Том 203, вып. 2. С. 392-412.

Izvestiya TINRO, 2023, Vol. 203, No. 2, pp. 392-412.

Научная статья УДК [551.464.38+574.55](265.54) DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-392-412 EDN: YMMCLT

МЕЖГОДОВАЯ ДИНАМИКА РАСТВОРЕННЫХ ФОРМ УГЛЕРОДА И АЗОТА В ЗОНЕ ОБИТАНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ (ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ)

 Е.В. Левченко¹, Л.И. Сабитова¹, В.А. Паренский¹, В.И. Звалинский^{2*}
 ¹ Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17;
 ² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Аннотация. Анализ межгодовой динамики растворенных форм углерода и азота летом в зоне обитания морских прибрежных растительных сообществ в акваториях зал. Петра Великого (Японское/Восточное море) с разным уровнем эвтрофикации проведен на основе подбора функциональных моделей статистическими методами. Установлено, что межгодовая динамика содержания общих растворенных азота и углерода и содержания растворенного органического и неорганического углерода имеет нелинейный характер. В соответствии с модельными трендами проведено обсуждение гидрохимического режима исследованных акваторий и дана оценка их биологической продуктивности. Выявлена высокая продуктивность прибрежных акваторий Амурского и Уссурийского заливов, которые имеют разный уровень эвтрофикации (высокий в Амурском и низкий в Уссурийском заливе). Этот результат свидетельствует о том, что высокопродуктивными могут быть прибрежные воды и с высоким, и с низким уровнем эвтрофикации. Исследование межгодовой динамики изменения содержания растворенных органического и неорганического углерода позволяет предположить, что в прибрежных биоценозах Уссурийского залива выше интенсивность продукционно-деструкционных процессов, а в прибрежье Амурского залива снижена активность биологического карбонатного насоса.

Ключевые слова: содержание растворенного углерода и азота, межгодовая динамика, морские прибрежные воды, уровень эвтрофикации, продуктивность

Для цитирования: Левченко Е.В., Сабитова Л.И., Паренский В.А., Звалинский В.И. Межгодовая динамика растворенных форм углерода и азота в зоне обитания прибрежных растительных сообществ (залив Петра Великого Японского моря) // Изв. ТИНРО. — 2023. — Т. 203, вып. 2. — С. 392–412. DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-392-412. EDN: YMMCLT.

* Левченко Елена Владимировна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, leovit@mail.ru, ORCID 0009-0000-5615-7021; Сабитова Людмила Ивановна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, popovali@mail.ru, ORCID 0000-0003-0052-8211; Паренский Валерий Александрович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, vaparensky@inbox.ru, ORCID 0000-0003-1282-4553; Звалинский Владимир Иванович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, biomar@mail.ru, ORCID 0009-0009-8238-7790. © Левченко Е.В., Сабитова Л.И., Паренский В.А., Звалинский В.И., 2023



Межгодовая динамика растворенных форм углерода и азота в зоне обитания прибрежных...

Original article

Interannual dynamics of dissolved carbon and nitrogen forms in habitats of coastal plant communities (Peter the Great Bay, Sea of Japan)

Elena V. Levchenko*, Lyudmila I. Sabitova**, Valery A. Parensky***, Vladimir I. Zvalinsky***

*-*** Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 17, Palchevskogo Str., Vladivostok, 690041, Russia
**** Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
* Ph.D., researcher, leovit@mail.ru, ORCID 0009-0000-5615-7021
*** Ph.D., researcher, popovali@mail.ru, ORCID 0000-0003-0052-8211
**** Ph.D., senior researcher, vaparensky@inbox.ru, ORCID 0000-0003-1282-4553
**** D.Biol., principal researcher, biomar@mail.ru, ORCID 0009-0009-8238-7790

Abstract. The interannual dynamics of dissolved forms of carbon and nitrogen in the habitat zone of marine coastal plant communities has been studied in the waters of Peter the Great Bay, Sea of Japan/East Sea, with different levels of eutrophication, in summer. An analysis of the obtained data based on selection of functional models by the statistical methods has shown that the interannual dynamics in the contents of total dissolved nitrogen and carbon, as well as dissolved organic and inorganic carbon, have a nonlinear pattern. The hydrochemical regime of the water areas under study is discussed and their biological productivity assessed on the basis of the model trends. High productivity was recorded from coastal waters of Amur and Ussuri Bays characterized by different levels of eutrophication (high in Amur Bay and low in Ussuri Bay). This result indicates that coastal waters with both high and low eutrophication levels can be highly productive. The study of the interannual dynamics of variations in the dissolved organic and inorganic carbon content allows an assumption that the intensity of production and destruction processes is higher in coastal biocenoses of Ussuri Bay, while the activity of the biological carbon pump in the coastal waters of Amur Bay is decreased.

Keywords: dissolved carbon and nitrogen forms content, interannual dynamics, offshore coastal waters, eutrophication level, productivity

For citation: Levchenko E.V., Sabitova L.I., Parensky V.A., Zvalinsky V.I. Interannual dynamics of dissolved carbon and nitrogen forms in habitats of coastal plant communities (Peter the Great Bay, Sea of Japan), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2023, vol. 203, no. 2, pp. 392–412. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2023-203-392-412. EDN: YMMCLT.

Введение

В морских прибрежных экосистемах изменение содержания биогенных элементов является одним из процессов, влияющих на продуктивность и функционирование растительных сообществ — автотрофных организмов бентоса, перифитона и фитопланктона [Богоров, 1967; Хайлов, 1971; Smith, 1981; Харламенко, 1985; Миничева, 1993, 1996; Смирнова и др., 1999; Hillebrand et al., 2000; Smith et al., 2005; Аржанова, 2017]. Динамика биогенных элементов, в том числе растворенных форм углерода и азота, связана с водообменом между шельфом и глубоководными районами морей. Движение, перемешивание, циркуляция вод способствуют транспорту растворенных биогенных элементов из глубоководных районов к побережью и одновременно выносу материковых стоков от побережья с последующей деградацией частиц во внутренних слоях океана [Богоров, 1967; Cauwet, 1977; Colbert and McManus, 2003; Wunsch and Ferrari, 2004; Агатова, 2017; Аржанова, 2017; Middelburg, 2019].

Природные условия и нагрузка биогенными элементами в акваториях зал. Петра Великого Японского моря различны. Акватория Амурского залива десять лет назад получила текущий статус эвтрофикации «Высокий» и «Возрастающий» [Звалинский и др., 2013]. Большей части акватории Уссурийского залива присвоен статус эвтрофикации «Низкий» с невыявленным трендом. Такой же статус получила открытая часть зал.

Петра Великого. Оценка трофического состояния акваторий зал. Петра Великого была выполнена сотрудниками ТОИ ДВО РАН на основе критериев, предложенных для региона северо-западной Пацифики экспертами NOWPAP CEARAC (Northwest Pacific Action Plan, Coastal Environmental Assessment Regional Activity Center) [NOWPAP CEARAC, 2011].

Известно, что органический углерод (C_{opr}) является наиболее репрезентативным показателем количества органического вещества природных вод и составляет около 50 % от массы органического вещества, причем доля растворенного C_{opr} — около 90 % от растворенного органического вещества (POB), поэтому растворенный C_{opr} приравнивают к POB; средняя концентрация C_{opr} в малопродуктивных морских водах составляет около 1,45 мг/л, в среднепродуктивных — 1,75, в высокопродуктивных — 2,10 мг/л и выше [Скопинцев и др., 1979; Агатова, 2017].

Следует уточнить, что общий растворенный углерод (OC_{раст}) представляет сумму растворенных органического (C_{орг}) и неорганического углерода (C_{неорг}): OC_{раст} = (C_{орг} + C_{неорг})_{раст}, а общий растворенный азот (ON_{раст}) — сумму растворенных органического (N_{орг}) и неорганического азота (N_{неорг}): ON_{раст} = (N_{орг} + N_{неорг})_{раст} [Schumacher, 2002], т.е. включает в себя аммонийную, нитратную и нитритную формы.

Цель настоящей работы — исследовать межгодовую динамику растворенных форм углерода и азота летом в зоне обитания морских прибрежных растительных сообществ в акваториях зал. Петра Великого (Японское море) с разным уровнем эвтрофикации для оценки продуктивности прибрежных акваторий и прогнозирования структурного и функционального состояния прибрежных экосистем.

