

УДК 573.22.087: 577.355

ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ И РАЙОНИРОВАНИЕ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА ГДАНЬСКОГО БАСЕЙНА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

© 2019 г. Е. А. Кудрявцева¹, С. В. Александров²

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Калининград, Россия

e-mail: kudryavtzeva@rambler.ru

Поступила в редакцию 27.07.2017 г.

В российском секторе Гданьского бассейна Балтийского моря, по данным многолетних исследований (2003–2015 гг.), выделены закономерности распределения абсолютных и удельных величин первичной продукции в верхнем десятиметровом слое, обусловленные физическими и химическими условиями морской среды (температура, соленость, глубина, рельеф и форма береговой линии, концентрация биогенных элементов). На основе этого было выполнено районирование исследованной акватории: район м. Таран, район сочленения Самбийского полуострова и Куршской косы, район п. Рыбачий, открытое море и российский участок Гданьского залива. Выделенные районы характеризуются лучшими корреляционными связями первичной продукции и показателей состояния морской среды по сравнению с результатами регрессионного анализа в районах, выделенных по батиметрическому принципу. Наиболее тесно первичная продукция связана с уровнем прогрева вод на всей исследуемой акватории и с концентрациями биогенных элементов в мористых районах.

Ключевые слова: первичная продукция, хлорофилл «а», биогенные элементы, Балтийское море, Гданьский бассейн, районирование

DOI: https://doi.org/10.31857/S_0030-15745956-71

ВВЕДЕНИЕ

Гданьский бассейн расположен в юго-восточной части Балтийского моря и соответствует выделяющейся в рельефе его дна Гданьской впадине, которая представляет собой чашеобразную котловину с максимальной глубиной 110 м, вытянутую в субмеридиональном направлении [5, 21]. Южный склон впадины, включающий Гданьский залив, достаточно узок, северо-восточный склон впадины относительно пологий. Гидрологические и гидрохимические условия Гданьского бассейна отличаются значительной пространственно-временной изменчивостью. Причиной этой изменчивости является сложное взаимодействие между морскими и пресными водами, поступающими с побережья: на юге и северо-востоке в Гданьский залив впадают вторая (р. Висла) и третья (р. Неман) по объемам ежегодного стока реки Балтийского моря. Другой причиной изменчивости являются неоднородность антропогенной

нагрузки со стороны водосборного бассейна и морфометрические характеристики акватории. В свою очередь, вариативность абиотических факторов создает предпосылки для значительной пространственно-временной изменчивости первичной продукции в этом районе.

Районирование акватории Гданьского бассейна по различным показателям было проведено в ряде работ, посвященных изучению его польского и литовского секторов. Батиметрический принцип, позволяющий анализировать концентрации различных веществ и распределение морских организмов по мере удаления от побережья, был применен ранее с учетом положения гидрологических и гидрохимических фронтов в устьях [20, 22, 24, 28], изменений оптических свойств вод [33] и состава морских организмов [29]. В российском секторе Гданьского бассейна при исследованиях вдольбереговых течений и миграций наносов выявлена граница береговой зоны, определяемая

как область наиболее сильного динамического воздействия гидросферы на литосферу [1]. По изобатам 28–32 м можно приблизительно выделить районы с преобладанием условий, характерных для открытого моря, и районы, находящиеся под сильным влиянием побережий. Однако количественные оценки комплекса гидрологических, гидрохимических и гидробиологических показателей в этих районах никогда ранее не приводились. Исторически сложилось, что основные исследования отечественными учеными проводились в центральных частях основных гидрографических регионов Балтийского моря и не затрагивали акваторию российского сектора Гданьского бассейна.

С 2003 г. начался новый этап исследования российского сектора Гданьского бассейна Балтийского моря, связанный с началом экологического мониторинга Кравцовского нефтяного месторождения. Комплексные исследования позволили впервые выявить среднесезонные пространственные распределения ряда важнейших показателей, обычно используемых при описании условий морской среды [7, 11, 14, 16, 19]. В их числе были получены предварительные данные по первичной продукции фитопланктона и концентрациям хлорофилла «а», учитывающие сезонные изменения пространственного распределения этих величин [10]. Однако комплексный анализ зависимости данных показателей от гидрологических и гидрохимических условий выполнен не был. Поэтому целями работы являлись: (1) изучение связи пространственного распределения величин первичной продукции фитопланктона с физическими и химическими процессами морской среды и (2) районирование акватории российского сектора Гданьского бассейна Балтийского моря и характеристика выделенных районов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в российском секторе Гданьского бассейна в конце зимнего (начало марта), в весенний (конец апреля - май), летний (июнь-июль) и осенний (октябрь-ноябрь) сезоны 2003-2015 гг. в основном в рейсах НИС «Профессор Штокман», а также в рейсах НИС «Шельф», МРТК «Ассаной», МРТК 1073, МРТК 1129, «Норд-3». Сетка станций наблюдений показана на рис. 1. Пробы воды отбирали 5-литровыми батометрами, установленными на зондирующем комплексе Rosette.



Рис. 1. Расположение станций наблюдений в 2003-2015 гг.: 1 – станции экологического мониторинга нефтедобывающей платформы Д6, 2 – точки наблюдений в 88 рейсе НИС «Профессор Штокман», 3 – в 103 рейсе НИС «Профессор Штокман», 4 – в рейсе МРТК «Ассаной», 5 – в период съемки на «Норд-3».

В экспедициях определялись следующие показатели: температура, соленость, относительная прозрачность по диску Секки, первичная продукция и биомасса фитопланктона, концентрации хлорофилла «а» и биогенных элементов. В 2006-2009 гг. наземный люксметр «ТКА-ЛЮКС» (диапазон измерений 400-700 нм, Россия) использовался для учета светового потока, пришедшего к поверхности моря в течение дня [18]. Для перевода единиц освещенности в энергетические единицы принималось, что 1 лк приблизительно равен $6 \cdot 10^6$ кал·см⁻²·мин⁻¹ для солнечного света на поверхности моря [31].

Измерения солености и температуры воды проводили с помощью STD-зондов (Mark III Niel Brown Inst, YSI 600XLM, CTD90M See&Sun Technology). Результаты изучения пространственно-временной изменчивости структуры температуры опубликованы в работах [7, 14].

Первичную продукцию фитопланктона измеряли с помощью радиоуглеродной модификации скляночного метода [30] на сцинтилляционных счетчиках Mark-2 и Rackbeta (Швеция). Использовали склянки объемом 310 мл, в которые добавляли 100 мкл рабочего раствора, меченного по углероду бикарбоната натрия ($\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$), активностью 1-5 мкКю. Склянки

инкубировали в проточном аквариуме на палубе судна от 4 до 10 часов. Пробы фильтровали через капроновые фильтры (ООО «Катехол Хром») с размером пор 0.2 мкм. После фильтрации фильтры смачивали 1%-м раствором соляной кислоты для удаления остатков изотопов. Методика определения первичной продукции подробно опубликована в работе [10].

Определение содержания хлорофилла «а» выполнено на спектрофотометре LEKI SS 2109 UV (Финляндия) по методике, согласно [12]. Гидрохимические анализы были выполнены стандартными методами [13]. Минеральный азот был определен суммированием индивидуальных форм неорганического азота: $N_{\text{мин}} = \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$. Органические формы азота и фосфора определялись с 2008 г. и были получены вычитанием значений минеральных форм из их валовых концентраций: $N_{\text{орг}} = N_{\text{вал}} - N_{\text{мин}}$ и $P_{\text{орг}} = P_{\text{вал}} - \text{PO}_4^{3-}$.

Чтобы приблизить распределение данных к нормальному, применена логарифмическая трансформация к данным по температуре, первичной продукции, биомассе фитопланктона, концентрации хлорофилла «а» и концентрации биогенных элементов.

Данные были распределены по районам согласно классификации Андрияшевича, разработанной для Гданьского залива, для которого выделены закрытые прибрежные участки с глубинами 0-10 м и открытые прибрежные участки с глубинами 10-20 м; открытые районы с глубинами >20 м, которые в свою очередь подразделены на участки с глубинами 20-40 м, периодически подвергающиеся влиянию берега, и участки исключительно с условиями открытого моря с глубинами >40 м [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Связь пространственного распределения первичной продукции с гидрологическими и гидрохимическими условиями в разные сезоны. В конце зимнего периода отмечаются наиболее существенные пространственные различия в оптических свойствах вод российского сектора Гданьского бассейна Балтийского моря. Береговая зона характеризуется относительно повышенной мутностью вод, которая сокращает глубину фотической зоны. Относительная прозрачность воды здесь составляет 4.3 ± 1.3 м, тогда как в открытых морских районах она достигает 11.2 ± 1.5 м (табл. 1).

Таблица 1. Среднегодовое показатели состояния морской среды, осредненные в верхнем десятиметровом слое российского сектора Гданьского бассейна, в группах станций, выделенных по батиметрическому принципу

