,49	1,22	1,11	0,85

Концентрация растворенного кислорода на всем исследованном участке на поверхности была высокой: 8,61–9,55 мл/л при насыщении от 107 до 119 %, БПК₅ был относительно низким в речной зоне, 0,45–0,80 мл/л, с увеличением значений до 1,22 мл/л в области внутреннего эстуария. Концентрация фосфатов была минимальна в речной воде (0,16–0,32 μМ), возрастала в эстуарии и достигала максимума в подповерхностных морских водах, занимающих придонный слой внешнего эстуария (0,92 μМ). Подобным образом, но в меньшей степени менялась вдоль градиента солености концентрация нитритов, возрастая от 0,23–0,25 μМ в речной воде до 0,31 μМ на поверхности и в придонном слое внутреннего эстуария. Напротив, концентрация силикатов в речной воде была высокой (184–188 μМ), но снижалась (до 8–10 μМ) в эстуарии при смешении с морскими водами. Содержание общего железа на поверхности и у дна речной зоны составляло около 40 мкг/л, в области внутреннего эстуария увеличивалось до 54–63 мкг/л на поверхности и до 80 мкг/л у дна, затем резко уменьшалось до 15–19 мкг/л во внешнем эстуарии и в море.

Продукционно-деструкционные процессы в эстуарии р. Киевка

Кажущееся потребление кислорода на поверхности эстуария р. Киевка в период съемки мало различалось между внутренней и внешней зонами. На всем протяжении эстуария значения AOU были отрицательными и варьировали от –0,6 до –1,5 мл/л, что указывает

на преобладание продукционных процессов (см. рис. 2, а). Можно отметить два участка с наиболее низкими значениями АОУ — в нижнем течении реки и во внешнем эстуарии.

Для оценки первичной продукции по расходу минерального фосфора в эстуарной зоне были рассчитаны потенциальные концентрации фосфатов (обусловленные только смешением речных и морских вод) и определены отклонения от них реальных концентраций (рис. 2, б). Все расчеты выполнены только для поверхностного слоя.

Потенциальные концентрации фосфора практически до самого бара соответствуют концентрациям этого элемента в речной воде, так как поверхностный слой эстуария был занят практически пресной водой. Однако фактические концентрации фосфора увеличивались вниз по течению, на самом нижнем участке русла резко возрастают от 0,32 до 0,49 μM , а затем во внешней части эстуария концентрации фосфора немного снизились до 0,43 μM , приблизившись к потенциальным значениям. Положительная разность между потенциальными и реально наблюдаемыми концентрациями отображает деструкцию переносимого речной водой органического вещества и в результате этого процесса к моменту достижения речной водой бара концентрация неорганического фосфора выросла более чем на 0,3 μM , что соответствует высвобождению 0,3 гС. Отрицательная разность характеризует продукцию органического вещества за счет утилизации фосфора из речной воды. Продукция преобладала во внешнем эстуарии, где утилизировался и терригенный фосфор, принесенный рекой, и регенерированный в ходе деструкции во внутреннем эстуарии. В итоге к моменту достижения речной водой самой нижней станции съемки концентрация фосфора понизилась ниже потенциального значения, что соответствовало урожаю органического вещества до 0,1 гС. На основе полученных оценок урожайности и деструкции в эстуарной зоне (на ст. 6–11) рассчитаны дифференциальные величины первичной продукции речных вод и деструкции переносимого ими органического вещества на единицу протяженности эстуария. Поскольку данные о расходе р. Киевка отсутствуют, перевод полученных значений первичной продукции в общепринятые единицы ($\text{гС}/\text{м}^3\text{сутки}$) оказывается затруднительным, но так как основной целью исследования было выявление участков повышенной продуктивности в зоне эстуария предложенным расчетным методом, то используемые единицы ($\text{гС}/\text{м}^3\text{км}$) в достаточной степени позволяют это сделать. Доказано, что эстуарий р. Киевка в весенний сезон отличается довольно низкой продуктивностью — величины первичной продукции не превышали 0,23 $\text{гС}/\text{м}^3\text{км}$, максимум наблюдался в верхней части внешнего эстуария, сразу за баром, при этом во внутреннем эстуарии наблюдалась довольно сильная деструкция — до 0,70 $\text{гС}/\text{м}^3\text{км}$, с максимумом перед баром (рис. 4).