Материалы и методы

Исследования выполняли в десяти прибрежных акваториях зал. Петра Великого: в бухтах Патрокл, Соболь, Тихая, Стеклянная и около свалки Горностай — Уссурийский залив (УЗ), в бухте около мыса Красного, в бухте между мысами Грозный и Фирсова, в бухте Кирпичного завода и в мелководном зал. Угловом — Амурский залив (АЗ), а также в прол. Старка со стороны о. Попова (рис. 1). Исследованные прибрежные акватории, кроме прол. Старка, находятся около п-ова Муравьева-Амурского (на котором расположен г. Владивосток) в той части заливов, где в летний период в отсутствие паводка незначительно влияние речных стоков [Подорванова и др., 1989; Карнаухов, Сергеев, 2008; Звалинский и др., 2013]: р. Раздольной, которая впадает в северную часть АЗ, и рек Артемовка и Суходол, впадающих в северную и восточную части УЗ.

Отбор проб морской воды в горизонте произрастания макрофитов (глубина 1,5–3,0 м) проводили в июне-июле 2017, 2018, 2019, 2020 и 2021 гг., когда температура воды на указанных станциях достигала 20 °C и не менее 5 дней не было осадков. Соленость морской воды в прол. Старка всегда имела значение 33 ‰. В Уссурийском заливе в бухте Патрокл в 2018 и в 2020 гг. соленость составляла 30 ‰, на всех остальных акваториях этого залива значения солености всегда были в пределах 32–34 ‰. В Амурском заливе значения солености колебались в пределах 27–33 ‰. Соленость измеряли с помощью рефрактометра WZ-201 (RHS-10). Диапазон измерения концентрации соли 0–100 ‰, с разрешением 1 ‰ и точностью ± 1 ‰.

В день отбора пробы воды (2 л) фильтровали с использованием вакуумного насоса через мембранные фильтры (0,45 мкм). Концентрацию общего растворенного углерода (ОС_{раст}) и концентрацию органического растворенного углерода (С_{орг}) в форме NPOC (невыдуваемый органический углерод) определяли методом термокаталитического окисления с ИК-регистрацией на анализаторе TOC–L_{СРN} производства Shimadzu (Япония)*. Для задания параметров анализа образцов проведена калибровка по шести точкам с использованием растворов гидрофталата калия в качестве стандарта. Кон-

^{*} User's manual. Total organic carbon analyzer TOC-LCPH/CPN. Shimadzu Corporation, 2011–2014.418 p. https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com.an/files/pim/pim_document_file/brochures/10330/415_c391e079g.pdf.

Межгодовая динамика растворенных форм углерода и азота в зоне обитания прибрежных...



Рис. 1. Карта района исследований со станциями отбора проб: 1 — прол. Старка (42°58′03″ с.ш. 131°45′00″ в.д.) (пролив между о-вами Русским и Попова); 2 — бухта Патрокл (43°04′23″ с.ш. 131°57′36″ в.д.); 3 — бухта Соболь (43°04′33″ с.ш. 131°57′46″ в.д.); 4 — бухта Тихая (43°05′12″ с.ш. 131°58′23″ в.д.); 5 — свалка Горностай (43°08′21″ с.ш. 132°03′01″ в.д.); 6 — бухта Стеклянная (43°08′41″ с.ш. 132°03′24″ в.д.) (УЗ); 7 — бухта около мыса Красного (43°11′59″ с.ш. 131°55′10″ в.д.); 8 — бухта между мысами Фирсова и Грозным (43°10′50″ с.ш. 131°54′24″ в.д.); 9 — бухта Кирпичного завода (43°08′45″ с.ш. 131°54′03″ в.д.); 10 — зал. Угловой (43°17′17″ с.ш. 132°00′30″ в.д.) (АЗ)

Fig. 1. Map of the study area with sampling stations: $1 - \text{Stark Strait} (42^{\circ}58'03'' \text{ N}, 131^{\circ}45'00'' \text{ E})$ (the strait between the islands of Russky and Popov); $2 - \text{Patrokl Cove} (43^{\circ}04'23'' \text{ N}, 131^{\circ}57'36'' \text{ E})$; $3 - \text{Sobol Cove} (43^{\circ}04'33'' \text{ N}, 131^{\circ}57'46'' \text{ E})$; $4 - \text{Tikhaya Cove} (43^{\circ}05'12'' \text{ N}, 131^{\circ}58'23'' \text{ E})$; 5 - Gornostai solid waste disposal site $(43^{\circ}08'21'' \text{ N}, 132^{\circ}03'01'' \text{ E})$; $6 - \text{Steklyannaya Cove} (43^{\circ}08'41'' \text{ N}, 132^{\circ}03'24'' \text{ E})$ (Ussuri Bay); $7 - \text{a cove near Cape Krasny} (43^{\circ}11'59'' \text{ N}, 131^{\circ}55'10'' \text{ E})$; 8 - a cove between Cape Firsova and Cape Grozny $(43^{\circ}10'50'' \text{ N}, 131^{\circ}54'24'' \text{ E})$; $9 - \text{Kirpichny Zavod Cove} (43^{\circ}08'45'' \text{ N}, 131^{\circ}54'03'' \text{ E})$; $10 - \text{Uglovoi Bay} (43^{\circ}17'17'' \text{ N}, 132^{\circ}00'30'' \text{ E})$ (Amur Bay)

центрацию неорганического растворенного углерода ($C_{\text{неорг}}$)_{раст} определяли расчетным методом: ($C_{\text{неорг}}$)_{раст} = $OC_{\text{раст}} - (C_{\text{орг}})_{\text{раст}}$. Концентрацию общего растворенного азота ($ON_{\text{раст}}$) определяли методом термокаталитического разложения с последующим хемилюминесцентным детектированием на приставке TNM–L к анализатору TOC– $L_{\text{СРN}}^*$. Для задания параметров анализа образцов проведена калибровка по шести точкам с использованием растворов нитрата калия в качестве стандарта. Стандарты, используемые для калибровки, были приготовлены строго в соответствии с руководством к прибору TOC–LCPH/CPN*. Коэффициент вариации анализа проб ОС и С_{орг} не превышал 1,5 %, проб ON_{раст} — 3,0 %.

Методы регрессионного и дисперсионного анализов приведены в справочной литературе [Pollard, 1979]. Метод регрессионного анализа подразумевает выбор модели, которая описывает в динамике полученные экспериментальные данные с наименьшей остаточной дисперсией и наименьшими ошибками оцениваемых коэффициентов (параметров) регрессии. В работе приведено исследование трех моделей — линейной,

^{*} User's manual. Total organic carbon analyzer TOC-LCPH/CPN. Shimadzu Corporation, 2011–2014.418 p. https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com.an/files/pim/pim_document_file/brochures/10330/415_c391e079g.pdf.

полиномиальной и периодической функций. Стартовые значения коэффициентов подбирали с учетом разброса значений экспериментальных данных и предполагаемого характера зависимости. Параметры моделей оценивали с использованием пакета прикладных программ Statistica 13.3 (ID ANS8121585721A134–7).

Результаты и их обсуждение

Первичный анализ полученных данных (табл. 1) выявил, что межгодовая динамика содержания общих растворенных азота и углерода, а также растворенного органического и неорганического углерода в горизонте произрастания макрофитов летом 2017–2021 гг. не соответствует линейному тренду и имеет более сложный характер. Фактический тип трендов был установлен на основе подбора их функциональных моделей статистическими методами.