Показатель	Сезон	Район с глубинами 0-20 м	Район с глубинами 20-40 м	Район с глубинами >40 м
Температура, °C	зима	$\frac{0.87 \pm 0.76}{-0.39 \div 2.30}$ (26)	$\frac{1.46 \pm 0.88}{-0.38 \div 1.93}$ (22)	$\frac{2.22 \pm 0.49}{1.12 \div 3.60}$ (28)
	весна	$\frac{7.73 \pm 2.57}{4.26 \div 13.40}$ (29)	$\frac{7.10 \pm 1.96}{4.09 \div 10.74}$ (21)	$\frac{6.93 \pm 1.83}{4.09 \div 9.74}$ (27)
	лето	$\frac{18.07 \pm 1.63}{14.60 \div 21.53}$ (55)	$\frac{18.22 \pm 1.66}{14.69 \div 21.64}$ (47)	$\frac{17.90 \pm 1.51}{13.49 \div 21.36}$ (56)
	осень	$\frac{12.38 \pm 1.20}{1.92 \div 10.00}$ (38)	$\frac{13.36 \pm 2.06}{9.42 \div 16.65}$ (29)	$\frac{13.44 \pm 2.59}{9.46 \div 16.90}$ (28)
Соленость, psu	зима	$\frac{7.20 \pm 0.24}{6.69 \div 7.51}$ (26)	$\frac{7.31 \pm 0.15}{7.06 \div 7.45}$ (22)	$\frac{7.38 \pm 0.12}{6.99 \div 7.57}$ (28)
	весна	$\frac{6.99 \pm 0.16}{6.58 \div 7.48}$ (29)	$\frac{7.13 \pm 0.20}{6.24 \div 7.48}$ (21)	$\frac{7.31 \pm 0.16}{6.09 \div 7.53}$ (27)
	лето	$\frac{6.73 \pm 0.40}{6.03 \div 7.17}$ (55)	$\frac{6.97 \pm 0.23}{6.24 \div 7.32}$ (47)	$\frac{7.04 \pm 0.23}{6.04 \div 7.40}$ (56)
	осень	$\frac{7.02 \pm 0.18}{6.44 \div 7.30}$ (38)	$\frac{7.20 \pm 0.09}{7.03 \div 7.40}$ (21)	$\frac{7.23 \pm 0.17}{6.30 \div 7.47}$ (29)
Прозрачность, м	зима	$\frac{4.3 \pm 1.3}{2.5 \div 7.0}$ (13)	$\frac{9.1 \pm 2.1}{4.0 \div 12.0}$ (15)	$\frac{11.2 \pm 1.5}{8.0 \div 14.0}$ (12)
	весна	$\frac{4.4 \pm 1.3}{2.5 \div 7.5}$ (29)	$\frac{6.9 \pm 0.8}{2.5 \div 13.0}$ (19)	$\frac{7.9 \pm 1.5}{4.0 \div 12.0}$ (17)
	лето	$\frac{3.5 \pm 0.9}{2.0 \div 5.5}$ (50)	$\frac{3.9 \pm 0.4}{2.5 \div 6.0}$ (31)	$\frac{4.0 \pm 0.4}{2.0 \div 5.0}$ (37)
	осень	$\frac{3.5 \pm 1.5}{1.5 \div 8.0}$ (27)	$\frac{6.0 \pm 1.7}{3.0 \div 11.0}$ (19)	$\frac{7.6 \pm 1.0}{5.5 \div 10.0}$ (17)

PO ₄ , мкг-ат/л	зима	$\frac{0.83 \pm 0.13 (26)}{0.48 \div 1.27}$	$\frac{0.80 \pm 0.15 (25)}{0.43 \div 1.13}$	$\frac{0.74 \pm 0.18 (29)}{0.40 \div 1.30}$
	весна	$\frac{0.45 \pm 0.48 (34)}{0.05 \div 1.61}$	$\frac{0.35 \pm 0.37 (24)}{0.03 \div 1.01}$	$\frac{0.50 \pm 0.39 (27)}{0.08 \div 1.89}$
	лето	$\frac{0.21 \pm 0.12 (67)}{0.03 \div 0.82}$	$\frac{0.17 \pm 0.12 (54)}{0.03 \div 0.87}$	$\frac{0.17 \pm 0.07 (48)}{0.03 \div 0.52}$
	осень	$\frac{0.42 \pm 0.09 (38)}{0.20 \div 0.78}$	$\frac{0.35 \pm 0.23 (30)}{0.09 \div 1.08}$	$\frac{0.35 \pm 0.21 (29)}{0.09 \div 0.87}$
NO ₃ , мкг-ат/л	зима	$\frac{7.19 \pm 2.71 (26)}{2.04 \div 14.11}$	$\frac{5.29 \pm 1.33 (25)}{2.67 \div 10.49}$	$\frac{5.04 \pm 2.08 (29)}{2.14 \div 10.91}$
	весна	$\frac{2.67 \pm 3.68 (34)}{0.14 \div 13.61}$	$\frac{1.30 \pm 1.37 (24)}{0.18 \div 4.63}$	$\frac{1.02 \pm 1.33 (27)}{0.12 \div 3.49}$
	лето	$\frac{0.93 \pm 0.64 (67)}{0.06 \div 7.87}$	$\frac{0.44 \pm 0.31 (54)}{0.07 \div 1.58}$	$\frac{0.47 \pm 0.30 (48)}{0.08 \div 4.38}$
	осень	$\frac{2.32 \pm 0.62 (38)}{0.49 \div 8.53}$	$\frac{1.42 \pm 0.33 (30)}{0.30 \div 5.44}$	$\frac{1.25 \pm 0.83 (29)}{0.18 \div 4.04}$
N _{мин} , мкг-ат/л	зима	$\frac{8.40 \pm 3.25 (26)}{2.39 \div 18.05}$	$\frac{6.43 \pm 1.69 (25)}{3.01 \div 11.63}$	$\frac{6.09 \pm 2.22 (29)}{2.69 \div 12.80}$
	весна	$\frac{4.73 \pm 3.89 (34)}{0.67 \div 15.27}$	$\frac{2.78 \pm 1.27 (24)}{0.92 \div 5.75}$	$\frac{2.60 \pm 1.58 (27)}{0.61 \div 8.19}$
	лето	$\frac{2.34 \pm 0.88 (67)}{0.50 \div 10.30}$	$\frac{1.59 \pm 0.61 (54)}{0.36 \div 4.18}$	$\frac{1.71 \pm 0.28 (48)}{0.36 \div 5.18}$
	осень	$\frac{4.57 \pm 1.25 (38)}{1.69 \div 10.84}$	$\frac{3.22 \pm 0.47 (30)}{1.25 \div 7.40}$	$\frac{3.28 \pm 1.17 (29)}{0.86 \div 8.40}$
P _{орг} , мкг-ат/л	зима	$\frac{0.78 \pm 0.08 (12)}{0.56 \div 1.06}$	$\frac{0.68 \pm 0.27 (3)}{0.51 \div 0.99}$	$\frac{0.29 \pm 0.10 (8)}{0.18 \div 0.39}$
	весна	$\frac{0.79 \pm 0.09 (36)}{0.51 \div 1.09}$	$\frac{0.60 \pm 0.03 (9)}{0.23 \div 2.05}$	$\frac{0.57 \pm 0.05 (22)}{0.40 \div 0.86}$
	лето	$\frac{0.73 \pm 0.11 (17)}{0.50 \div 1.24}$	$\frac{0.57 \pm 0.09 (23)}{0.46 \div 1.13}$	$\frac{0.34 \pm 0.07 (4)}{0.29 \div 0.44}$
	осень		$\frac{0.37 \pm 0.11 (8)}{0.11 \div 0.51}$	
N _{орг} , мкг-ат/л	зима	$\frac{26.84 \pm 4.33 (18)}{9.45 \div 51.20}$	$\frac{19.39 \pm 4.59 (3)}{16.53 \div 24.59}$	$\frac{16.51 \pm 4.12 (13)}{9.90 \div 24.92}$
	весна	$\frac{31.13 \pm 3.26 (42)}{20.62 \div 43.23}$	$\frac{25.91 \pm 13.68 (14)}{9.18 \div 59.75}$	$\frac{25.39 \pm 3.67 (27)}{11.96 \div 33.86}$
	лето	$\frac{23.71 \pm 3.88 (17)}{16.89 \div 33.83}$	$\frac{21.93 \pm 4.84 (8)}{17.20 \div 28.33}$	$\frac{22.12 \pm 3.43 (4)}{18.15 \div 25.21}$
	осень			
Первичная продукция, мгС·м ⁻³ ·сут ⁻¹	зима	$\frac{4.55 \pm 4.29 (17)}{0.38 \div 15.32}$	$\frac{4.68 \pm 5.95 (19)}{0.21 \div 22.55}$	$\frac{3.59 \pm 3.75 (21)}{0.36 \div 11.55}$
	весна	$\frac{69.73 \pm 56.94 (31)}{9.00 \div 196.4}$	$\frac{50.94 \pm 52.61 (22)}{11.67 \div 249.1}$	$\frac{54.79 \pm 54.13 (20)}{7.65 \div 187.7}$
	лето	$\frac{177.1 \pm 88.26 (55)}{34.90 \div 379.0}$	$\frac{159.9 \pm 84.19 (37)}{10.13 \div 351.1}$	$\frac{139.9 \pm 81.06 (41)}{33.46 \div 505.7}$
	осень	$\frac{88.26 \pm 106.6 (29)}{5.63 \div 415.0}$	$\frac{45.87 \pm 44.52 (15)}{10.70 \div 160.5}$	$\frac{43.64 \pm 42.18 (22)}{10.03 \div 187.6}$
Хлорофилл «а», мкг-ат/л	зима	$\frac{1.85 \pm 1.08 (26)}{0.90 \div 7.65}$	$\frac{1.20 \pm 0.53 (25)}{0.55 \div 5.35}$	$\frac{0.90 \pm 0.35 (29)}{0.49 \div 5.55}$
	весна	$\frac{3.32 \pm 4.79 (34)}{1.01 \div 16.13}$	$\frac{1.36 \pm 0.49 (24)}{0.97 \div 16.30}$	$\frac{0.95 \pm 0.71 (27)}{0.27 \div 7.10}$
	лето	$\frac{3.54 \pm 1.48 (67)}{1.28 \div 10.74}$	$\frac{3.43 \pm 1.79 (54)}{0.97 \div 16.30}$	$\frac{2.99 \pm 1.00 (48)}{1.49 \div 9.70}$
	осень	$\frac{3.13 \pm 4.79 (38)}{1.01 \div 16.13}$	$\frac{1.80 \pm 0.40 (30)}{1.25 \div 12.39}$	$\frac{1.76 \pm 0.60 (29)}{0.86 \div 7.52}$

Примечание. В числителе – среднее и стандартное отклонение, в скобках – количество данных, в знаменателе – пределы.

Одной из характерных черт горизонтального распределения температуры и солености в это время года является примыкание к берегу холодных (0.87 ± 0.76 °C) и относительно пресных (7.20 ± 0.24 psu) вод, на границе которых формируется фронтальный раздел с более теплыми (2.22 ± 0.79) и солеными (7.38 ± 0.12 psu) водами открытой части моря [14]. Наибольшее распространение относительно холодных пресных вод наблюдается у побережья Куршской косы, а также у север-

ного побережья Самбийского полуострова, где в Балтийское море впадают малые реки: Медвежья, Алейка, Забава, Спокойная, Мотыль, Чистая, Светлогорка и Зеленая (рис. 2). Суммарный ежегодный сток этих рек составляет около 0.048 км^3 [15]. Тем не менее эти водотоки оказывают существенное влияние на море в периоды повышенной водности во время паводков и половодья, в том числе за счет достаточно больших уклонов их русла (в среднем 5.7 м/км).