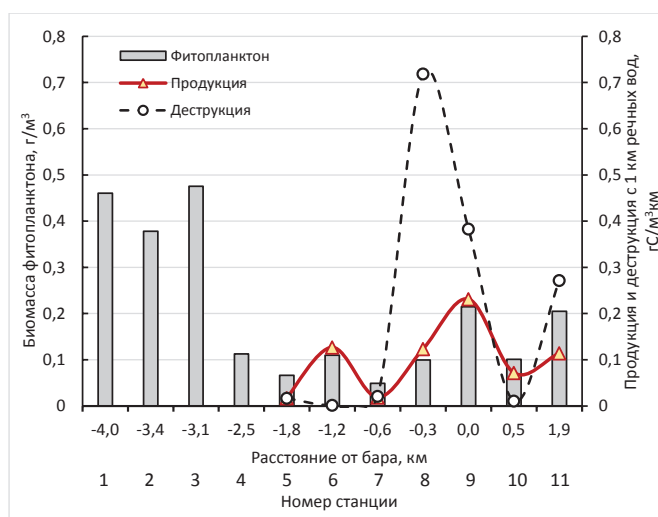


Рис. 4. Биомасса фитопланктона ($\text{г}/\text{м}^3$) и рассчитанные значения продукции и деструкции в эстуарии ($\text{гС}/\text{м}^3\text{км}$) р. Киевка в весенний сезон

Fig. 4. Phytoplankton biomass ($\text{г}/\text{м}^3$) and calculated values of primary production and organic matter degradation ($\text{гС}/\text{м}^3\text{км}$) in the Kievka estuary in spring

Фитопланктон

Всего по результатам съемки идентифицировано 45 таксонов микроводорослей, относящихся к классам Bacillariophyceae (41), Cyanophyceae (2), Dinophyceae (1) и Chrysophyceae (1) (табл. 2). Из них в речной зоне выявлено 27 таксонов диатомовых водорослей, во внутреннем эстуарии — 21 вид диатомовых, 2 — сине-зеленых и 1 — динофитовых микроводорослей, во внешнем эстуарии — 24 вида диатомовых, 1 — золотистых и 1 — динофитовых (табл. 2). Экологическая характеристика определена для 33 таксонов: основу (52 % списка) составили бентические виды, доля неритических ниже — 27, панатлассных — 15, океанических — 6 %. Географическая характеристика установлена для 23 видов: в районе исследования преобладали виды-космополиты — 39 %, доля тропическо-аркто-бореальных составила 30, аркто-бореальных 17, тропическо-бореальных 13 %.

Таблица 2

Список микроводорослей, обнаруженных в планктоне р. Киевка

Table 2

List of microalgae found in plankton of the Kievka River and estuary

Таксон	Эк/Х	Гео/Х
BACILLARIOPHYCEAE		
<i>Amphora coffeiformis</i>	Б	
<i>Amphora proteus</i>	Б	
<i>Auliscus sculptus</i>	Б	
<i>Cerataulina pelagica</i>	Н	ТБ
<i>Chaetoceros debilis</i>	Н	ТАБ
<i>Chaetoceros</i> sp.	–	–
<i>Cocconeis scutellum</i>	Б	К
<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	П	АБ
<i>Cyclotella</i> sp.	–	–
<i>Cylindrotheca closterium</i>	Н	К
<i>Cymbella</i> sp.	–	–
<i>Diploneis smithii</i>	Б	–
<i>Eucampia cornuta</i>	Н	ТАБ
<i>Fragilaria striatula</i>	Н	–
<i>Grammatophora marina</i>	Б	–
<i>Halamphora costata</i>	Б	–
<i>Halamphora granulata</i>	Б	–
<i>Hannaea arcus</i>	Б	АБ
<i>Leptocylindrus danicus</i>	Н	К
<i>Leptocylindrus mediterraneus</i>	Н	К
<i>Leptocylindrus minimus</i>	Н	ТАБ
<i>Licmophora abbreviata</i>	Б	К
<i>Melosira lineata</i>	Б	ТАБ
<i>Navicula directa</i>	Б	–
<i>Navicula salinarum</i>	–	ТАБ
<i>Navicula septentrionalis</i>	Б	–
<i>Navicula</i> sp.	–	–
<i>Navicula transitans</i> var. <i>derasa</i>	Б	
<i>Nitzschia</i> sp.	–	–
<i>Odontella aurita</i>	Н	ТАБ
<i>Pleurosigma formosum</i>	Б	К
<i>Tabellaria flocculosa</i>	Б	–
<i>Tabularia parva</i>	–	АБ
<i>Tabularia tabulata</i>	Б	–