Таблица 1

Содержание растворенных форм азота и углерода (ON_{раст}, OC_{раст}, C_{орг} и С_{неорг}) в зоне обитания прибрежных растительных сообществ (зал. Петра Великого Японского моря) по акваториям, мг/л

Table 1

Content of dissolved nitrogen and carbon forms (in mg/L) in the habitats of coastal plant communities (Peter the Great Bay, Sea of Japan) for the following water areas

Arpatopur No otau		ON _{pact}	OCpact	Сорг	С _{неорг}
Акватория, № станции			<u>2017 г.</u>		
Прол. Старка	1	0,20	20,0	1,6	18,4
Уссурийский залив	2	0,17	20,1	1,6	18,5
	3	0,15	19,6	1,3	18,3
	4	0,18	20,4	2,0	18,4
	5	0,12	-	1,9	-
	6	0,15	18,5	2,0	16,5
Амурский залив	7	0,30	20,9	1,6	19,3
	8	0,30	21,2	2,6	18,6
	9	0,17	17,2	2,4	14,8
	10	_	_	_	-
		2018 г.			•
Прол. Старка	1	0,13	17,1	1,8	15,3
	2	0,16	16,1	2,1	14,0
	3	0,17	24,8	3,6	21,2
Уссурийский залив	4	0,14	16,3	1,6	14,4
	5	0,11	20,6	1,6	19,0
	6	0,09	20,9	1,6	19,3
Амурский залив	7	0,25	13,6	4,3	9,3
	8	0,24	18,7	4,2	14,5
	9	0,26	15,0	4,0	11,0
	10	0,33	14,3	4,4	9,9
			2019 г.		
Прол. Старка	1	0,28	12,9	2,3	10,6
Уссурийский залив	2	0,25	13,3	2,6	10,7
	3	0,18	12,8	2,9	9,9
	4	0,33	13,3	3,0	10,3
	5	0,41	13,0	2,6	10,4
	6	0,39	14,1	2,4	11,7
	7	0,36	13,3	4,2	9,1
	8	0,31	19,2	4,4	14,8
Амурский залив	9	0,47	16,0	4,5	11,5
	10	0,53	13,4	3,7	9,7

A		ONpact	OC _{pact}	Copr	С _{неорг}	
Акватория, № стані	ции		202	0 г.		
Прол. Старка	1	0,16	19,0	1,9	17,1	
Уссурийский залив	2	0,19	11,8	1,4	10,4	
	3	0,19	15,0	1,8	13,2	
	4	0,24	12,3	1,3	11,0	
	5	0,11	6,7	0,8	5,9	
	6	0,16	5,7	0,8	4,9	
Амурский залив	7	0,27	17,7	3,5	14,2	
	8	0,29	20,5	3,3	17,2	
	9	0,24	19,2	2,5	16,7	
	10	0,28	20,0	3,0	17,0	
			202	2021 г.		
Прол. Старка	1	0,14	19,6	1,9	17,7	
Уссурийский залив	2	0,18	16,4	2,3	19,6	
	3	0,21	21,9	2,3	19,6	
	4	0,21	21,8	2,2	19,6	
	5	0,24	21,3	2,3	19,0	
	6	0,16	22,3	2,0	20,3	
Амурский залив	7	0,25	18,2	2,6	15,6	
	8	0,24	16,4	3,0	13,4	
	9	0,25	20,2	2,7	17,5	
	10	0,24	18,8	3,2	15,6	

Окончание табл. 1 Table 1 finished

Примечание. Номера станций как на рис. 1.

Сначала исследовали возможность описания экспериментальных данных линейной функцией. Показатели детерминации (R^2) при аппроксимации полученных данных линейной функцией во всех случаях меньше 20 % и линейные функции незначимы: по содержанию общего растворенного азота R^2 для A3 — 0,6 %, для У3 — 6,0, для прол. Старка — 5,4 %; по содержанию общего растворенного углерода для A3 — 1,9 %, для У3 — 1,4, для прол. Старка — 0,4 %; по содержанию растворенного органического углерода для A3 — 0,50 %, для У3 — 0,008, для прол. Старка — 18,80 %; по содержанию растворенного неорганического углерода для A3 — 1,70 %, для У3 — 1,60, для прол. Старка — 0,040 %. Во всех случаях расчетные значения критериальной статистики *F* меньше верхних 5 %-ных точек *F*-распределения [Pollard, 1979]. Таким образом, линейные функции незначимы. С учетом незначимости линейных функций данные для всех акваторий по всем исследованным растворенным формам углерода и азота можно было бы трактовать как средние значения за пять лет с ошибками. Но дальнейший анализ показал, что отклонения от среднего неслучайны.

После исследования линейных трендов была оценена возможность описания полученных данных полиномиальной функцией. Полином четвертой степени:

$$Y = a + b(X - 2018) + c(X - 2018)^{2} - d(X - 2018)^{3} + e(X - 2018)^{4},$$

где *Y* — содержание растворенной формы С или N в исследуемой акватории; *X* — годы отбора проб; *a, b, c, d, e* — коэффициенты, — является удачной интерполяцией данных. Но с дальнейшим течением времени или, наоборот, во время, предшествующее периоду наблюдений, эта функция развивается как бесконечно возрастающие ветви (рис. 2), что не позволяет использовать ее для прогностических оценок изменения содержания исследуемого биогенного элемента. Например, межгодовая динамика содержания общего растворенного азота в Уссурийском заливе описывается полиномом четвертой степени так: $Y = 0,134 + 0,246(X - 2018) + 0,058(X - 2018)^2 - 0,167(X - 2018)^3 + 0,041(X - 2018)^4$ (средняя стандартная ошибка 23,3 %; $R^2 = 0,631$; критериальная статистика F = 8,54 >



Рис. 2. Межгодовая динамика общего растворенного азота в горизонте произрастания макрофитов в Уссурийском заливе: область интерполяции полиномиальной функцией четвертой степени показана *толстой линией*, области экстраполяции — *тонкой линией*

Fig. 2. Interannual dynamics of total dissolved nitrogen in the macrophyte growth zone in Ussuri Bay: the interpolation area of a 4th degree polynomial is indicated by a *thick line*; the extrapolation areas, by a *thin line*

> $F_{4,20}$ = 2,87). Если следовать логике развития событий, обусловленных полиномиальной моделью, то экстраполяция этой функции (рис. 2) показывает, что в последующие годы ожидается бесконечное увеличение содержания общего растворенного азота. Но это нереальное развитие событий. В реальности содержание азота будет изменяться в определенном диапазоне.

Мы определили, что изменения исследуемых данных могут быть также представлены в виде периодических функций (модели 1–12) (табл. 2, рис. 3–6). В общем виде это функция косинуса со сдвигом в положительную область определяемой величины (т.е. содержание или общего растворенного азота, или общего растворенного углерода, или растворенного органического углерода, или растворенного неорганического углерода):

$$Y = a\left(\cos\left(2\pi\left(\frac{X-b}{c}\right)\right) + 1\right) + d,$$

где a — амплитуда отклонения содержания определяемой величины от ее среднего значения; b — временной сдвиг (фаза); c — период исследуемой функции косинуса; d — минимальное или максимальное значение определяемой величины после вертикального сдвига функции косинуса в положительную область; X — годы отбора проб.

Ни одна из полученных моделей не противоречит первичным данным. Показатель детерминации R^2 во всех случаях больше 52 %. Подобранные коэффициенты моделей характеризуются достаточно небольшими стандартными ошибками, не меняющими знаки коэффициентов на противоположные. Средние относительные ошибки демонстрируют стабильность подобранных параметров моделей (не превышают 9 %). Экстраполяция периодической функции не противоречит ожиданию, что содержание растворенной формы исследуемого биогенного элемента будет изменяться в определенном диапазоне.

Функции для Амурского и Уссурийского заливов и прол. Старка, описывающие межгодовую динамику общего растворенного азота в 2017–2021 гг. (модели 1–3, табл. 2, рис. 3), имеют одинаковые амплитуды ($\approx 0,1$ мг/л) и почти одинаковые периоды ≈ 3 года (в прол. Старка и в УЗ — 2,8–2,9 года, в АЗ — 3,1 года). Средние уровни содержания, относительно которых происходили периодические колебания в УЗ и прол. Старка, одинаковы ($\approx 0,2$ мг/л). Для АЗ отмечены наибольший средний уровень ($\approx 0,3$ мг/л) и наибольший период ($\approx 3,1$ года).

Функции, описывающие межгодовую динамику общего растворенного углерода в Амурском и Уссурийском заливах и в прол. Старка (модели 4–6, табл. 2), различаются по амплитуде, периоду и не совпадают по фазе (рис. 4). Согласно полученным моделям, в 2017–2021 гг. в прол. Старка содержание общего растворенного углерода изменялось с периодом ≈ 3,3 года, в АЗ — с периодом ≈ 3,7 и в УЗ — с периодом ≈ 3,9 года. Наибольшая

Модели межгодовой динамики содержания общих растворенных азота и углерода и растворенных органического и неорганического углерода в зоне обитания прибрежных растительных сообществ (зал. Петра Великого Японского моря) в 2017–2021 гг. по акваториям

Table 2

Models for interannual dynamics of the total dissolved nitrogen and carbon contents and the dissolved organic and inorganic carbon contents in the habitats of coastal plant communities (Peter the Great Bay, Sea of Japan) for the water areas in 2017–2021