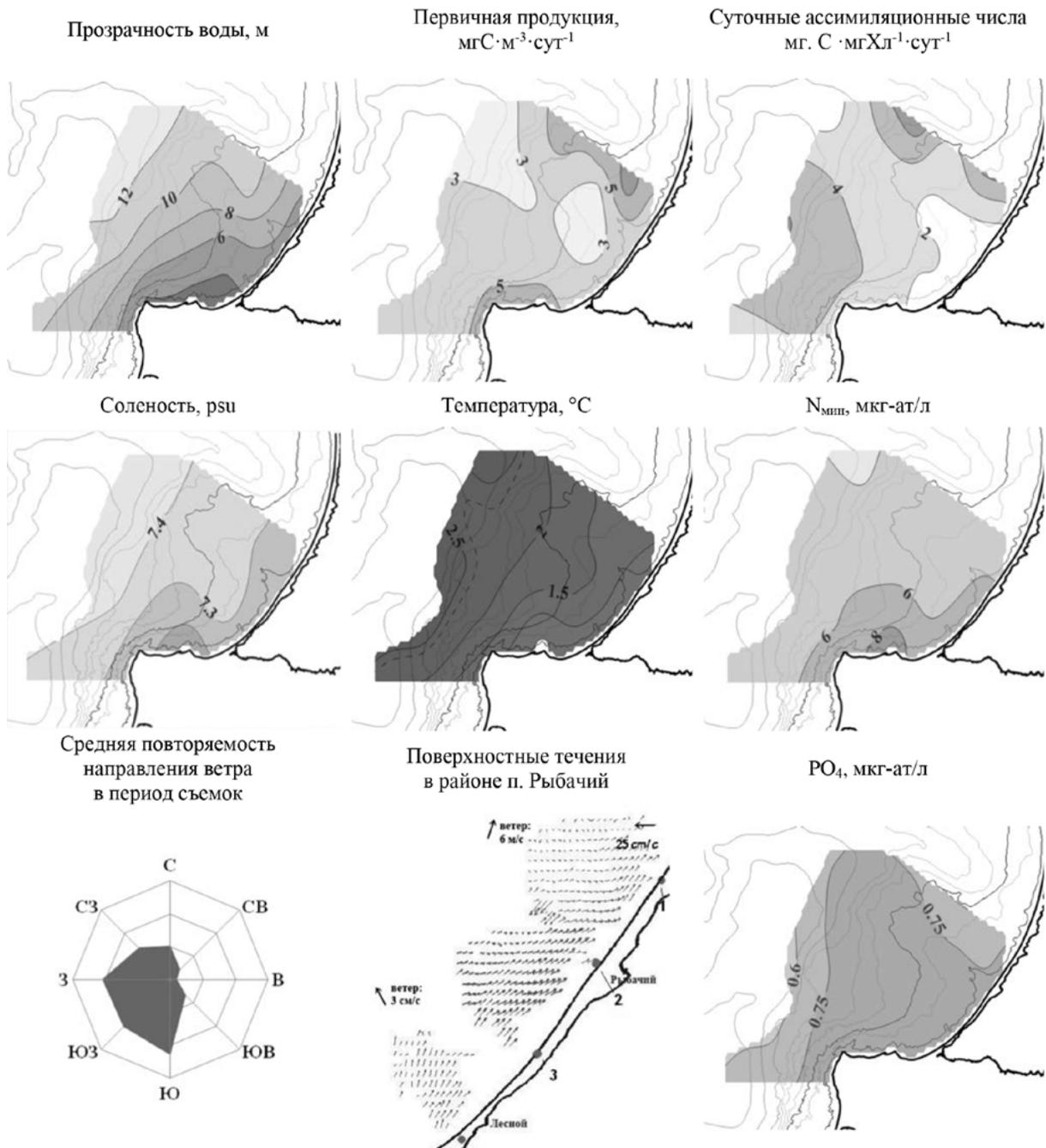


Рис. 2. Первичная продукция и суточные ассимиляционные числа в верхнем десятиметровом слое в зимний период на фоне распределения прозрачности, температуры, солености и концентраций биогенных элементов; направление ветра в период съемок и поверхностные течения вблизи Куршской косы, измеренные системой CODAR.

В относительно холодных водах, примыкающих к северному побережью Самбийского полуострова и району м. Таран, зимой отмечаются повышенные концентрации хлорофилла «а» (хл «а») (3.3 ± 2.2 мг/м³) и биомассы фитопланктона (238 ± 337 мг/м³) [10, 16]. Скопления клеток фитопланктона, как правило, наблюдаются в придонном слое. Однако, вследствие наиболее сильного воздействия ограничивающих факторов, повышенной мутности вод и низкой температуры, в береговой зоне скорость фотосинтеза (2.6 ± 4.4 мгС·мг хл«а»⁻¹·сут⁻¹) и первичная продукция (4.6 ± 4.3 мгС·м⁻³·сут⁻¹) ниже, чем в водах открытого моря.

Наибольшие величины первичной продукции (4.9 ± 6.3 мгС·м⁻³·сут⁻¹) и суточные ассимиляционные числа (34.0 ± 5.2 мгС·мг хл «а»⁻¹·сут⁻¹) отмечаются в северо-восточной части исследуемой акватории, в районе северо-восточного склона п. Рыбачий и Самбийско-Куршской возвышенности. Здесь с улучшением оптических условий фотосинтеза (относительная прозрачность 7.8 ± 2.2 м), увеличением температуры воды (1.25 ± 0.78 °С), а также вследствие турбулентного перемешивания в тени подводного поднятия, обусловленного интенсификацией течений за счет перепада глубин, создаются наиболее благоприятные условия для развития диатомовых водорослей, доминирующих в составе балтийского фитопланктона в конце зимы. Турбулентное перемешивание, если оно не слишком интенсивно, прямо способствует повышению продуктивности диатомовых водорослей, так как многие виды этого отдела, обладая относительно тяжелой оболочкой из кремния, в спокойной воде опускаются на дно.

Таким образом, на большей части акватории в районе Самбийско-Куршской возвышенности в зимний период наблюдаются неблагоприятные условия среды для фотосинтеза фитопланктона по сравнению с открытыми районами Гданьского бассейна. Вдобавок к слабой суточной облученности (ФАР 56 ± 37 кал·см⁻²·день⁻¹), связанной с небольшой продолжительностью дня и облачностью, частое штормовое возбуждение приводит к увеличению концентрации взвеси в береговой зоне. Полностью перемешанный от поверхности до дна слой воды на сравнительно небольших глубинах выхолаживается сильнее, чем на больших глубинах, где температура воды выше поверхностной температуры, верхний однородный слой получает приток тепла снизу за счет более высокой температуры ниже слоя выхолаживания [14]. Приток тепла с глубины и снижение мутности

воды обуславливают относительное увеличение скорости первичной продукции фитопланктона в мористой части акватории. Относительное увеличение первичной продукции в открытых морских районах по сравнению с прибрежными в зимний период характерно и для других морей, например, Черного моря [6].

Для оценки потенциальной продуктивности в Балтийском море обычно рассматриваются концентрации биогенных элементов в зимний период, когда их концентрации высокие, а биологическое потребление низкое [34]. Если биогенный элемент является лимитирующим, вне зависимости от фактической продукции его концентрация всегда остается низкой вследствие устойчивого равновесия между первичной продукцией, бактериальной деструкцией и вертикальным обменом. Для исследуемого района, как и для большинства других районов Балтийского моря характерно низкое молярное N:P-соотношение, что свидетельствует о том, что развитие фитопланктона потенциально лимитируется азотом.

В исследуемом районе в зимний период наибольшие концентрации азота и фосфора (8.26 ± 2.92 мкг-ат/л и 0.88 ± 0.16 мкг-ат/л) отмечаются в наименее соленых водах, примыкающих к достаточно плотно населенному северному побережью Самбийского полуострова. Концентрации нитратов резко снижаются по мере удаления от побережья. Фосфаты распределены равномернее. Это свидетельствует о преобладании процессов осенне-зимнего перемешивания и деструкции синтезированного летом органического вещества в пополнении их запасов в исследуемом районе. Известно, что в холодный период года в районах крупных циклональных круговоротов Балтийского моря вследствие усиления вертикального обмена и притока фосфора, высвобождающегося из анаэробных осадков моря, отмечаются наибольшие концентрации фосфатов [5, 32]. В этих зонах также происходит восстановление азота до газообразной формы в процессе денитрификации и его возвращение в атмосферу, поэтому концентрации азота в центральных районах моря не увеличиваются.

Поступление биогенных элементов с побережья Самбийского полуострова также прослеживается в другие сезоны. В частности весной, когда первичная продукция лимитируется нитратами, а зоопланктон, обеспечивающий регенерацию биогенных элементов, еще не достигает максимума своего развития [19], в Куликовской бухте у м. Гвардейский, где

находится коллектор сточных вод, отмечается локальный максимум концентрации фосфатов (рис. 2). Можно утверждать, что северное побережье Самбийского полуострова является важным источником биогенных элементов для изучаемой части Гданьского бассейна.

Для весеннего периода характерно наличие верхнего относительно холодного (по среднесезонным экспедиционным данным (6.93 ± 1.83 °C) квазиоднородного слоя в открытой части моря и сравнительно теплого слоя (7.73 ± 2.57 °C) в прибрежных районах [2]. Между ними формируется фронтальная зона,

ширина которой может составлять несколько километров, а градиенты довольно малы. В относительно теплых прибрежных водах за счет интенсивного перемешивания, поступления биогенных элементов с побережья Самбийского полуострова и небольшого увеличения относительной прозрачности воды (4.4 ± 1.3 м) создаются наиболее благоприятные условия для фотосинтеза. Величины первичной продукции в выделенных по батиметрическому признаку группах станций, в целом, убывают по направлению от побережья к открытому морю — от 70 ± 57 до 55 ± 54 $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$.