Окончание табл. 2
Table 2 finished

Таксон	Эк/Х	Гео/Х
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>	П	ТБ
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	П	ТАБ
<i>Thalassiosira</i> sp. d = 17	—	—
<i>Thalassiosira</i> sp. d = 26	—	—
<i>Thalassiosira</i> sp. d = 40	—	—
<i>Thalassiothrix longissima</i>	П	АБ
<i>Tryblionella coarctata</i>	—	ТБ
CYANOPHYCEAE		
<i>Phormidium</i> sp.	—	—
<i>Myrocystis aeruginosa</i>	П	К
CHRYSOPHYCEAE		
<i>Octactis speculum</i>	О	К
DINOPHYCEAE		
<i>Protoperidinium ovatum</i>	О	К

Примечание. Эк/Х — экологическая характеристика: Н — неритический, О — океанический, П — панталассный, Б — бентический; Гео/Х — географическая характеристика: АБ — аркто-бореальный, ТБ — тропическо-бореальный, ТАБ — тропическо-аркто-бореальный, К — космополит.

Наибольшее обилие фитопланктона отмечено в речной зоне, на первых трех станциях, при этом численность была максимальной на ст. 1, а биомасса — на ст. 3 (рис. 4). Здесь преобладали типовые диатомовые виды, характерные для чистых вод, — *Hannaea arcus* и *Navicula directa*. В эстуарии высокие биомассы фитопланктона отмечены на границе между его внутренней и внешней зонами, где присутствовали крупноклеточные диатомовые водоросли (*Grammatophora marina*, *Cymbella* sp., *Thalassiothrix longissima* и др.), что указывает на повышенную продуктивность этого участка. Но в целом обилие фитопланктона на акватории эстуария р. Киевка было невысоким, характерным для олиготрофных вод. На всех станциях в зоне эстуария (ст. 6–11) биомасса фитопланктона находилась в постоянном соотношении с расчетными величинами первичной продукции (коэффициент корреляции $R = 0,8$), причем численные значения этих разноразмерных параметров оказались похожими (биомасса от 0,05 до 0,21 г/м³, первичная продукция от 0,02 до 0,23 гС/м³км).

В составе фитопланктона доминировали 13 видов микроводорослей: преобладающими по численности на разных станциях были 5 видов, по биомассе — 10 (табл. 3, 4). Все они представляют диатомовые водоросли, что характерно для эстуариев рек Приморья [Колпаков, Бегун, 2014]. Наибольшая численность отмечена у пеннатной диатомеи *Hannaea arcus* (до 46 % от общей численности микроводорослей в пробе), наибольшая биомасса — у центрического вида *Coscinodiscus oculus-iridis* (до 84 % от общей биомассы микроводорослей в пробе).

Таблица 3
Доля численности доминирующих видов микроводорослей по станциям, %Table 3
Percentage of the dominant species in the total abundance of microalgae, by station

Вид	Станция										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Fragilaria striatula</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	25	—	—
<i>Hannaea arcus</i>	33	38	28	24	40	46	41	—	—	—	—
<i>Leptocylindrus danicus</i>	—	—	—	—	—	—	—	33	—	—	—
<i>Navicula directa</i>	32	30	28	23	—	—	—	—	—	—	—
<i>Navicula transitans</i> var. <i>derasa</i>	—	—	—	35	—	—	—	—	—	—	—

Доля биомассы доминирующих видов микроводорослей по станциям, %
Percentage of the dominant species in the total biomass of microalgae, by station