Акватория, модель	Средняя относительная ошибка, %	Сила влияния <i>R</i> ²	Критериальная статистика F (в сравнении с верхними 5 %-ными точками F-распределения)						
Содержание общего рас	Содержание общего растворенного азота (ON)								
Амурский залив, 1: $Y = 0,321^2 \left(\cos \left(2\pi \left(\frac{X - 2019,014}{1,764^2} \right) \right) + 1 \right) + 0,212$	5,9	0,622	$F = 8,667 > F_{3,15} = 3,29$						
Уссурийский залив, 2: $Y = 0,316^2 \left(\cos \left(2\pi \left(\frac{X - 2016,102}{2,888} \right) \right) + 1 \right) + 0,113$	7,9	0,565	$F = 9,333 > F_{3,21} = 3,07$						
Прол. Старка, модель 3: $Y = 0.298^2 \left(\cos \left(2\pi \left(\frac{X - 2019,135}{2,842} \right) \right) + 1 \right) + 0.326^2$	2,7	0,992	$F = 40,984 > F_{3,11} = 3,98$						
Содержание общего расти	воренного углер	ода (OC)	1						
Амурский залив, 4: $Y = 1,654^2 \left(\cos \left(2\pi \left(\frac{X - 2016,688}{3,657} \right) \right) + 1 \right) + 14,487$	7,2	0,521	$F = 5,429 > F_{3,15} = 3,29$						
Уссурийский залив, 5: $Y = 2,497^2 \left(\cos \left(2\pi \left(\frac{X - 2017,605}{3,868} \right) \right) + 1 \right) + 9,849$	5,8	0,746	$F = 19,619 > F_{3,20} = 3,10$						
Прол. Старка, 6: $Y = 1,981^2 \left(\cos \left(2\pi \left(\frac{X - 2017,231}{3,319} \right) \right) + 1 \right) + 12,847$	2,9	0,993	$F = 46,483 > F_{3,11} = 3,98$						
Содержание растворенного органического углерода (Соог)									
Амурский залив, 7: $Y = 1,047 \left(\cos \left(2\pi \left(\frac{X - 2016,743}{3,766} \right) \right) + 1 \right) + 4,577$	6,1	0,789	$F = 18,687 > F_{3,15} = 3,29$						
Уссурийский залив, 8: $Y = -0,730 \left(\cos \left(2\pi \left(\frac{X - 2017,375}{2,788} \right) \right) + 1 \right) + 2,815$	8,4	0,539	$F = 8,174 > F_{3,21} = 3,07$						
Прол. Старка, 9: $Y = -0.319(\cos(2\pi(X - 2017,356) \times 0.319) + 1) + 2.290,$ c = 1/a	4,4	0,830	$F = 4,909 > F_{2,12} = 3,89$						
Содержание растворенного неорганического углерода (С _{неорг})									
Амурский залив, 10: $Y = 3,772 \left(\cos \left(2\pi \left(\frac{X - 2016,709}{3,676} \right) \right) + 1 \right) + 9,917$	8,0	0,664	$F = 9,889 > F_{3,15} = 3,29$						
Уссурийский залив, 11: $Y = 6,088 \left(\cos \left(2\pi \left(\frac{X - 2017,543}{3,893} \right) \right) + 1 \right) + 7,962$	7,1	0,797	$F = 26,161 > F_{3,20} = 3,10$						
Прол. Старка, 12: $Y = 4,262 \left(\cos \left(2\pi \left(\frac{X - 2017,248}{3,298} \right) \right) + 1 \right) + 10,534$	2,4	0,998	$F = 153,976 > F_{3,11} = 3,98$						

Таблица 2



Рис. 3. Межгодовая динамика общего растворенного азота в горизонте произрастания макрофитов в 2017–2021 гг. (плюс экстраполяция): I — в Амурском заливе (\bullet); 2 — в Уссурийском заливе (Δ); 3 — в прол. Старка (\circ)

Fig. 3. Interannual dynamics of total dissolved nitrogen in the macrophyte growth zone in 2017–2021 (plus extrapolation): 1 — in Amur Bay (•); 2 — in Ussuri Bay (Δ); 3 — in the Stark Strait (\circ)

Рис. 4. Межгодовая динамика общего растворенного углерода в горизонте произрастания макрофитов в 2017–2021 гг. (плюс экстраполяция): 4 — в Амурском заливе (•); 5 — в Уссурийском заливе (Δ); 6 — в прол. Старка (\circ)

Fig. 4. Interannual dynamics of total dissolved carbon in the macrophyte growth zone in 2017–2021 (plus extrapolation): 4 — in Amur Bay (\bullet); 5 — in Ussuri Bay (Δ); 6 — in the Stark Strait (\circ)

амплитуда отмечена для УЗ (\approx 6,2 мг/л). Для прол. Старка амплитуда \approx 3,9 мг/л и для АЗ \approx 2,7 мг/л. Средний уровень содержания общего растворенного углерода, относительно которого происходили гармонические колебания, в УЗ \approx 16,1 мг/л, в прол. Старка \approx 16,8, в АЗ \approx 17,2 мг/л.

Функции, описывающие межгодовую динамику растворенного органического углерода в Амурском и Уссурийском заливах и в прол. Старка, различаются по амплитуде, периоду и не совпадают по фазе (рис. 5). Согласно полученным моделям (7–9) (табл. 2), в 2017–2021 гг. в УЗ содержание растворенного органического углерода изменялось с периодом приблизительно 2,8 года, в прол. Старка — с периодом 3,1 года и в АЗ — с периодом 3,8 года. Наибольшая амплитуда отмечена для АЗ (\approx 1,0 мг/л), для УЗ амплитуда \approx 0,7 мг/л и для прол. Старка \approx 0,3 мг/л. Средний уровень содержания растворенного органического углерода, относительно которого происходили периодические колебания, в прол. Старка составил \approx 2,0 мг/л, в УЗ — \approx 2,1, в АЗ — \approx 3,5 мг/л.

Функции, описывающие межгодовую динамику растворенного неорганического углерода в Амурском и Уссурийском заливах и в прол. Старка, имеют разные периоды и амплитуды и не совпадают по фазе (рис. 6). Согласно полученным моделям (10–12) (табл. 2), в 2017–2021 гг. в прол. Старка содержание растворенного неорганического углерода изменялось с периодом приблизительно 3,3 года, в АЗ — с периодом приблизительно 3,7 года и в УЗ — с периодом 3,9 года. Наибольшая амплитуда отмечена для УЗ (≈ 6,1 мг/л), для прол. Старка амплитуда ≈ 4,3 мг/л и для АЗ ≈ 3,7 мг/л. Средний Рис. 5. Межгодовая динамика растворенного органического углерода в горизонте произрастания макрофитов в 2017–2021 гг. (плюс экстраполяция): 7 — в Амурском заливе (•); 8 — в Уссурийском заливе (△); 9 — в прол. Старка (○)

Fig. 5. Interannual dynamics of dissolved inorganic carbon in the macrophyte growth zone in 2017– 2021 (plus extrapolation): 7 — in Amur Bay (•); 8 — in Ussuri Bay (Δ); 9 — in the Stark Strait (\circ)

Рис. 6. Межгодовая динамика растворенного неорганического углерода в горизонте произрастания макрофитов в 2017–2021 гг. (плюс экстраполяция): 10 — в Амурском заливе (\bullet); 11 — в Уссурийском заливе (Δ); 12 — в прол. Старка (\circ)

Fig. 6. Interannual dynamics of dissolved inorganic carbon in the macrophyte growth zone in 2017–2021 (plus extrapolation): 10 — in Amur Bay (•); 11 — in Ussuri Bay (Δ); 12 — in the Stark Strait (\circ)



уровень содержания растворенного неорганического углерода, относительно которого происходили периодические колебания, в прол. Старка составил \approx 4,8 мг/л, в УЗ — \approx 14,1, в АЗ — \approx 13,7 мг/л.

Подбор функциональных моделей статистическими методами выявил, что межгодовая динамика изменения содержания общих растворенных азота и углерода (ON и ОС_{раст}) и растворенного органического и неорганического углерода (С_{орг} и С_{неорг}) в исследованных прибрежных водах зал. Петра Великого в 2017–2021 гг. наиболее правдоподобно, достоверно и значимо может быть описана в виде периодических функций (1–12). Нелинейность изменения содержания биогенных элементов в морской среде была отмечена и ранее, например в работах Brito с соавторами [2015] и Ю.И. Зуенко и В.И. Рачкова [2015]. Полученные описания межгодовой динамики в виде периодических функций согласуются с представлением о том, что обогащение морской среды биогенными элементами тесно связано с процессами перемешивания вод или, иначе говоря, с общей циркуляцией вод. Апвеллинг и даунвеллинг, адвекция и конвекция, циклонические и антициклонические круговороты, дивергенция и конвергенция, сезонное перемешивание вод, термохалинная циркуляция, а также возмущения, вызываемые приливами, течениями, кратковременными непериодическими колебаниями уровня моря (циклоны, тайфуны, сейши), — все эти процессы перемешивания воды возбуждают в ней колебательное движение, обладающее разными периодами и амплитудой. Общая циркуляция, или осредненное движение вод в масштабе, соизмеримом с

размерами бассейна, может сохранять основные черты в течение длительного промежутка времени — сезон, год [Юрасов, Яричин, 1991]. Особенности общей циркуляции, которые представляют собой единство горизонтальных и вертикальных движений, являются следствием действия ряда крупномасштабных факторов: климатических, геоморфологических, бароклинности, водообмена с соседними водными бассейнами, взаимодействия с атмосферой и др. [Wunsch and Ferrari, 2004]. В настоящее время не созданы модели, описывающие зависимость содержания растворенных форм углерода и азота от общей динамики вод зал. Петра Великого Японского моря. По-видимому, продолжается период накопления необходимых для моделирования данных.