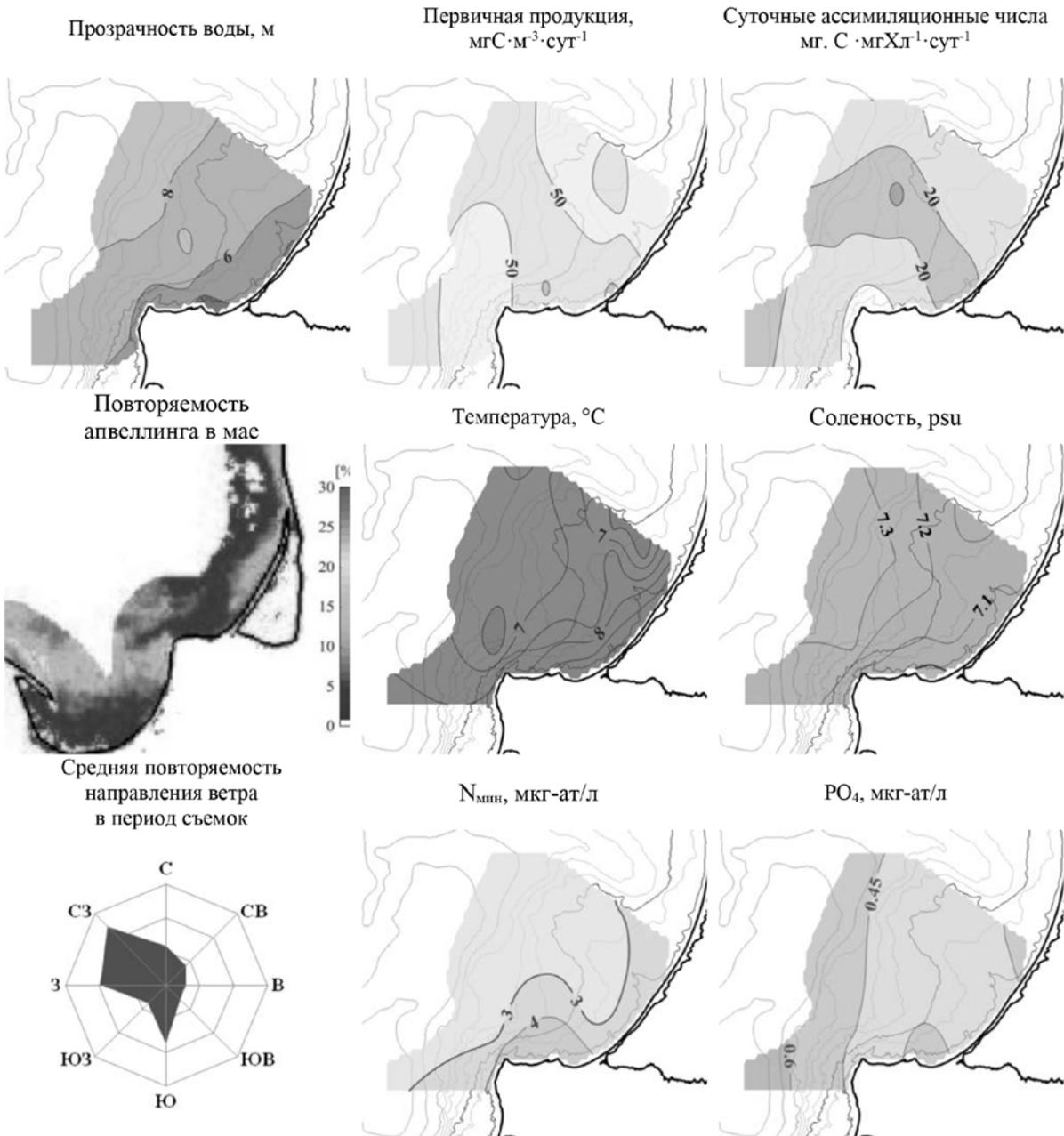


Рис. 3. Первичная продукция и суточные ассимиляционные числа в верхнем десятиметровом слое весной на фоне распределения прозрачности, температуры, солености и концентрации биогенов; роза ветров в период наблюдений и повторяемость апвеллинга [21].

Вместе с тем анализ пространственного распределения полученных данных показывает, что весной в пределах дуги Самбийский полуостров – Куршская коса действует крупномасштабная система сходящихся течений, обусловленная наибольшей повторяемостью весной северных и северо-западных ветров [1]. Эта типична для данного сезона синоптическая ситуация, которая отличается от преобладающего в остальное время года западного и юго-западного переноса, оказывает заметное влияние на распределение продукции фитопланктона. Воды с повышенными величинами первичной продукции ориентированы по направлению господствующего переноса: в районе сочленения полуострова и косы отмечается максимум первичной продукции ($75 \pm 53 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$) с отходящим от нее на северо-запад шлейфом. Наибольшие суточные ассимиляционные числа ($30 \pm 24 \text{ мгС} \cdot \text{мг хл «а»}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$) также соответствуют этой полосе тянувшихся от побережья вод.

На свале глубин у м. Таран и над северным склоном п. Рыбачий абсолютные ($29 \pm 18 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$) и удельные ($11 \pm 14 \text{ мгС} \cdot \text{мг хл «а»}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$) скорости первичной продукции заметно снижаются, что совпадает со снижением среднесезонной температуры верхнего десятиметрового слоя (соответственно $6.60 \pm 1.89 \text{ }^\circ\text{C}$ и $6.91 \pm 2.30 \text{ }^\circ\text{C}$ по сравнению с $7.98 \pm 2.84 \text{ }^\circ\text{C}$ у основания косы). Согласно данным дистанционного зондирования за период 1990–2009 гг. весной для этих участков акватории характерна наибольшая в году повторяемость апвеллинга (до 20% дней в году), которая также обусловлена преобладанием ветров с северной составляющей, приносящих холодные воздушные массы [26]. На рис. 3 видно хорошее совпадение распределения первичной продукции и среднесезонной температуры воды в период экспедиций с распределением случаев возникновения апвеллинга.

Подъем холодных вод играет ключевую роль в снабжении фотической зоны биогенными элементами, необходимыми для продукции фитопланктона, когда поверхностный слой исчерпал их. В Балтийском море температура воды в ядре апвеллинга в течение нескольких дней может снижаться более чем на $10 \text{ }^\circ\text{C}$ по сравнению с окружающими водами [25]. Поэтому с учетом быстрого падения температуры и увеличения солёности подъем холодных вод приводит к смене доминирующих группировок фитопланктона

(в частности, представителей пресноводного по происхождению комплекса видов, особенно многочисленных вблизи побережий) и снижению первичной продукции. Тогда как в зонах контакта относительно теплых, обедненных биогенами вод с относительно холодными и обогащенными биогенами водами лимитирующие первичную продукцию факторы перестают действовать. Это приводит к увеличению первичной продукции в этих контактных зонах, в том числе на периферии района сочленения Самбийского полуострова и Куршской косы.

Таким образом, в весенний период область с относительно повышенной первичной продукцией, расположенная в районе сочленения Самбийского полуострова и Куршской косы, занимает промежуточное положение между двумя относительно холодными участками акватории, которые прогреваются медленнее вследствие больших глубин и относительно часто возникающего на этих участках акватории апвеллинга. Вторым фактором, стимулирующим весной продукцию фитопланктона в этой зоне, являются нитраты, приносимые в Куликовскую бухту со стоком с побережья.

По среднесезонным данным, полученным в экспедициях в первой половине июля, ядро наиболее теплых вод находится на удалении от побережья Куршской косы и примыкает к северному побережью Самбийского полуострова (рис. 4). Как и в другие сезоны, летом наиболее прогретым водам соответствует зона максимальной фотосинтетической активности фитопланктона ($41 \pm 26 \text{ мгС} \cdot \text{мг хл «а»}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$).

Характерной особенностью Балтийского моря является снижение солёности поверхностного слоя в летний период. Для удобства анализа данных в зонах интенсивного притока пресных вод в Гданьский бассейн N. Wasmund с соавт. [35] выделили изогалины (6.8 psu для плюма Клайпедского канала и 7.0 psu для р. Вислы), по которым можно провести условную границу, определяющую относительно сильное и слабое влияние пресных вод и дополнительных источников биогенных элементов на морскую акваторию (сами концентрации биогенных элементов летом низкие вследствие интенсивного потребления). В исследуемом районе, занимающем промежуточное положение между вышеуказанными районами, средняя изогалина 6.9 psu отстоит от берега на расстоянии 20–25 км.

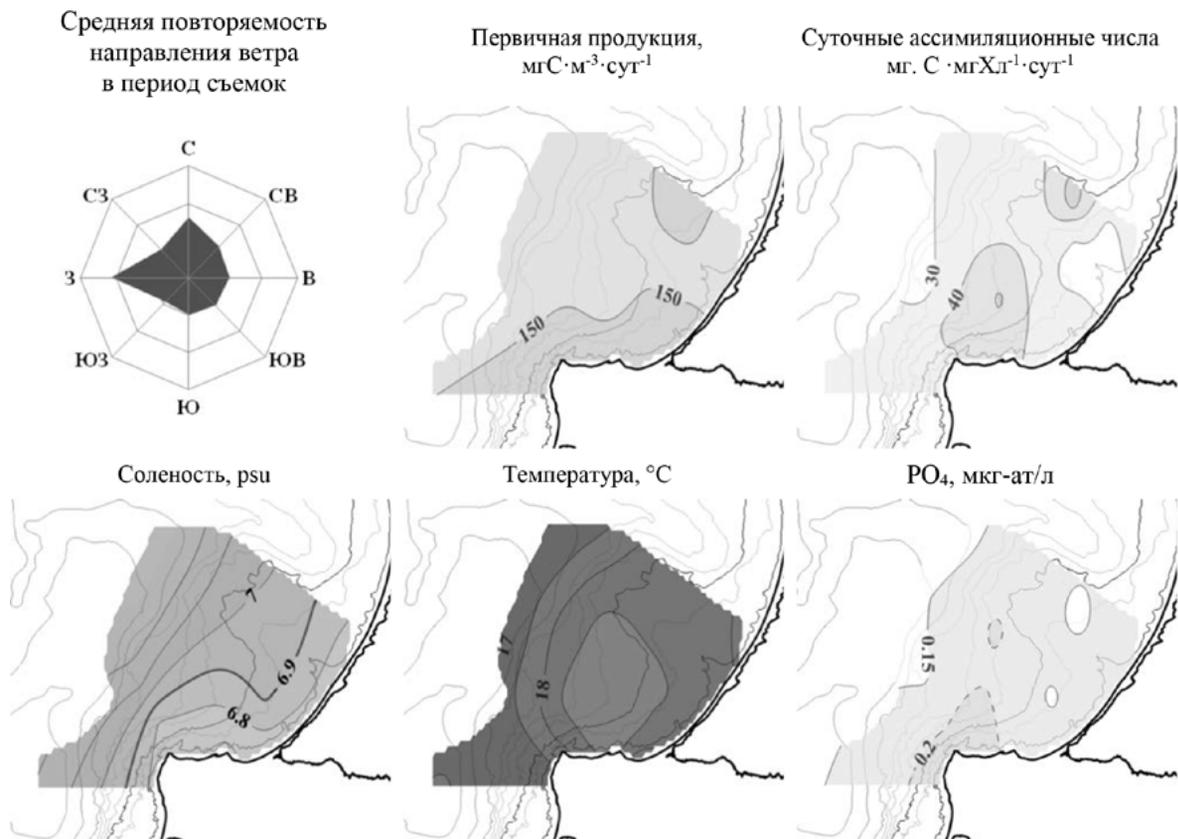


Рис. 4. Первичная продукция и суточные ассимиляционные числа в верхнем десятиметровом слое летом на фоне распределения температуры, солености и концентрации фосфатов; направление ветра в период съемок.