Вид	Станции										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	—	—	—	37	—	—	—	84	—	—	—
<i>Cymbella</i> sp.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23
<i>Halamphora granulata</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20	—
<i>Hannaea arcus</i>	44	—	—	—	—	—	23	—	—	—	—
<i>Navicula directa</i>	20	22	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Odontella aurita</i>	—	—	—	—	—	34	—	—	23	—	—
<i>Pleurosigma formosum</i>	—	—	—	—	20	—	—	—	—	—	—
<i>Tabularia tabulata</i>	—	—	—	—	25	—	23	—	25	31	—
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>	—	28	45	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Thalassiothrix longissima</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24	—

Перенасыщение кислородом в поверхностном слое на всем протяжении нижнего течения реки и эстуария указывает на активные продукционные процессы, происходящие на всех исследованных участках, особенно в речных водах и в районе бара. На всем исследованном участке можно отметить два участка с наиболее низкими значениями AOU — в нижнем течении реки и во внешнем эстуарии, где, вероятно, фотосинтез происходит наиболее активно.

Повышенные биомассы фитопланктона присутствуют на этих же участках, что является косвенным подтверждением их высокой продуктивности. Максимальные величины биомассы и численности фитопланктона наблюдались на речных станциях, возможно, что в период исследований «цветение» происходило и выше по течению реки (выше ст. 1) и достаточно большая масса фитопланктона могла быть принесена на исследуемые станции (ст. 1–3) потоком. Подобные случаи были зафиксированы и рассмотрены, например для крупного эстуария р. Обь, где в речной зоне биомасса и численность фитопланктона были существенно выше в сравнении с внутренним и внешним эстуарием [Суханова и др., 2010]. При исследованиях распределения фитопланктона в эстуариях разных климатических зон также были отмечены максимальные величины биомассы и численности в речной зоне [Лепская, 2014; Лужняк, 2017; Радченко и др., 2019]. По гидрохимическим и термohалинным параметрам в нижнем течении р. Киевка (ст. 1–6) можно отметить однородность показателей от поверхности и до дна, что характерно для речных систем. Изменения концентраций биогенных элементов на разрезе в направлении от речной к мористой части эстуария в основном носили неконсервативный характер, т.е. определялись не смешением морских и речных вод, а биогеохимическими процессами [Kaul, Froelich, 1984; Звалинский и др., 2005].

При этом в области внутреннего эстуария происходит не снижение по мере потребления, а рост концентраций биогенных элементов, что рассматривается как последствие деструкции, а не продукции органического вещества. Однако показатели биохимического потребления кислорода в пробах воды, отобранных в поверхностном слое речных вод, относительно низкие, т.е. речная вода сама по себе не несет растворенные и взвешенные органические вещества, которые могли бы разлагаться во внутреннем эстуарии и обеспечивать наблюдаемый рост концентраций минерального фосфора и азота. Судя по балансу фосфора, во внутреннем эстуарии в целом все же преобладает деструкция, а формирование префицита кислорода у его поверхности обусловлено затрудненным газообменом между поверхностным и придонным слоями, так как образующийся в процессе фотосинтеза избыточный кислород легче уходит в атмосферу, чем в придонный слой. Вероятно, существует внешний источник поступления биогенных элементов в систему поверхностного слоя эстуария. Помимо

поступления непосредственно с береговых источников после дождя (архив осадков на сайте rogadaiklimat.ru), таким источником может быть придонный слой внешнего эстуария, где накапливаются органические отложения, как при оседании органической взвеси в условиях замедления течения реки, так и в процессе флокуляции растворенного органического вещества. Это можно проследить по изменениям концентрации железа на исследованных станциях, поскольку железо образует прочные комплексы с растворенным органическим веществом и резкое снижение концентраций на границе между внутренним и внешним эстуарием типично для устьевых областей рек мира [Гордеев, 2012]. Наблюдаемый рост концентраций биогенных элементов у поверхности внутреннего эстуария отражает процесс активной деструкции органического вещества у дна, на которую не расходуется кислород из поверхностного слоя, более того, в поверхностном слое происходит продуцирование органического вещества на основе как терригенных, так и регенерированных биогенных элементов.