В частности, показано, что особенности пространственно-временной изменчивости гидрологических параметров придонных вод Амурского залива определяются горизонтальной адвекцией, контролируемой процессами апвеллинг и даунвеллинга, возникновение которых обусловлено муссонным характером климата Приморья [Тищенко и др., 2015]. Гидрологический режим Уссурийского залива в значительной мере определяется соотношением интенсивностей апвеллинг и даунвеллинга под действием сгонно-нагонных ветров, характерных для муссонной циркуляции атмосферы над южным Приморьем [Семкин и др., 2012]. В целом воды зал. Петра Великого подвержены регулярному воздействию ветровых апвеллингов–даунвеллингов [Жабин и др., 1993, 2017; Зуенко, Надточий, 2004, 2018; Юрасов, Вилянская, 2010; Храпченков и др., 2014; Зуенко, Рачков, 2015; Кошелева и др., 2021].

Предполагается, что поле течений в Амурском заливе в летний период имеет значительную завихренность: на акватории АЗ могут находиться пять вихревых объектов — три антициклона и два циклона [Карнаухов, Сергеев, 2008]. В частности, в приустьевом участке АЗ расположен антициклонический вихрь, заполненный более пресной и холодной водой из р. Раздольной, которая впадает в северную часть залива, и под влиянием силы Кориолиса речная вода прижимается к западному берегу [Карнаухов, Сергеев, 2008]. Поэтому исследованные нами прибрежные акватории вдоль восточного побережья АЗ находятся в той части, где в летний период минимально влияние речного стока. Но в то же самое время обнаруженные циклонические вихри [Карнаухов, Сергеев, 2008] могут поднимать к поверхности восточного побережья залива более холодную и богатую биогенными элементами воду из нижележащих слоев.

Уссурийский залив более открыт доступу япономорских вод. Из мористой части шельфа по ложбине с западной стороны залива может входить поток Приморского течения [Карнаухов, Сергеев, 2008], являющегося постоянным. Известна общая схема постоянных течений внутри Японского (Восточного) моря, которая фактически может быть представлена как ячеистое циклоническое течение, направленное против часовой стрелки [Юрасов, Яричин, 1991; Жабин и др., 2003]. Горизонтальная структура Приморского течения имеет турбулентный характер [Юрасов, Яричин, 1991] и вихревую структуру [Пономарев и др., 2013], а вследствие действия муссонных ветров летом и осенью Приморское течение на поверхности Японского моря ослабевает и может вообще не наблюдаться [Белинский, Истошин, 1950]. Благодаря наличию мощного поверхностного Цусимского течения в виде постоянно действующей реки, поверхностные воды Японского моря являются по сути проточными [Бражников, 1904; Юрасов, Яричин, 1991; Гидрометеорология и гидрохимия морей, 2003; Kida et al., 2016; Ohshima et al., 2017; Lee et al., 2020].

Многочисленные исследования показывают наличие взаимосвязи региональных океанических колебаний с циркуляцией вод Мирового океана. Некоторые из наиболее известных глобальных осцилляций распространяются на большие территории земного шара; они включают в себя Тихоокеанское десятилетнее колебание, Южное колебание Эль-Ниньо, Североатлантическое колебание и колебание Мэддена–Джулиана [Doney, 2010; De Viron et al., 2013]. Признаки наличия глобальных осцилляций [Wunsch and Ferrari, 2004] следуют из результатов ряда исследований [Lee, McPhaden, 2008; Kim, An, 2013; Nakamura, 2013]. На мультидекадном временном масштабе (25–35 лет) показано

развитие глубокой конвекции до 1000 м и более в Атлантическом и до 400–500 м в Тихом океанах [Бышев, Орлов, 1993; Бышев и др., 2016]. Установлено наличие квазисинхронной мультидекадной осцилляции теплосодержания верхнего деятельного слоя океана, которая может синхронизировать региональные океанические осцилляции [Byshev et al., 2017; Бышев и др., 2020].

В работе Colbert и McManus [2003] представлено заключение о том, что обогащение биогенными элементами морской среды акваторий заливов в северо-западной части Тихого океана, удаленных от устьев рек, в большей степени связано не с антропогенной нагрузкой в результате эвтрофикации, а скорее с доставкой питательных веществ океаном через прибрежный апвеллинг. Преобладающая роль апвеллинга в эстуарных заливах, в том числе в окраинных морях северной части Тихого океана, по сравнению с эвтрофикацией отмечена также другими исследователями, например Prego [1993], Mackas и Harrison [1997], Chen с соавторами [2004]. Анализ среднемноголетних изменений концентраций биогенных элементов в поверхностном слое Амурского залива в 1980- и 2000-е гг. показал, что экосистема Амурского залива в летний период не проявляет сильной зависимости от процессов, связанных с сушей, таких как материковый сток, несмотря на то, что этот залив полузакрытый и в него впадает крупная река [Зуенко, Рачков, 2015].

Исследование функций (1–12), описывающих межгодовую динамику растворенных форм углерода и азота в прибрежных акваториях зал. Петра Великого, показало, что они имеют разные периоды, которые не кратны одному году. Такая цикличность колебаний определяется сложной природой формирования концентраций всех биогенных элементов для разных акваторий Амурского залива [Зуенко, Рачков, 2015] и зал. Петра Великого в целом. Это приводит к тому, что в один и тот же период отбора проб (в нашем исследовании это середина летнего сезона) мы можем наблюдать и максимальные значения (например, содержание общего растворенного азота в АЗ, УЗ и в прол. Старка в 2019 г., см. рис. 3), и минимальные значения (например, содержание общего растворенного углерода в прол. Старка в 2019 г. (см. рис. 4) или содержание растворенного органического углерода в АЗ в 2017 г. (см. рис. 5)), и промежуточные значения между минимумом и максимумом (например, содержание общего растворенного азота в АЗ, УЗ и прол. Старка в 2017, 2020 и в 2021 гг., см. рис. 3).

Гидрохимический режим определяется не только гидрологическими условиями, но и биохимическими процессами на дне и в толще водной массы. Рядом исследователей отмечена закономерность: чем выше величина первичной продукции в слое фотосинтеза, тем больше С_{орг} как в водной толще, так и в верхнем слое донных осадков [Скопинцев и др., 1979; Агатова, 2017].

Средний уровень содержания растворенного C_{opr} в прибрежных акваториях, прилежащих к побережью г. Владивостока, — в Амурском и Уссурийском заливах — равен соответственно $\approx 3,5$ мг/л (290 мкМ) и $\approx 2,1$ мг/л (175 мкМ), что позволяет отнести эти акватории к высокопродуктивным морским водам [Скопинцев и др., 1979; Агатова, 2017]. Прибрежные воды в прол. Старка можно отнести к среднепродуктивным (средний уровень содержания растворенного C_{opr} равен $\approx 2,0$ мг/л, или 170 мкМ). Ранее было показано, что воспроизводительная способность сообществ эпифитных диатомей на тех же самых исследованных прибрежных акваториях снижается в ряду Амурский залив — Уссурийский залив — прол. Старка [Паренский, Левченко, 2018].

Сравнивая полученные нами величины среднего уровня содержания растворенного C_{opr} с количественными оценками в других исследованиях, можно отметить следующее. В континентальных шельфовых водах умеренных и тропических зон содержание растворенного C_{opr} изменяется в широком диапазоне: от 30 мкМ в море Росса [Carlson et al., 2000] до приблизительно 300 мкМ в западной части Черного моря [Ducklow et al., 2007] — обзор Kumari и Mohan [2018]. Результаты нашего исследования входят в этот диапазон.