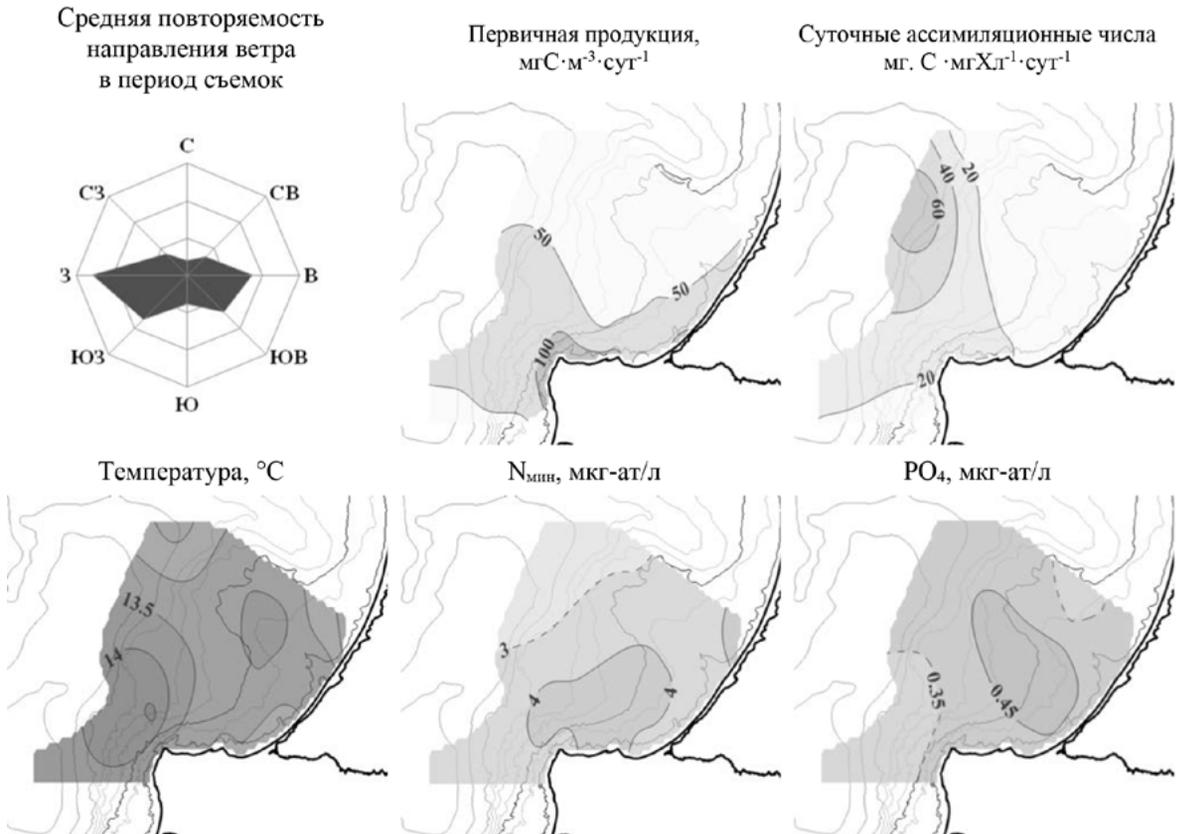


Рис. 5. Первичная продукция и суточные ассимиляционные числа в верхнем десятиметровом слое осенью на фоне распределения температуры воды и концентраций биогенов; направление ветра в период съемок.

Относительно пресному участку акватории, примыкающему к побережью от м. Таран до центральной части морского побережья Куршской косы, летом соответствуют воды с наибольшими величинами первичной продукции ($187 \pm 86 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$), концентрациями хлорофилла «а» ($5.0 \pm 2.4 \text{ мг}/\text{л}$) и биомассой фитопланктона ($1080 \pm 764 \text{ мг}/\text{л}$) [10, 16]. Полоса повышенных концентраций хлорофилла с аналогичными масштабами 10-25 км регулярно наблюдается на спутниковых снимках [9]. Усредненная за летний период суммарная биомасса фитопланктона здесь зависит от преимущественного развития водорослей из отд. *Cyanophyta*, *Dinophyta* и *Chlorophyta*.

Несмотря на высокую биомассу фитопланктона и концентрацию хлорофилла «а» в пределах всей береговой зоны, в районе п. Рыбачий отмечается снижение среднееголетних величин первичной продукции ($144 \pm 73 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$) и фотосинтетической активности фитопланктона ($30 \pm 22 \text{ мгС} \cdot \text{мг хл «а»}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$). По-видимому, это обусловлено сразу несколькими причинами. Во-первых, этот район находится на удалении от источников биогенов, расположенных на побережье Самбийского полуострова. Средние многолетние концентрации суммы минеральных форм азота и фосфора здесь ниже (соответственно $1.48 \pm 0.58 \text{ мкг-ат/л}$ и $0.17 \pm 0.12 \text{ мкг-ат/л}$), чем вдоль северного побережья Самбийского полуострова ($2.26 \pm 0.98 \text{ мкг-ат/л}$ и $0.19 \pm 0.11 \text{ мкг-ат/л}$). Во-вторых, на интенсивность фотосинтеза неблагоприятно влияет ускорение вдольбереговых течений («эффект порога»), поскольку синезеленые и зеленые водоросли предпочитают предельно спокойные воды [34]. В-третьих, периодически отмечающийся на этом участке акватории подъем холодных вод (повторяемость апвеллинга до 10% дней в году) при резком сниже-

нии температуры верхнего слоя оказывает негативное влияние на физиологическое состояние интенсивно развивающихся в летний период теплолюбивых видов водорослей.

Осенью при преобладающем западном ветре общая циркуляция вод Юго-Восточной Балтики наиболее интенсивна. Исследуемый район находится на юго-восточной периферии крупномасштабного течения с циклонической завихренностью [7]. В районе Самбийско-Куршского плато течения от поверхности до дна имеют генеральное северо-восточное направление. Продукция фитопланктона осенью постепенно снижается, по-видимому, вследствие уменьшения инсоляции. Однако первичная продукция осенью может быть выше, чем весной, вследствие отсутствия биогенного лимитирования, что в большей степени относится к азоту ($3.62 \pm 1.93 \text{ мкг-ат/л}$) и в меньшей — к фосфору ($0.40 \pm 0.21 \text{ мкг-ат/л}$) вследствие относительно высокой температуры воды. В условиях теплой осени в береговой зоне от основания Куршской косы до м. Таран наблюдаются повышенные величины первичной продукции ($165 \pm 110 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$), соответствующие повышенной концентрации хлорофилла «а» ($6.5 \pm 2.0 \text{ мг}/\text{л}$) и биомассе фитопланктона ($962 \pm 204 \text{ мг}/\text{л}$) [10, 16]. В холодные осени величины первичной продукции ($19 \pm 16 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$), концентрации хлорофилла «а» ($3.1 \pm 1.2 \text{ мг}/\text{л}$) и биомассы фитопланктона ($206 \pm 228 \text{ мг}/\text{л}$) близки к невысоким значениям, наблюдаемым на остальной части акватории (рис. 5). Для осеннего периода характерны наиболее высокие удельные скорости фотосинтеза, особенно для глубоководной части акватории. С более теплыми водами в открытое море и в район м. Таран смещается область с максимальными величинами суточных ассимиляционных чисел ($25 \pm 49 \text{ мгС} \cdot \text{мг хл «а»}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$).

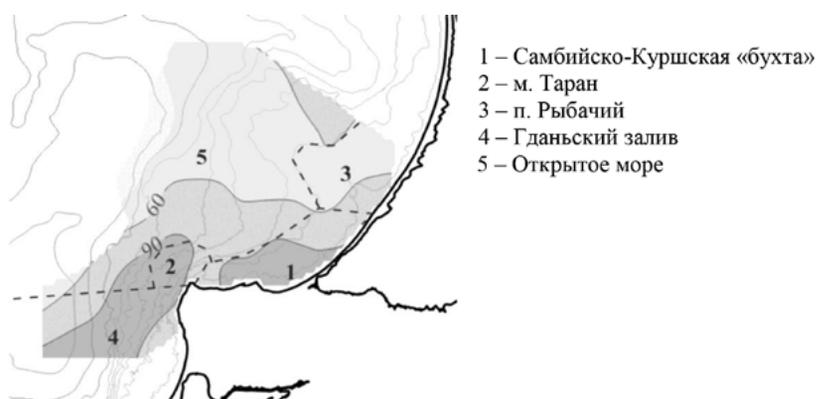


Рис. 6. Районирование изучаемой акватории в зависимости от физических и химических процессов морской среды, обуславливающих среднегодовые величины первичной продукции в верхнем десятиметровом слое ($\text{мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$).