Во внешнем эстуарии концентрация фосфатов меньше потенциальных значений, префицит кислорода достигает наибольших значений, биомасса фитопланктона возрастает — все это является признаками преобладания продукционных процессов. Для этого здесь формируются необходимые условия: хорошая освещенность, обеспечиваемая высокой прозрачностью воды (от 0,2 м в речной зоне до 1,0–1,5 м во внешнем эстуарии), прошедшей через эстуарные фильтры, и резкой плотностной стратификацией, и высокие концентрации биогенных элементов, которые в процессе прохождения внутреннего эстуария возрастали благодаря добавлению к терригенному ионному стоку (сравнительно небольшому у р. Киевка) регенерированных в ходе деструкции их минеральных форм.

Рассчитанные величины первичной продукции в эстуарии р. Киевка относительно невелики для весеннего сезона (максимум 0,23 гС/м³км), ниже величин деструкции (до 0,70 гС/м³км). Подобные показатели первичной продукции были рассчитаны для весенних съемок в эстуарии р. Раздольной [Важова, Зуенко, 2015]. Из-за активной деструкции количество регенерированного в эстуарии р. Киевка минерального фосфора превышает количество принесенного рекой терригенного фосфора, поэтому органическое вещество в этом эстуарии синтезируется в основном на основе рециклинга фосфатов. Ранее было показано [Важова, Зуенко, 2015], что в эстуарии горной и сравнительно бедной терригенными фосфатами р. Суходол рециклинг обеспечивает более половины продукции. Результаты, полученные для эстуария р. Киевка, подтверждают важный вклад рециклинга в продуктивность эстуарных экосистем, поскольку в эстуариях, где применяли данную методику расчетов [Важова, Зуенко, 2015; Курносова и др., 2022], выявлены участки активной деструкции, которая обеспечивала до половины биогенных веществ, используемых в пределах эстуариев для продукции органического вещества.

Заключение

Проведенные исследования показали, что воды р. Киевка весной сравнительно бедны биогенами, поэтому первичная продукция в ее эстуарии обеспечивается преимущественно фосфатами, минерализованными во внутренней части эстуария. Фитопланктон наиболее обилен в нижнем течении реки и вблизи границы между внутренней и внешней частями эстуария, при этом в целом трофность эстуария р. Киевка невысокая. Рециклинг фосфатов происходит в нижнем течении реки и во внутреннем эстуарии, предположительно в придонном слое. Реминерализованный фосфор используется фитопланктоном как сразу же, обеспечивая фотосинтез в поверхностном слое внутреннего эстуария, так и ниже по течению, прежде всего в верхней части внешнего эстуария. Полагаем, что гидрохимические условия в эстуарии р. Киевка характерны для горных рек Приморья с минимальным антропогенным влиянием, а продукционно-деструкционные процессы характеризуют фоновый режим функционирования их эстуарных экосистем.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией промысловой океанографии ТИНРО, д.г.н. Ю.И. Зуенко за помощь в интерпретации расчетов первичной продукции. Работа частично выполнена в Центре коллективного пользования «Приморский океанариум» ННЦМБ ДВО РАН (г. Владивосток).

The authors are grateful to Dr. Yury Zuenko (TINRO) for help in interpreting primary production calculations. The study was partially conducted at the Center for Collective Use "Primorsky Oceanarium" of the National Scientific Center for Marine Biology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok).

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 — А.С. Курносова; проведение лабораторных анализов — А.С. Курносова (гидрохимический анализ), М.А. Шульгина (определение фитопланктона); расчеты, написание статьи — А.С. Курносова, М.А. Шульгина.

Research concept — A.S. Kurnosova; laboratory analysis — A.S. Kurnosova (water chemistry) and M.A. Shulgina (phytoplankton); data processing and text writing and illustrating — A.S. Kurnosova and M.A. Shulgina.

Список литературы

Важова А.С. Сезонные изменения концентраций биогенных веществ и содержания растворенного кислорода в реках южного Приморья // Изв. ТИНРО. — 2017. — Т. 191. — С. 210–222. DOI: 10.26428/1606-9919-2017-191-210-222.

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.

Гордеев В.В. Геохимия системы река–море : моногр. — М. : ИП Матушкина И.И., 2012. — 452 с.

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.