Процентное соотношение общего растворенного азота от суммы общих растворенных углерода и азота в зоне обитания прибрежных растительных сообществ летом в 2017–2021 гг. на исследованных акваториях в Амурском заливе составляло 1,3–2,6 % и было в среднем в 1,4 раза выше, чем в Уссурийском заливе (0,7–2,2 %) и в прол. Старка (0,7–2,1 %). Это соответствует представлению о более высоком уровне эвтрофикации Амурского залива [Звалинский и др., 2013].

В прибрежных водах Амурского залива период изменения содержания растворенных С_{оог} и С_{неорг} одинаковый (≈ 3,7 года), в прибрежных водах в прол. Старка периоды изменения содержания С_{орг} и С_{неорг} близкие — 3,1 и 3,3 года, а в прибрежных водах Уссурийского залива период изменения содержания С_{орг} в 1,4 раза меньше, чем период изменения С_{неорг} (соответственно 2,8 и 3,9 года). Поскольку наибольшую долю в растворенном органическом веществе составляет растворенный органический углерод [Скопинцев и др., 1979], можно предположить, что в исследованных прибрежных биоценозах УЗ выше интенсивность продукционно-деструкционных процессов. Это может проявляться неустойчивым состоянием динамики численности (отсутствие предельных циклов, псевдохаос) в сообществах продуцентов, что, в частности, было показано для сообществ диатомовых водорослей эпифитона в этих же прибрежных биоценозах УЗ [Паренский, Левченко, 2018]. Эти автотрофные сообщества участвуют в биологическом углеродном насосе. Из-за неустойчивой динамики численности сообщества эпифитных диатомей дают неустойчивую (вариабельную) продукцию. Если предположить, что и сообщества других морских автотрофов в УЗ численно нестабильны, то и их продукция также неустойчива. А значит, и в целом нестабилен биологический насос, и нестабильна доля растворенного органического вещества от биологического насоса. Но процесс перемешивания, по-видимому, выравнивает и стабилизирует уровень растворенной органики. В нашем исследовании это подтверждают данные об одинаковом содержании растворенных форм азота и углерода в соседних исследованных бухтах в Уссурийском заливе (см. табл. 1, рис. 1). В прибрежной зоне бухты Стеклянной макроводоросли встречаются единично. А бухта около бывшей свалки Горностай богата обильными сообществами макрофитов: Ulva lactuca Linnaeus, Dictvota dichotoma (Hudson) Lamouroux, Stephanocvstis crassipes (Mertens ex Turner) Draisma, Ballesteros, F. Rousseau et T. Thibaut (= *Cystoseira crassipes* (Mertens ex Turner) C. Agardh) и др.

Средние уровни растворенного С_{неорг} в цепочке прол. Старка — УЗ — АЗ имеют значения соответственно 14,8 — 14,1 — 13,7 мг/л. Полученные данные не противоречат закономерностям растворимости как физико-химического процесса. СО₂ лучше растворяется в менее соленых и более холодных водах и при меньшем содержании биогенных элементов. Поэтому при одинаковой температуре воды 20 °C в прибрежных водах УЗ средний уровень С_{неорг} выше, чем в прибрежных водах АЗ (средний уровень содержания С_{орг} в УЗ ниже, чем в АЗ, — 2,1 мг/л < 3,5 мг/л, как и средний уровень содержания ON_{раст} — 0,2 мг/л < 0,3 мг/л). А в прибрежных водах и такая же, как в прибрежье открытой части УЗ и АЗ, но средний уровень содержания раствораторатораторатораторатора и соленость в период исследований такая же, как в прибрежье открытой части УЗ и АЗ, но средний уровень содержания растворатораторатораторатора и 0,2 мг/л).

Растворенный неорганический углерод содержится в простых соединениях, таких как диоксид углерода, угольная кислота, бикарбонат и карбонат (CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-}), причем обычно 99 % растворенного неорганического углерода находится в форме ионов бикарбоната и карбоната [Williams, Follows, 2011].

На обмен неорганического углерода влияет целый ряд процессов, в том числе продукционных. В частности, морские автотрофные организмы (водоросли, морские травы) используют растворенный неорганический углерод для создания органического вещества путем фотосинтеза, а организмы-кальцификаторы поглощают его в процессах биоминерализации. Это, например, кокколитофориды (группа одноклеточных Межгодовая динамика растворенных форм углерода и азота в зоне обитания прибрежных...

планктонных гаптофитовых водорослей, образующих на поверхности известковые пластинки — кокколиты; кокколитофориды составляют до 90 % и более нанопланктона [Moheimani et al., 2012]), секреционные фораминиферы (раковинные одноклеточные животные из группы протистов [Modern Foraminifera, 2003]) и остракоды (микроскопические ракообразные, имеющие двустворчатую известковую раковину; в зал. Петра Великого обитает не менее 400 видов остракод [Шорников, Зенина, 2014]), а также различные моллюски и другие морские организмы. Средний уровень растворенного С_{неорг} в прибрежных водах Амурского залива ниже, чем в прибрежных водах Уссурийского залива и прол. Старка. Проведенные ранее исследования [Павлюк и др., 2001; Тагазоva, 2008; Шорников, Зенина, 2014; Тарасова и др., 2016] показали, что остракоды и секреционные фораминиферы отрицательно реагируют на эвтрофирование и в АЗ с высоким уровнем эвтрофикации отмечено наибольшее сокращение количества видов и снижение численности в сообществах этих организмов-кальцификаторов. Учитывая вышесказанное, можно предположить, что в АЗ организмы-кальцификаторы испытывают недостаток карбоната и карбонатный насос как компонент биологического насоса для твердых тканей в прибрежье залива работает менее активно.

Таким образом, анализ полученных данных на основе подбора функциональных моделей статистическими методами выявил, во-первых, высокую продуктивность прибрежных акваторий Амурского и Уссурийского заливов и среднюю продуктивность прибрежных вод в прол. Старка. Это, в частности, демонстрирует в исследованных прибрежных акваториях работу биологического насоса, ответственного за круговорот органического вещества, образованного автотрофными организмами во время фотосинтеза — насос мягких тканей. Во-вторых, установлено, что средний уровень растворенного С_{неорг} в прибрежных водах Амурского залива ниже, чем в прибрежных водах Уссурийского залива и прол. Старка, что может оказывать отрицательное влияние на работу биологического карбонатного насоса, ответственного за круговорот карбоната кальция (в долгосрочной перспективе способствующего снижению концентрации CO₂ в атмосфере [Raven, 2009]).

Заключение

Межгодовая динамика изменения содержания общих растворенных азота и углерода (ON и OC) и растворенного органического и неорганического углерода (С_{орг} и С_{неорг}), исследованная летом в зоне обитания морских прибрежных растительных сообществ в трех акваториях зал. Петра Великого Японского моря с разным уровнем эвтрофикации (Амурский залив, Уссурийский залив и прол. Старка), наиболее достоверно может быть описана в виде периодических функций. Ни одна из полученных моделей не противоречит первичным данным.

Средний уровень содержания растворенного С_{орг} в прибрежных акваториях, прилежащих к побережью г. Владивостока, — Амурском заливе (высокий уровень эвтрофикации) и Уссурийском заливе (низкий уровень эвтрофикации) — равен соответственно 3,5 и 2,1 мг/л, что позволяет отнести эти акватории к высокопродуктивным морским водам. Прибрежные воды в прол. Старка (низкий уровень эвтрофикации) со средним уровнем содержания растворенного С_{орг} 2,0 мг/л можно отнести к среднепродуктивным морским водам. Эти данные демонстрируют, что высокопродуктивными могут быть воды и с высоким, и с низким уровнем эвтрофикации, но повышение уровня биогенных элементов в эвфотическом слое (до не определенного в данном исследовании, но, несомненно, существующего предела) увеличивает продуктивность морских прибрежных акваторий.

Сравнение периодов изменения содержания растворенных С_{орг} и С_{неорг} и анализ среднего уровня С_{неорг} в исследованных прибрежных водах двух заливов и пролива позволяет предположить, что в прибрежных биоценозах Уссурийского залива выше интенсивность продукционно-деструкционных процессов, а в прибрежье Амурского залива снижена активность биологического карбонатного насоса.

Благодарности (ACKNOLEDGEMENTS)

Авторы выражают благодарность водолазу ННЦМБ ДВО РАН К.К. Дудка за выполнение подводных работ при отборе проб.

The authors express their gratitude to K.K. Dudka, a diver of the NSCMB FEB RAS, for performing underwater work during sampling.