Таблица 2. Среднемноголетние показатели состояния морской среды, осредненные в верхнем десятиметровом слое, в группах станций, выделенных по среднемноголетнему уровню первичной продукции в российском секторе Гданьского бассейна

Показатель	Сезон	Район сочленения	Район м. Таран	Район п. Рыбачий	Район	Гданьский залив
		Самбийского п-ва и Куршской косы			открытого моря	
Температура, °С	зима	0.84 ± 0.85 (21) -0.39÷2.73	1.67 ± 0.51 (8) 0.43÷2.46	1.25 ± 0.78 (17) -0.38÷1.51	2.15 ± 0.59 (24) -0.31÷3.60	2.28 ± 0.63 (6) 1.70÷3.16
	весна	7.98 ± 2.84 (27) 4.25÷13.40	6.60 ± 1.89 (7) 4.17÷8.66	6.91 ± 2.30 (15) 4.15÷10.74	6.88 ± 1.74 (23) 4.09÷10.42	7.59 ± 2.47 (6) 4.25÷9.74
	лето	18.23 ± 1.56 (47) 14.71÷21.53	18.08 ± 0.86 (18) 15.47÷19.81	18.17 ± 1.70 (45) 14.60÷21.46	18.16 ± 1.90 (36) 13.72÷21.36	17.27 ± 1.31 (12) 13.49÷20.27
	осень	12.55 ± 2.40 (31) 8.13÷16.67	13.01 ± 2.75 (10) 8.56÷16.85	12.85 ± 2.18 (28) 8.57÷16.62	13.31 ± 2.46 (19) 9.67÷16.69	13.78 ± 2.81 (8) 9.46÷16.90
Соленость, psu	зима	7.20 ± 0.25 (21) 6.69÷7.51	7.26 ± 0.20 (8) 6.99÷7.49	7.30 ± 0.16 (17) 7.06÷7.45	7.39 ± 0.09 (24) 7.20÷7.57	7.39 ± 0.19 (6) 7.06÷7.51
	весна	7.01 ± 0.19 (27) 6.58÷7.48	7.17 ± 0.63 (7) 6.98÷7.51	7.11 ± 0.14 (15) 6.91÷7.45	7.28 ± 0.18 (23) 6.09÷7.53	7.23 ± 0.20 (6) 6.97÷7.48
	лето	6.76 ± 0.36 (47) 6.04÷7.20	6.77 ± 0.37 (18) 6.03÷7.22	6.88 ± 0.28 (45) 6.22÷7.29	7.04 ± 0.28 (36) 6.24÷7.40	7.13 ± 0.14 (12) 6.62÷7.31
	осень	7.04 ± 0.20 (31) 6.44÷7.29	7.12 ± 0.21 (10) 6.70÷7.31	7.19 ± 0.10 (28) 7.03÷7.39	7.26 ± 0.13 (19) 7.01÷7.47	7.18 ± 0.29 (8) 6.30÷7.46
Прозрачность, м	зима	4.7 ± 1.9 (10) 3.0÷8.5	4.0 ± 0.0 (2) 4.0÷4.0	7.8 ± 2.2 (14) 2.5÷12.0	11.4 ± 1.6 (9) 8.0÷14.0	9.5 ± 3.3 (4) 4.0÷13.0
	весна	4.6 ± 1.3 (24) 2.5÷13.0	5.3 ± 1.9 (6) 3.0÷7.5	5.9 ± 1.7 (14) 3.0÷9.0	8.0 ± 1.7 (13) 5.5÷12.0	6.0 ± 1.4 (5) 4.0÷11.0
	лето	3.4 ± 0.9 (42) 2.0÷6.0	3.5 ± 0.9 (14) 2.0÷4.5	3.8 ± 0.4 (29) 2.5÷5.5	4.0 ± 0.4 (25) 3.0÷5.0	4.2 ± 0.5 (8) 3.5÷5.0
	осень	4.4 ± 1.6 (26) 1.5÷9.0	3.2 ± 1.4 (5) 1.5÷5.0	5.1 ± 1.6 (14) 2.0÷11.0	7.7 ± 1.3 (12) 5.5÷10.0	7.7 ± 1.2 (6) 6.0÷9.0
PO ₄ , мкг-ат/л	зима	0.88 ± 0.16 (25) 0.50÷1.19	0.84 ± 0.20 (8) 0.53÷1.17	0.76 ± 0.15 (21) 0.46÷1.27	0.76 ± 0.21 (20) 0.40÷1.30	0.66 ± 0.15 (6) 0.47÷0.84
	весна	0.41 ± 0.44 (29) 0.03÷14.11	0.37 ± 0.30 (9) 0.05÷1.00	0.45 ± 0.45 (23) 0.06÷1.43	0.47 ± 0.33 (18) 0.08÷1.02	0.70 ± 0.80 (6) 0.10÷1.89
	лето	0.19 ± 0.11 (60) 0.03÷0.58	0.23 ± 0.17 (20) 0.03÷0.82	0.17 ± 0.12 (50) 0.03÷0.87	0.18 ± 0.07 (31) 0.07÷0.52	0.14 ± 0.07 (8) 0.04÷0.28
	осень	0.48 ± 0.22 (32) 0.17÷1.08	0.43 ± 0.20 (10) 0.12÷0.73	0.38 ± 0.17 (29) 0.09÷0.81	0.37 ± 0.22 (19) 0.09÷0.87	0.66 ± 0.15 (6) 0.47÷0.84
NO ₃ , мкг-ат/л	зима	6.96 ± 2.92 (25) 3.00÷14.11	6.47 ± 1.96 (8) 2.39÷9.84	4.76 ± 1.40 (21) 2.04÷7.08	4.86 ± 1.86 (20) 2.14÷10.37	5.09 ± 2.97 (6) 2.49÷10.91
	весна	2.51 ± 3.36 (29) 0.14÷13.61	2.00 ± 2.41 (9) 0.37÷9.22	1.82 ± 2.09 (23) 0.28÷7.78	0.99 ± 1.37 (18) 0.12÷3.49	0.85 ± 1.13 (6) 0.13÷2.54
	лето	0.92 ± 0.69 (60) 0.06÷7.87	0.90 ± 0.74 (20) 0.11÷4.38	0.44 ± 0.33 (50) 0.07÷1.67	0.37 ± 0.28 (31) 0.08÷1.34	0.48 ± 0.34 (8) 0.18÷1.17
	осень	2.27 ± 0.81 (32) 0.61÷8.53	1.90 ± 1.35 (10) 0.42÷4.19	1.74 ± 0.36 (29) 0.30÷5.44	1.21 ± 0.98 (19) 0.18÷4.04	0.60 ± 0.38 (7) 0.20÷1.04
N _{мин} , мкг-ат/л	зима	8.26 ± 2.92 (25) 3.52÷18.05	7.84 ± 2.47 (8) 3.75÷11.36	6.03 ± 1.93 (21) 2.39÷9.74	5.74 ± 1.94 (20) 2.69÷12.06	6.33 ± 2.80 (6) 4.02÷12.80
	весна	4.48 ± 3.60 (29) 0.75÷15.27	3.81 ± 2.27 (9) 1.45÷10.25	3.58 ± 1.86 (23) 0.93÷9.36	2.63 ± 1.36 (18) 0.61÷5.14	2.97 ± 3.49 (6) 0.93÷8.19
	лето	2.26 ± 0.98 (60) 0.50÷10.30	2.61 ± 0.95 (20) 1.17÷15.18	1.48 ± 0.58 (50) 0.36÷4.18	1.46 ± 0.40 (31) 0.46÷2.41	1.92 ± 1.16 (8) 0.38÷4.21
	осень	4.31 ± 1.28 (32) 1.69÷10.84	4.30 ± 1.71 (10) 2.70÷7.67	3.68 ± 0.76 (29) 1.25÷7.40	3.09 ± 1.47 (19) 0.86÷8.40	2.29 ± 0.54 (7) 1.38÷5.41

R _{орг} , мкг-ат/л	зима	$\frac{0.68 \pm 0.27 (3)}{0.51 \div 0.99}$				0.30 (1)
	весна	$\frac{0.84 \pm 0.12 (12)}{0.32 \div 2.05}$	$\frac{0.68 \pm 0.07 (3)}{0.33 \div 0.93}$	$\frac{0.48 \pm 0.11 (7)}{0.23 \div 0.81}$	$\frac{0.29 \pm 0.10 (6)}{0.18 \div 0.39}$	$\frac{8.26 \pm 2.92 (25)}{3.52 \div 18.05}$
		$\frac{0.78 \pm 0.07 (29)}{0.51 \div 1.13}$	$\frac{0.81 \pm 0.15 (10)}{0.58 \div 1.09}$	$\frac{0.59 \pm 0.05 (24)}{0.46 \div 0.79}$	$\frac{0.54 \pm 0.08 (14)}{0.43 \div 0.74}$	$\frac{0.56 \pm 0.11 (14)}{0.40 \div 0.62}$
	осень	$\frac{0.66 \pm 0.17 (3)}{0.11 \div 1.02}$	$\frac{0.84 \pm 0.31 (3)}{0.68 \div 1.24}$	$\frac{0.44 \pm 0.06 (9)}{0.26 \div 0.68}$	$\frac{0.35 \pm 0.08 (3)}{0.29 \div 0.44}$	0.31 (1)
N _{орг} , мкг-ат/л	зима	$\frac{19.39 \pm 4.59 (3)}{16.53 \div 24.59}$				18.63 ± 2.48 (2)
	весна	$\frac{27.85 \pm 7.81 (17)}{13.86 \div 59.75}$	$\frac{30.05 \pm 18.52 (3)}{12.42 \div 51.20}$	$\frac{17.95 \pm 5.13 (12)}{9.18 \div 29.96}$	$\frac{17.35 \pm 5.81 (8)}{9.90 \div 24.92}$	$\frac{16.88 \div 20.39}{28.18 \pm 2.22 (5)}$
		$\frac{30.98 \pm 3.79 (34)}{20.62 \div 41.31}$	$\frac{29.95 \pm 8.26 (12)}{14.52 \div 43.23}$	$\frac{27.70 \pm 2.03 (29)}{18.88 \div 34.12}$	$\frac{24.85 \pm 3.97 (17)}{11.96 \div 33.86}$	$\frac{26.54 \div 32.07}{18.15 (1)}$
	осень	$\frac{23.20 \pm 4.57 (13)}{16.89 \div 33.83}$	$\frac{24.53 \pm 5.10 (3)}{20.11 \div 29.13}$	$\frac{22.42 \pm 3.46 (9)}{17.20 \div 28.33}$	$\frac{23.44 \pm 2.69 (3)}{20.35 \div 25.21}$	
Первичная продукция, мгС·м ₃ ·сут ⁻¹	зима	$\frac{4.88 \pm 4.52 (16)}{0.32 \div 17.70}$	$\frac{5.46 \pm 5.86 (5)}{(0.85 \div 15.32)}$	$\frac{4.16 \pm 6.10 (16)}{0.21 \div 22.51}$	$\frac{3.59 \pm 3.92 (17)}{0.36 \div 11.51}$	$\frac{3.67 \pm 2.96 (5)}{0.71 \div 7.91}$
	весна	$\frac{74.01 \pm 62.63 (36)}{9.00 \div 271.0}$	$\frac{37.29 \pm 24.32 (7)}{(14.22 \div 85.35)}$	$\frac{50.09 \pm 6.10 (18)}{0.21 \div 22.51}$	$\frac{47.95 \pm 48.12 (17)}{7.65 \div 161.9}$	$\frac{82.92 \pm 72.92 (6)}{20.64 \div 187.7}$
		$\frac{169.9 \pm 84.58 (55)}{34.90 \div 364.1}$	$\frac{176.8 \pm 85.94 (14)}{67.99 \div 379.0}$	$\frac{144.1 \pm 84.54 (33)}{10.13 \div 356.0}$	$\frac{131.1 \pm 62.54 (35)}{33.46 \div 277.6}$	$\frac{202.3 \pm 125.7 (11)}{91.50 \div 505.7}$
	осень	$\frac{79.71 \pm 91.78 (25)}{5.78 \div 392.5}$	$\frac{106.7 \pm 156.1 (6)}{5.63 \div 415.0}$	$\frac{42.01 \pm 41.56 (20)}{8.24 \div 152.2}$	$\frac{43.36 \pm 44.45 (17)}{10.03 \div 187.6}$	$\frac{39.04 \pm 33.14 (7)}{10.75 \div 92.43}$
Хлорофилл «а», мг/м ₃	зима	$\frac{1.91 \pm 1.17 (25)}{0.67 \div 7.65}$	$\frac{1.82 \pm 1.69 (8)}{0.88 \div 6.52}$	$\frac{1.25 \pm 0.76 (21)}{0.56 \div 4.50}$	$\frac{0.91 \pm 0.31 (20)}{0.49 \div 2.10}$	$\frac{1.43 \pm 0.94 (6)}{0.65 \div 5.55}$
	весна	$\frac{2.23 \pm 1.98 (29)}{1.08 \div 16.13}$	$\frac{2.12 \pm 1.26 (9)}{0.53 \div 12.80}$	$\frac{1.11 \pm 0.39 (23)}{0.82 \div 11.88}$	$\frac{1.25 \pm 0.41 (18)}{1.00 \div 6.67}$	$\frac{2.01 \pm 1.24 (6)}{0.27 \div 7.10}$
		$\frac{3.29 \pm 1.22 (60)}{1.28 \div 19.30}$	$\frac{4.82 \pm 1.95 (20)}{1.57 \div 10.25}$	$\frac{3.02 \pm 1.34 (50)}{0.97 \div 11.79}$	$\frac{3.06 \pm 1.03 (31)}{1.49 \div 9.70}$	$\frac{3.75 \pm 1.24 (8)}{1.94 \div 6.09}$
	осень	$\frac{2.80 \pm 1.29 (32)}{2.02 \div 10.00}$	$\frac{3.67 \pm 1.57 (10)}{1.92 \div 6.76}$	$\frac{1.80 \pm 0.40 (29)}{1.16 \div 19.30}$	$\frac{1.88 \pm 0.65 (19)}{0.85 \div 5.05}$	$\frac{2.43 \pm 0.52 (7)}{1.63 \div 5.10}$