Звалинский В.И., Тищенко П.Я. Биогенные элементы в эстуариях. Поведение и биогеохимия // 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.

Зуенко Ю.И., Рачков В.И. Основные черты гидрологического и гидрохимического режима вод бухты Киевка (Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2003. — Т. 133. — С. 303–312.

Колпаков Н.В., Бегун А.А. Состав и распределение микроводорослей в эстуарии реки Суходол (Уссурийский залив, залив Петра Великого) в осенний период. 1. Фитопланктон // Изв. ТИНРО. — 2014. — Т. 176. — С. 115–126. DOI: 10.26428/1606-9919-2014-176-115-126.

Колпаков Н.В., Долганова Н.Т., Надточий В.А. и др. Экосистемные исследования биоресурсов прибрежных и эстуарных вод южного Приморья // ТИНРО—85. Итоги десятилетней деятельности. 2000–2010 гг. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2010. — С. 103–128.

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

Лепская Е.В. Фитопланктон эстуария реки Камчатки // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2014. — № 32. — С. 5–20.

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

Лужняк О.Л. Современное состояние фитопланктона нижнего течения реки Дон в условиях антропогенного преобразования стока // Вода: химия и экология. — 2017. — № 9(111). — С. 11–19.

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

Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек : моногр. — М. : ГЕОС, 1997. — 176 с.

Нестерова Д.А., Висиленко Л.С. Размерная характеристика массовых видов фитопланктона западной части Черного моря // Гидробиол. журн. — 1986. — Т. 22, вып. 3. — С. 16–21.

Одум Ю. Экология : моногр. — М. : Мир, 1986. — Т. 1. — 328 с.

Радченко И.Г., Ильях Л.В., Шевченко В.П. и др. Пространственное распределение фитопланктона в субарктическом эстуарии (река Кемь, Белое море) // Океанол. — 2019. — Т. 59, № 3. — С. 335–346. DOI: 10.31857/S0030-1574593335-346.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18 : Дальний Восток, вып. 3 : Приморье / под ред. М.Г. Васильковского. — Л. : Гидрометиздат, 1972. — 628 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.

Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Михайлик Т.А. и др. Гидрохимические исследования эстуария реки Партизанской (залив Находка, Японское море) в период летней межени // Изв. ТИНРО. — 2018. — Т. 193. — С. 143–152. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-143-152.

Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Ходоренко Н.Д. и др. Продукционно-деструкционные процессы в эстуариях рек Артемовка и Шкотовка (Уссурийский залив) в летний сезон // Вод. ресурсы. — 2015. — Т. 42, № 3. — С. 311–321. DOI: 10.7868/S0321059615030177.

Суханова И.Н., Флинт М.В., Мошаров С.А., Сергеева В.М. Структура сообществ фитопланктона и первичная продукция в Обском эстуарии и на прилегающем Карском шельфе // Океанол. — 2010. — Т. 50, № 5. — С. 785–800.

Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Павлова Г.Ю. и др. Гидрохимия эстуария реки Туманной (Японское море) // Океанол. — 2018. — Т. 58, № 2. — С. 192–204. DOI: 10.7868/S003015741802003X.

Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Тищенко П.П. и др. Гипоксия придонных вод эстуария реки Раздольная // ДАН. — 2017. — Т. 476, № 5. — С. 576–580. DOI: 10.7868/S0869565217290217.

Федоров В.Д. О методах изучения фитопланктона и его активности : моногр. — М. : МГУ, 1979. — 168 с.

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.

Kaul L.W., Froelich P.N., Jr. Modeling estuarine nutrient geochemistry in a simple system // Geochim. Cosmochim. Acta. — 1984. — Vol. 48, Iss. 7. — P. 1417–1433. DOI: 10.1016/0016-7037(84)90399-5.

Libes S. Introduction to Marine Biogeochemistry. 2nd ed. — San Diego : Academic Press, 2009. — 909 p.

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

McLusky D.S., Elliott M. The Estuarine Ecosystem: ecology, threats and management, 3rd edn. — Oxford : OUP, 2004. — 216 p.

Sun J., Liu D. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton // J. Plankt. Res. — 2003. — Vol. 25, Iss. 11. — P. 1331–1346. DOI: 10.1093/plankt/fbg096.

Utermöhl H. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik // Mitteilungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie. — 1958. — Vol. 9. — P. 1–38.

Weiss R.F. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. — 1970. — Vol. 17, Iss. 4. — P. 721–735. DOI: 10.1016/0011-7471(70)90037-9.

References

- Vazhova, A.S.**, Seasonal dynamics of nutrients concentration and dissolved oxygen content in the rivers of southern Primorye, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2017, vol. 191, pp. 210–222. doi 10.26428/1606-9919-2017-191-210-222
- 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, pp. 132–143. doi 10.26428/1606-9919-2015-182-132-143
- Gordeev, V.V.**, *Geokhimiya sistemy reka–more* (Geochemistry of the river–sea system), Moscow: IP Matushkina I.I., 2012.
- Zvalinsky, V.I., Nedashkovsky, A.P., Sagalayev, 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. doi 10.1007/s11179-005-0049-y
- Zvalinsky, V.I. and Tishchenko, P.Ya.**, Biogenic elements in estuaries, behaviour and biogeochemistry, in *Sostoyaniye morskikh ekosistem, nakhodyashchikhsya pod vliyaniyem rechnogo stoka* (State of marine ecosystems influenced by river flow), Vladivostok: Dalnauka, 2005, pp. 89–124.
- Zuenko, Yu.I.**, *Promyslovaya okeanologiya Yaponskogo morya* (Fisheries Oceanography of the Japan Sea), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2008.
- Zuenko, Yu.I. and Rachkov, V.I.**, General features of oceanographic and hydro-chemical regime of the Kiyevka Bay (Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2003, vol. 133, pp. 303–312.
- Kolpakov, N.V. and Begun, A.A.**, Species composition and distribution of microalgae in the Sukhodol River estuary (Ussury Bay, Peter the Great Bay) in autumn. 1. Phytoplankton, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2014, vol. 176, pp. 115–126. doi 10.26428/1606-9919-2014-176-115-126
- Kolpakov, N.V., Dolganova, N.T., Nadtochii, V.A., Nadtochii, V.V., Gusarova, I.S., Galyshcheva, Yu.A., Lukyanova, O.N., Milovankin, P.G., Bezrukov, R.G., and Bogacheva, S.V.**, Ecosystem studies of bioresources of coastal and estuarine waters in southern Primorsky Krai, in *TINRO—85. Itogi desyatiletnei deyatel'nosti. 2000–2010 gg.* (TINRO—85. Results of the One-Decade Activity. 2000–2010), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2010, pp. 103–128.
- Kurnosova, A.S., Zuenko, Yu.I., and 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, doi 10.26428/1606-9919-2022-202-917-932. EDN: IZYFHO.
- Lepskaya, E.V.**, The Phytoplankton of the Kamchatka River estuary, in *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2014, vol. 32, pp. 5–20.
- Lisitsyn, A.P.**, Marginal filter of the oceans, *Oceanology*, 1994, vol. 34, no. 5, pp. 735–747.
- Luzhnyak, O.L.**, Present-day status of the phytoplankton of the lower Don under conditions of man-made changes in the river runoff, *Voda: khimiya i ekologiya*, 2017, no. 9(111), pp. 11–19.
- Mamaev, O.I.**, *Termokhalinnyy 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.
- Nesterova, D.A. and Visilenko, L.S.**, Size characteristics of common phytoplankton species in the western part of the Black Sea, *Gidrobiol. Zh.*, 1986, vol. 22, no. 3, pp. 16–21.
- Odum, E.P.**, *Ecology*, New York: Holt, Rinehart and Winston, 1963.
- Radchenko, I.G., Ilyash, L.V., Shevchenko, V.P., Zdorovenov, R.E., Novigatsky, A.N., Politova, N.V., and Tolstikov, A.V.**, Spatial distribution of phytoplankton in the subarctic estuary (Kem' River, the White Sea), *Oceanology*, 2019, vol. 59, no. 3, pp. 305–315. doi 10.1134/S0001437019030184
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 18: Dal'nii Vostok, vyp. 3: Primor'ye* (Surface Water Resources in the USSR, vol. 18: Far East, no. 3: Primorye), Vaskovsky, M.G., ed., Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972.
- Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskoy monitoringe rybokhozyaystvennykh vodoyemov i perspektivnykh dlya promysla rayonov Mirovogo okeana* (Guidelines for chemical analysis of marine and freshwater in the environmental monitoring of fishing reservoirs and promising areas for fishing of the oceans), Sapozhnikov, V.V., ed., Moscow: VNIRO, 2003.