Таблица 3. Корреляционная матрица первичной продукции и показателей состояния морской среды

Показатель	Вся акватория	Глубина			Открытое море	Гданьский залив	м. Таран	Плато Рыбачий	Самбийско-Куршский
		0-20 м	20-40 м	Более 40 м					
Температура	0.66	0.66	0.67	0.74	0.77	0.54	0.73	0.68	0.61
Соленость	нк	нк	нк	нк	нк	нк	-0.50*	нк	нк
Нитраты	нк	нк	-0.48	-0.52	-0.56	-0.58	нк	нк	нк
Минеральный азот	нк	нк	нк	нк	нк	-0.48	нк	нк	нк
Органический азот	нк	нк	нк	нк	нк	0.77	нк	нк	нк
Фосфаты	нк	нк	нк	нк	-0.51	нк	нк	нк	нк
Органический фосфор	нк	нк	нк	0.78	0.77	0.89	нк	нк	нк
Хлорофилл «а»	нк	нк	нк	нк	0.49	нк	нк	нк	нк

* — нелинейный характер связи, нк — нет корреляции

Районирование акватории и характеристика выделенных районов. Анализ массива многолетних данных показал, что в исследуемом районе глубина и рельеф дна определяют температурно-соленостный режим, характер течений и снабжение биогенными элементами поверхностного слоя, что влияет на распределение биомассы фитопланктона, концентрации хлорофилла и первичной продукции. Наибольшие величины биомассы фитопланктона и концентрации хл «а» в течение года отмечаются в береговой зоне, но продукция фитопланктона внутри нее распределена неодинаково и достаточно четко соответствует очертаниям береговой линии и особенностям донной топографии. На основании данных по среднемноголетнему распределению первичной продукции российский сектор Гданьского бассейна был разделен на пять районов, в каждом из которых были проанализированы среднемноголетние величины продукции фитопланктона и абиотических факторов, а также корреляционные взаимосвязи между ними (рис. 6, табл. 2 и 3). Сравнение с результатами подобного анализа для точек, сгруппированных по батиметрическому принципу (табл. 1), показало, что корреляционные связи между рассмотренными показателями в выделенных пяти географических районах по распределению первичной продукции значительно выше (табл. 2).

В районе сочленения Самбийского полуострова и Куршской косы благодаря вогнутой форме береговой линии возникает «эффект полужамкнутой бухты». Главным фактором, ограничивающим первичную продукцию в этом районе, является температура воды (табл. 3). Относительно замедленный водообмен препятствует выносу биомассы фитопланктона и благоприятствует развитию синезеленых водорослей, предпочитающих спокойную воду [34]. Интенсивное перемешивание за счет небольших глубин и вихреобразование у основания Куршской косы (ринги диаметром до 10-20 км при умеренных ветрах — менее 8 м/с) способствуют более быстрому возвращению биогенов в фотический слой [1, 23]. Сток с северного побережья и апвеллинг, в случае его возникновения в соседних районах, обуславливают дополнительное поступление биогенов, стимулирующих фотосинтез. Наибольшее значение имеет поступление азота, поскольку за пределами береговой зоны развитие фитопланктона ограничивается нитратами.

В районе м. Таран первичная продукция фитопланктона находится в сильной зависимости от гидрометеорологической обстановки, что подтверждается сильной положительной связью первичной продукции с температурой воды и высокой степенью взаимосвязи с соленостью. Последняя отмечается только в случае сильных градиентов, например в районах контакта пресных речных вод с солеными морскими водами. При благоприятных направлениях ветров под влиянием нагона относительно пресных и продуктивных вод с юга интенсивность фотосинтеза возрастает. Наоборот, вследствие преобладания ветров, подходящих по нормали к берегу, обуславливающих нагон относительно холодных и соленых вод открытого моря, или при сгонных ветрах, обуславливающих апвеллинг, соленость увеличивается, а температура фотического слоя, наоборот, снижается. Это оказывает отрицательное действие на измеряемые величины первичной продукции. После прекращения нагона или подъема холодных вод интенсивность фотосинтеза, в том числе «цветения» синезеленых водорослей [36], снова увеличивается вследствие увеличения температуры воды и концентрации биогенных элементов.

Сочетание интенсивных течений вдоль западного побережья Самбийского полуострова, резкого разворота береговой линии и рельефа дна порождает в районе м. Таран зону повышенной вихревой активности [1, 3, 23]. Основной особенностью мезомасштабных вихрей, формирующихся в морях и океанах, является куполообразное поднятие или опускание изотерм и изогалин. Прохождение синоптических вихрей вызывает локальные неоднородности характеристик фотического слоя и изменения уровня продуктивности [4]. Наличие сравнительно короткоживущих неоднородностей определяет общий уровень продуктивности отдельных районов. Чаще всего антициклональный синоптический вихрь диаметром 10-20 км отмечается у северного побережья Самбийского полуострова между мысами Таран и Гвардейский [23]. Точки измерений первичной продукции (ст. 1 и 15) находятся на периферии вихря.

В районе п. Рыбачий первичная продукция уменьшается, а на его склоне увеличивается вследствие прямого действия гидродинамического фактора («эффект порога»). Весной и летом некоторый «островной эффект» дает нефтедобывающая платформа Д6. Повышение первичной продукции вниз по течению от острова или под-

водной горы неоднократно сообщалось для разных районов Мирового океана [8, 17].

Наиболее тесная положительная связь между температурой воды и первичной продукцией отмечается в **открытом море**, где верхний десятиметровый слой моря из-за больших глубин в теплый период года прогревается слабее, чем прибрежные мелководные участки. От температуры воды и отношения между количеством фитопланктона и зоопланктона зависит скорость регенерации биогенов, концентрации которых отражают динамику фитопланктона в течение года. В районе открытого моря выявлена тесная корреляционная связь первичной продукции с концентрацией фосфатов. По-видимому, это является следствием удаления этого района от источников фосфатов, расположенных на суше (табл. 3). В отличие от азота фосфор не имеет газообразной формы, и поэтому в теплый период года с замедлением вертикального обмена и появлением температурного градиента пространственное распределение концентраций фосфатов существенно влияет на распределение величин первичной продукции.

Наоборот, в **открытой части Гданьского залива** значимой корреляции распределения первичной продукции с фосфатами не установлено, несмотря на то, что, например, летом их среднесезонная концентрация опускается ниже лимитирующей развитие фитопланктона (0.15 мкг-ат/л). В последние десятилетия отмечалось избыточное поступление в Гданьский залив фосфора по отношению к азоту со стоком р. Вислы, составляющее 70.8 тыс.т. валового азота и 10.6 тыс.т. валового фосфора [27]. Молярное N:P-соотношение в заливе снизилось с 27.5 в 1979–1998 гг. до 14.5 в 1999 г. Обилие фосфора стимулирует фиксацию атмосферного азота синезелеными водорослями [32], и этим, по-видимому, объясняется высокая степень корреляции первичной продукции с органическим и минеральным азотом в заливе. В открытых районах Гданьского бассейна, расположенных севернее Гданьского залива, наоборот, концентрация фосфатов влияет на распределение первичной продукции, поэтому корреляционные связи между продукцией и концентрацией органического азота не выявлены. И поэтому, в двух этих районах пространственные различия концентраций органического фосфора тесно связаны с интенсивностью первичной продукции фитопланктона.