Semkin, P.Yu., Tishchenko, P.Ya., Mikhailik, T.A., Barabanshchikov, Yu.A., Pavlova, G.Yu., Sagalaev, S.G., Tishchenko, P.P., Shvetsova, M.G., and Shkirnikova, E.M., Hydrochemical studies of the Partizanskaya River estuary (Nakhodka Bay, Japan Sea) in summer season of low water discharge, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2018, vol. 193, pp. 143–152. doi 10.26428/1606-9919-2018-193-143-152

Semkin, P.Y., Tishchenko, P.Y., Khodorenko, N.D., Zvalinskii, V.I., Mikhailik, T.A., Sagalaev, S.G., Stepanova, V.I., Tishchenko, P.P., Shvetsova, M.G., and Shkirnikova, E.M., Production-destruction processes in estuaries of the rivers of Artemovka and Shkotovka (Usuri Bay) in summer, *Vodn. Resur.*, 2015, vol. 42, no. 3, pp. 352–361. doi 10.1134/S0097807815030161

Sukhanova, I.N., Flint, M.V., Mosharov, S.A., and Sergeeva, V.M., Structure of the phytoplankton communities and primary production in the Ob River estuary and over the adjacent Kara Sea shelf, *Oceanology*, 2010, vol. 50, no. 5, pp. 743–758. doi 10.1134/S0001437010050115

Tishchenko, P.Ya., Semkin, P.Yu., Pavlova, G.Yu., Tishchenko, P.P., Lobanov, V.B., Marjash, A.A., Mikhailik, T.A., Sagalaev, S.G., Sergeev, A.F., Tibenko, E.Y., Khodorenko, N.D., Chichkin, R.V., Shvetsova, M.G., and Shkirnikova, E.M., Hydrochemistry of the Tumen River Estuary, Sea of Japan, *Oceanology*, 2018, vol. 58, no. 2, pp. 175–186. doi 10.1134/S0001437018010149

Tishchenko, P.Ya., Semkin, P.Ju., Tishchenko, P.P., Zvalinsky, V.I., Barabanshchikov, Yu.A., Mikhailik, T.A., Sagalaev, S.G., Shvetsova, M.G., Shkirnikova, E.M., and Shulkin, V.M., Hypoxia of bottom waters of the Razdolnaya River Estuary, *Dokl. Earth Sci.*, 2017, vol. 476, no. 2, pp. 1207–1211. doi 10.1134/S1028334X17100208

Fedorov, V.D., *O metodakh izucheniya fitoplanktona i ego aktivnosti* (On the Methods for the Study of Phytoplankton and Its Activity), Moscow: Moscow Gos. Univ., 1979.

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.

Kaul, L.W. and Froelich, P.N., Jr., Modeling estuarine nutrient geochemistry in a simple system, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1984, vol. 48, no. 7, pp. 1417–1433. doi 10.1016/0016-7037(84)90399-5

Libes, S., *Introduction to Marine Biogeochemistry*, 2nd edition, San Diego: Academic Press, 2009.

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

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

Sun, J. and Liu, D., Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton, *J. Plankt. Res.*, 2003, vol. 25, no. 11, pp. 1331–1346. doi 10.1093/plankt/fbg096

Utermöhl, H., Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik, *Mitteilungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 1958, vol. 9, pp. 1–38.

Weiss, R.F., The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater, *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1970, vol. 17, no. 4, pp. 721–735. doi 10.1016/0011-7471(70)90037-9

pogodaiklimat.ru. Cited July 11, 2022.

Поступила в редакцию 3.11.2023 г.

После доработки 30.11.2023 г.

Принята к публикации 30.11.2023 г.

The article was submitted 3.11.2023; approved after reviewing 30.11.2023;
accepted for publication 30.11.2023