В наиболее удаленных от побережья открытых морских районах с продукцией фитоплан-

ктона тесно связаны его биомасса и концентрация хл «а». Отсутствие корреляционных связей первичной продукции с концентрациями органических форм азота и фосфора с хл «а» в прибрежном (0-20 м) и переходном районах (20-40 м) свидетельствует об их высоком содержании и небольших пространственных различиях наблюдаемых значений. Это следствие адвекции вод из соседних высокопродуктивных районов, высокого содержания растворенного органического углерода в береговой зоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В российском секторе Гданьского бассейна Балтийского моря, по данным многолетних исследований (2003-2015 гг.), определены закономерности распределения величин первичной продукции в верхнем десятиметровом слое, обусловленные физическими и химическими условиями морской среды (температура, соленость, глубина, рельеф и форма береговой линии, концентрация биогенных элементов). На основе этого было выполнено районирование исследуемой акватории: район м. Таран, район сочленения Самбийского полуострова и Куршской косы, район п. Рыбачий, открытое море и российский участок Гданьского залива. Выделенные районы характеризуются лучшими корреляционными связями первичной продукции с абиотическими факторами по сравнению с результатами регрессионного анализа в районах, выделенных по батиметрическому принципу. Наиболее тесно первичная продукция связана с уровнем прогрева вод на всей исследуемой акватории, а также с концентрациями биогенных элементов в мористых районах. Предложенное районирование российского сектора Гданьского бассейна может быть использовано при изучении условий среды в данном районе и применимо для верхнего десятиметрового слоя вод, где с учетом небольшой прозрачности воды формируется основная часть первичной продукции фитопланктона.

Благодарности. Авторы благодарят ООО «ЛУ-КОЙЛ-КМН» за обеспечение финансирования исследований; к.г.-м.н. В.В. Сивкова за организацию работ; к.г.н. Ж.И. Стонт за данные по ветру, А.Н. Бабакова за данные по поверхностным течениям (АО ИО РАН). Авторы искренне признательны д.б.н. Н.В. Пименову (ИНМИ РАН) за предоставление возможности получения данных по первичной продукции фитопланктона.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН, тема № 0149-2019-0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабаков А.Н.* Динамика осадочного вещества в береговой зоне моря // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Калининград: Терра Балтика, 2008. Т. 2. С. 37-59.
2. *Беляев М.М., Гусев Ю.М., Михайлов А.Е. и др.* Некоторые особенности гидрофизических и гидрохимических условий Балтийского моря весной 1984 г. // Экосистемы Балтики в мае-июне 1984 г. М., 1987. С. 16-30.
3. *Василенко В.М., Гриценко В.А., Домнин Д.А. и др.* Экспериментальное изучение фронтальных зон и термохалинной структуры прибрежных вод Балтийского моря (Самбийский полуостров, Калининградская область) // Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология. М., 2008. С. 116-118.
4. *Виноградов М.Е.* Развитие пелагических сообществ и биотический баланс океана // Океанология на старте XXI века. М.: Наука, 2008. С. 257-292.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Балтийское море. Гидрометеорологические условия // Отв. ред. Терзиев Ф.С. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. Т. 3. Вып. 1. 452 с.
6. *Демидов А.Б.* Пространственно-временная изменчивость хлорофилла «а» в Черном море в зимне-весенний период // Океанология. 1999. Т. 39. № 5. С. 755-767.
7. *Дубравин В.Ф., Голенко Н.Н., Горбацкий В.В., Сивков В.В.* Гидрологические условия // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Калининград: Терра Балтика, 2008. Т. 2. С. 263-276.
8. *Завьялов П.О., Копрова Л.И., Виноградов П.В. и др.* Результаты наблюдений океана из космоса по программе эксперимента «Диатомея» на РС МКС // Совр. пробл. дист. Зонд. Земли из космоса. 2008. Т. 2. № 5. С. 90-94.
9. *Копелевич О.В., Вазюля С.В., Шебестов С.В., Буканова Т.В.* Взвешенное вещество в поверхностном слое вод Юго-Восточной Балтики по спутниковым данным // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 51-59.
10. *Кудрявцева Е.А., Пименов Н.В., Александров С.В., Кудрявцев В.М.* Первичная продукция и хлорофилл в юго-восточной части Балтийского моря в 2003-2007 гг. // Океанология. 2011. Т. 51. № 1. С. 33-41.
11. *Кудрявцева Е.А., Саввичев А.С., Александров С.В. и др.* Бактериопланктон Гданьского бассейна Балтийского моря // Микробиология. 2012. Т. 81. № 3. С. 377-388.
12. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла «а». ГОСТ 17.1.04.02-90. М.: Издательство стандартов, 1990. 15 с.
13. Методы гидрохимических исследований океана. М.: Наука, 1978. 270 с.
14. *Морозов Е.Г., Шука С.А., Голенко Н.Н. и др.* Структура температуры в прибрежной зоне Балтийского моря // Докл. РАН. 2007. Т. 416. С. 1-5.
15. *Нагорнова Н.Н.* Геоэкологическая оценка состояния малых водотоков Калининградской области: Дис. ... канд. географических наук: 25.00.36. Калининград, 2012. 203 с.
16. *Семенова С.Н.* Фитопланктон // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Калининград: Терра Балтика, 2012. Т. 2. С. 344-358.
17. *Сорокин Ю.И.* Первичная продукция в Индийском океане и оценка влияния на нее подводных поднятий // Океанология. 1987. Т. 27. № 2. С. 293-299.
18. *Тооминг Х.Г., Гуляев Б.И.* Методика измерения фотосинтетически активной радиации. М.: Наука, 1967. 144 с.
19. *Шука Т.А.* Зоопланктон // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Калининград: Терра Балтика, 2012. Т. 2. С. 389-406.
20. *Andrzejewicz E., Kruk-Dowgiallo L., Osowiecki A.* An expert judgment approach to designating ecosystem typology and assessing the health of the Gulf of Gdansk // Managing the Baltic Sea. Coastline Reports 2. 2004. P. 53-61.
21. *Grigoriev A., Zhamoïda V., Spiridonov M. et al.* Late-glacial and Holocene paleoenvironment in the Baltic Sea based on a sedimentary record from the Gdansk Basin // Clim. Res. 2011. V. 48. P. 13-21.
22. *Daunys D., Olenin S., Paľkauskas R. et al.* Typology and classification of ecological status of Lithuanian coastal and transitional waters: an update of existing system, procurement of services for the institutional building for the Nemunas River basin management // Tech. Rep. Transit. Fac. Proj. №. 2004/016-925-04-06, 2007.
23. *Gurova E., Chubarenko B.* Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic // Oceanologia. 2012. V. 54. № 3. P. 687-707.
24. *Krzymski W., Kruk-Dowgiallo L., Zawadzka-Kahlau E. et al.* Typology of Polish marine waters // Baltic Sea typology. Coastline Reports 4. 2004. P. 39-48.
25. *Lehmann A., Myrberg K.* Upwelling in the Baltic Sea – a review // J. Mar. Syst. 2008. V. 74. P. S3-S12.
26. *Lehmann A., Myrberg K., Huflich K.* Statistical approach to coastal upwelling in the Baltic Sea based on the analysis of satellite data for 1990–2009 // Oceanologia. 2012. V. 54. № 3. P. 369-393.
27. *Łysiak-Pastuszek E., Drgas N., Pitkowska Z.* Eutrophication in the Polish coastal zone: the past, present status and future scenarios // Mar. Pollut. Bull. 2004. V. 49. P. 186–195.

28. *Nowacki J., Jarosz E.* The hydrological and hydrochemical division of the surface waters in the Gulf of Gdansk // *Oceanologia*. 1998. V. 40. № 3. P. 261-272.
29. *Olenina I.* Phytoplankton of the Kursiu marios lagoon and the south-eastern Baltic coastal zone: Doctoral Dissertation. Vilnius, 1997. 159 p.
30. *Stemann Nielsen E.* The use of radio-active carbon C14 for measuring organic production in the sea // *J. Cons. Int. Explor. Mer.* 1952. V. 18. № 3. P. 117-140.
31. *Strickland J.D.H.* Solar radiation penetrating the Ocean. A review of requirements, data and methods of measurement with particular reference to photosynthetic productivity // *J. Fish. Res. Bd. Canada*. 1958. V. 15. № 3. P. 453-493.
32. *Vahtera E., Conley D.J., Gustafsson B.G. et al.* Internal ecosystem feedbacks enhance nitrogen-fixing cyanobacteria blooms and complicate management in the Baltic Sea // *Ambio*. 2007. V. 36. P. 186-194.
33. *Vaičiūtė D., Bresciani M., Matta E. et al.* Variability of bio-optical parameters of the South-Eastern Baltic Sea coastal waters on in situ and satellite data // *ESA Special Publication*. 2013. V. 772. P. 11.
34. *Wasmund N.* Occurrence of cyanobacterial blooms in the Baltic Sea in relation to environmental conditions // *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.* 1997. V. 82. P. 169-184.
35. *Wasmund N., Andrushaitis A., Lysiak-Pastuszek E. et al.* Trophic status of the south-eastern Baltic sea: a comparison of coastal and open areas // *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.* 2001. V. 53. P. 849-865.
36. *Wasmund N., Nausch G., Voss M.* Upwelling events may cause cyanobacteria blooms in the Baltic Sea // *J. Mar. Syst.* 2011. doi:10.1016/j.jmarsys.2011.09.001

Hydrological and Hydrochemical Underpinnings of Primary Production and Division of the Russian Sector in the Gdansk Basin of the Baltic Sea

© 2019 E. A. Kudryavtseva¹, S. V. Aleksandrov²

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Atlantic Research Institute of Fishery and Oceanography, Kaliningrad, Russia*

e-mail: kudryavtzeva@rambler.ru

Received July 27, 2017

The distribution patterns of absolute and specific values of primary production in the upper 10-m layer depending on the physical and chemical condition of the marine environment (temperature, salinity, depth, bottom topography and configuration of the coastline, and nutrient concentrations) were distinguished in the Russian sector in the Gdansk Basin of the Baltic Sea based on long-term research data (2003–2015). Based on the results, the considered water area was divided into five regions: Cape Taran, the base of the Curonian Spit, the plateau of Rybachy, the open sea, and the Gdansk Bay (northeastern part). These regions are characterized by higher correlations of primary production and parameters of the marine environment compared to regression analysis for the regions distinguished by bathymetry. Primary production is the most closely correlated with temperature over the entire water area and with nutrients concentrations in seaward regions.

Keywords: primary production, chlorophyll a, nutrients, Baltic Sea, Gdansk Basin, division