Финансирование работы (FUNDING)

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования. The study has budget funding.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все приемлемые национальные, институциональные и международные этические принципы соблюдены.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

All applicable national, institutional and international ethical guidelines are implemented.

The authors declare that they have no conflict of interests.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Е.В. Левченко — планирование работ, сбор и обработка проб, получение и анализ результатов, написание статьи; Л.И. Сабитова — получение и анализ результатов, написание статьи; В.А. Паренский — анализ результатов, обсуждение; В.И. Звалинский — анализ результатов, обсуждение.

E.V. Levchenko — research planning, sample collection and processing, obtaining and analyzing results, text writing and illustrations; L.I. Sabitova — obtaining and analyzing results and text writing; V.A. Parensky — analysis of results, discussion; V.I. Zvalinsky — analysis of results, discussion.

Список литературы

Агатова А.И. Органическое вещество в морях России : моногр. — М. : ВНИРО, 2017. — 260 с.

Аржанова Н.В. Гидрохимические характеристики морского водоема как показатель уровня его биологической продуктивности // Тр. ВНИРО. — 2017. — Т. 169. — С. 104–116.

Белинский Н.А., Истошин Ю.В. Приморское течение по материалам экспедиции шхуны «Россинанте» 1936 г. // Тр. ЦИПа. — 1950. — Вып. 017. — С. 132–143.

Богоров В.Г. Биологическая трансформация и обмен энергии и веществ в океане // Океанол. — 1967. — Т. 7, вып 5. — С. 839–859.

Бражников В.К. Материалы по топографии и физической географии Николаевского рыбопромышленного района: отчет зав. рыб. промыслами при Приамур. упр. гос. имуществ (Рыбная промышленность Дальнего Востока). — СПб. : тип. В. Киршбаума, 1904. — 166 с.

Бышев В.И., Анисимов М.В., Гусев А.В. и др. О мультидекадной осцилляции теплосодержания Мирового океана // Океанол. исслед. — 2020. — Т. 48, № 3. — С. 76–95. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(3).5.

Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. и др. О статистической значимости и климатической роли Глобальной атмосферной осцилляции // Океанол. — 2016. — Т. 56, № 2. — С. 179–185. DOI: 10.7868/S0030157416020039.

Бышев В.И., Орлов В.С. О природе внутритермоклинной линзы на субполярном фронте в Северной Атлантике // Океанол. — 1993. — Т. 33, № 3. — С. 340–346.

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8 : Японское море; вып. 1 : Гидрометеорологические условия / под ред. А.С. Васильева, Ф.С. Терзиева, А.Н. Косарева. — СПб. : Гидрометеоиздат, 2003. — 400 с.

Жабин И.А., Грамм-Осипова О.Л., Юрасов Г.И. Ветровой апвеллинг у северо-западного побережья Японского моря // Метеорол. и гидрол. — 1993. — № 10. — С. 82–86.

Жабин И.А., Дмитриева Е.В., Кильматов Т.Р., Андреев А.Г. Влияние ветровых условий на изменчивость апвеллинга у побережья Приморья (северо-западная часть Японского моря) // Метеорол. и гидрол. — 2017. — № 3. — С. 58–67.

Жабин И.А., Таранова С.Н., Талли Л.Д. Промежуточные воды повышенной солености в северной части Японского моря // Метеорол. и гидрол. — 2003. — № 4. — С. 63–72.

Звалинский В.И., Тищенко П.П., Михайлик Т.А., Тищенко П.Я. Эвтрофикация зал. Петра Великого // Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана : в 2 кн. / гл. ред. В.А. Акуличев. — Владивосток : Дальнаука, 2013. — Кн. 1. — С. 260–293.

Зуенко Ю.И., Надточий В.В. Исследование влияния апвеллинга на состав и обилие мезопланктона в прибрежной зоне Японского моря // Океанол. — 2004. — Т. 44, № 4. — С. 561–569.

Зуенко Ю.И., Надточий В.В. Основные особенности сезонной и многолетней динамики сообщества зоопланктона Амурского залива (залив Петра Великого, Японское море) // Тр. ВНИРО. — 2018. — Т. 173. — С. 157–170.

Зуенко Ю.И., Рачков В.И. Климатические изменения температуры, солености и концентраций биогенных элементов в Амурском заливе Японского моря // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 183. — С. 186–199. DOI: 10.26428/1606-9919-2015-183-186-199.

Карнаухов А.А., Сергеев А.Ф. Структура и динамика вод залива Петра Великого летом // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. — М. : ГЕОС, 2008. — С. 57–73.

Кошелева А.В., Ярощук И.О., Храпченков Ф.Ф. и др. Апвеллинг на узком шельфе Японского моря в 2011 г. // Фундам. и прикл. гидрофизика. — 2021. — Т. 14, № 1. — С. 31–42. DOI: 10.7868/S2073667321010032.

Миничева Г.Г. Реакция многоклеточных водорослей на эвтрофирование экосистем // Альгология. — 1996. — Т. 6, № 3. — С. 250–257.

Миничева Г.Г. Структурно-функциональные особенности формирования сообществ морских бентосных водорослей // Альгология. — 1993. — Т. 3, № 1. — С. 3–12.

Павлюк О.Н., Преображенская Т.В., Тарасова Т.С. Межгодовые изменения в структуре сообществ мейобентоса бухты Алексеева Японского моря // Биол. моря. — 2001. — Т. 27, № 2. — С. 127–132.

Паренский В.А., Левченко Е.В. Исследование свойств рекуррентных многошаговых моделей межгодовой динамики сообществ диатомовых водорослей эпифитона // Изв. ТИН-РО. — 2018. — Т. 193. — С. 99–111. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-99-111.

Подорванова Н.Ф., Ивашинникова Т.С., Петренко В.С., Хомичук Л.С. Основные черты гидрохимии залива Петра Великого (Японское море) : моногр. — Владивосток : ДВО АН СССР, 1989. — 201 с.

Пономарев В.И., Файман П.А., Машкина И.В., Дубина В.А. Вихревая структура течений северо-западной части Японского моря // Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана : в 2 кн. / гл. ред. В.А. Акуличев. — Владивосток : Дальнаука, 2013. — Кн. 1. — С. 146–159.

Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б. и др. Особенности распределения гидрохимических параметров Уссурийского залива (Японское море) в летний период // Изв. ТИНРО. — 2012. — Т. 168. — С. 152–168.

Скопинцев Б.А., Бордовский О.К., Иваненков В.Н. Углерод растворенного органического вещества // Химия океана : в 2 томах / отв. ред. О.К. Бордовский и В.Н. Иваненков. — М. : Наука, 1979. — Т. 1. — С. 251–259.

Смирнова Л.Л., Рябушко В.И., Рябушко Л.И., Бабич И.И. Влияние концентрации биогенных элементов на сообщества микроводорослей прибрежного мелководья Черного моря // Альгология. — 1999. — Т. 9, № 3. — С. 32–42.

Тарасова Т.С., Романова А.В., Плетнев С.П., Аннин В.К. Современные комплексы бентосных фораминифер в бухте Житкова (о. Русский) залива Петра Великого Японского моря // Изв. ТИНРО. — 2016. — Т. 184. — С. 158–167. DOI: 10.26428/1606-9919-2016-184-158-167.

Тищенко П.П., Тищенко П.Я., Лобанов В.Б. и др. Роль даунвеллинга/апвеллинга в формировании/разрушении гипоксии придонных вод Амурского залива (Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2015. — Т. 183. — С. 156–165. DOI: 10.26428/1606-9919-2015-183-156-165.

Хайлов К.М. Экологический метаболизм в море : моногр. — Киев : Наук. думка, 1971. — 252 с.

Харламенко В.И. Деструкция органических соединений микроорганизмами прибрежных экосистем : автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток, 1985. — 23 с.

Храпченков Ф.Ф., Ярощук И.О., Кошелева А.В., Дубина В.А. Ветровой апвеллинг в заливе Петра Великого по спутниковым и морским наблюдениям // Исслед. Земли из космоса. — 2014. — № 3. — С. 33–40. DOI: 10.7868/S0205961414020067.

Шорников Е.И., Зенина М.А. Остракоды как индикаторы состояния и динамики водных экосистем (на примере залива Петра Великого Японского моря) : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2014. — 334 с.

Юрасов Г.И., Вилянская Е.А. Характеристики апвеллинга в заливе Петра Великого в осенне-зимний сезон 1999–2000 гг. // Метеорол. и гидрол. — 2010. — № 10. — С. 54–63.

Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря : моногр. — Владивосток : ДВО АН СССР, 1991. — 172 с.

Brito A.C., Moita T., Gameiro C. et al. Changes in the Phytoplankton Composition in a Temperate Estuarine System (1960 to 2010) // Estuaries and Coasts. — 2015. — Vol. 38. — P. 1678–1691. DOI: 10.1007/s12237-014-9900-8.

Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V. et al. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content // Pure and Applied Geophysics. — 2017. — Vol. 174, no. 7. — P. 2863–2878. DOI: 10.1007/s00024-017-1557-3.

Carlson C.A., Hansell D.A., Peltzer E.T., Smith W.O. Stocks and dynamics of dissolved and particulate organic matter in the southern Ross Sea, Antarctica // Deep Sea Res. II. — 2000. — Vol. 47, Iss. 15–16. — P. 3201–3225. DOI: 10.1016/S0967-0645(00)00065-5.

Cauwet G. Organic chemistry of sea water particulates. Concepts and developments // Marine Chemistry. — 1977. — Vol. 5, Iss. 4–6. — P. 551–552. DOI: 10.1016/0304-4203(77)90040-8.

Chen C.-T.A., Andreev A., Kim K.-R., Yamamoto M. Roles of continental shelves and marginal seas in the biogeochemical cycles of the North Pacific Ocean // J. Oceanogr. — 2004. — Vol. 60. — P. 17–44. DOI: 10.1023/B:JOCE.0000038316.56018.d4.

Colbert D. and McManus J. Nutrient biogeochemistry in an upwelling-influenced estuary of the Pacific northwest (Tillamook Bay, Oregon, USA) // Estuaries. — 2003. — Vol. 26, № 5. — P. 1205–1219. DOI: 10.1007/BF02803625.

De Viron O., Dickey J.O., Ghil M. Global modes of climate variability // Geophys. Res. Lett. — 2013. — Vol. 40, Iss. 9. — P. 1832–1837. DOI: 10.1002/grl.50386.

Doney S.C. The Growing Human Footprint on Coastal and Open-Ocean Biogeochemistry // Science. — 2010. — Vol. 328, Iss. 6985. — P. 1512–1516. DOI: 10.1126/science.1185198.

Ducklow H.W., Hansell D.A., Morgan J.A. Dissolved organic carbon and nitrogen in the Western Black Sea // Marine Chemistry. — 2007. — Vol. 105, Iss. 1–2. — P. 140–150. DOI: 10.1016/j. marchem.2007.01.015.

Hillebrand H., Worm B., Lotze H.K. Marine microbenthic community structure regulated by nitrogen loading and grazing pressure // Mar. Ecol. Prog. Ser. — 2000. — Vol. 204. — P. 27–38. DOI: 10.3354/meps204027.

Kida S., Qiu B., Yang J., and Lin X. The annual cycle of the Japan Sea throughflow // J. Phys. Oceanogr. — 2016. — Vol. 46, Iss. 1. — P. 23–39. DOI: 10.1175/JPO-D-15-0075.1.

Kim H., An S.-I. On the subarctic North Atlantic cooling due to global warming // Theor. Appl. Climatol. — 2013. — Vol. 114, № 1–2. — P. 9–19. DOI: 10.1007/s00704-012-0805-9.

Kumari R.K. and Mohan P.M. Review on dissolved organic carbon and particulate organic carbon in marine environment // Ilmu Kelautan. — 2018. — Vol. 23(1). — P. 25–36. DOI: 10.14710/ ik.ijms.23.1.25-36.

Lee M., Kim J.H., Kim Y. et al. Specific oceanographic characteristics and phytoplankton responses influencing the primary production around the Ulleung Basin area in spring // Acta Oceanol. Sin. — 2020. — Vol. 39, Iss. 2. — P. 107–122. DOI: 10.1007/s13131-020-1545-9.

Lee T., McPhaden M.J. Decadal phase change in large-scale sea level and winds in the Indo-Pacific region at the end of the 20th Century // Geophys. Res. Lett. — 2008. — Vol. 35, Iss. 1. Art. ID L01605. DOI: 10.1029/2007GL032419.

Mackas D. L. and Harrison P.J. Nitrogenous nutrient sources and sinks in the Juan de Fuca Strait/Strait of Georgia/Puget Sound estuarine system: Assessing the potential for eutrophication // Estuarine, Coastal and Shelf Science. — 1997. — Vol. 44, Iss. 1. — P. 1–21. DOI: 10.1006/ecss.1996.0110.

Middelburg J.J. The Return from Organic to Inorganic Carbon // Marine Carbon Biogeochemistry. A Primer for Earth System Scientists : Springer Briefs in Earth System Sciences. — Cham, Germany : Springer, 2019. — P. 37–56. DOI: 10.1007/978-3-030-10822-9_3.

Modern Foraminifera / ed. Gupta B.K.S. — Boston : Kluwer Academic Publishers, 2003. — 382 p.

Moheimani N.R., Webb J.P., Borowitzka M.A. Bioremediation and other potential applications of coccolithophorid algae: A review // Algal Res. — 2012. — Vol. 1, Iss 2. — P. 120–133. DOI: 10.1016/j.algal.2012.06.002.

Nakamura M. Greenland sea surface temperature change and accompanying changes in the Northern Hemispheric climate // Journ. of Climate. — 2013. — Vol. 26, Iss. 21. — P. 8576–8596. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00435.1.

NOWPAP CEARAC 2011 : Integrated report on eutrophication assessment in selected sea areas in the NOWPAP region: evaluation of the NOWPAP Common Procedure. — 2011. — 116 p. http://www.cearac-project.org/cearac-project/integrated-report/eut_2011.pdf

Ohshima K.I., Simizu D., Ebuchi N. et al. Volume, heat, and salt transports through the Soya Strait and their seasonal and interannual variations // J. Phys. Oceanogr. — 2017. — Vol. 47, Iss. 5. — P. 999–1019. DOI: 10.1175/JPO-D-16-0210.1.

Pollard J.H. A handbook of numerical and statistical techniques: with examples mainly from the life sciences. — N.Y. : Cambridge Univ. Press, 1979. — 368 p.

Prego R. Biogeochemical pathways of phosphate in a Galician Ria (north-western Iberian Peninsula) // Estuarine, Coastal and Shelf Science. — 1993. — Vol. 37, Iss. 5. — P. 437–451. DOI: 10.1006/ecss.1993.1066,

Raven J.A. Contributions of anoxygenic and oxygenic phototrophy and chemolithotrophy to carbon and oxygen fluxes in aquatic environments // Aquat. Microb. Ecol. — 2009. — Vol. 56. — P. 177–192. DOI: 10.3354/ame01315.

Schumacher B.A. Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments: ecological risk assessment support center. — U.S. Environmental Protection Agency, 2002. — 23 p.

Smith S.V. Marine macrophytes as a global carbon sink // Science. — 1981. — Vol. 211, Iss. 4484. — P. 838–840. DOI: 10.1126/science.211.4484.838.

Smith S.V., Buddemeier R.W., Wulff F. et al. C, N, P fluxes in the coastal zone // Crossland C.J., Kremer, H.H., Lindeboom, H.J. et al. (eds) Coastal fluxes in the Anthropocene : Global Change — The IGBP Series. — Berlin : Springer, 2005. — P. 95–143. DOI: 10.1007/3-540-27851-6 3.

Tarasova T.S. Long-term variations in the composition and distribution of recent benthic Foraminifera in the northen part of Amursky Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan) // Ecological studies and the state of the ecosystem of Amursky Bay and estuarine zone of the Razdolnaya river (Sea of Japan). — Vladivostok : Dalnauka, 2008. — Vol. 1. — P. 186–207.

Williams R.G., Follows M.J. Ocean Dynamics and the Carbon Cycle. Principles and Mechanisms. — Cambridge : University Press, 2011. — 404 p. DOI: 10.1017/CBO9780511977817.

Wunsch C. and Ferrari R. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans // Annu. Rev. Fluid Mech. — 2004. — Vol. 36. — P. 281–314. DOI: 10.1146/annurev. fluid.36.050802.122121.

References

Agatova, A.I., Organicheskoye veshchestvo v moryakh Rossii (Organic Matter in the Seas of Russia), Moscow: VNIRO, 2017.

Arzhanova, N.V., Hydrochemical parameters of marine basins as indicators of its biological productivity, *Tr. Vseross. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2017, vol. 169, pp. 104–116.

Belinskii, N.A. and Istoshin, Yu.V., Liman Current inferred from materials of expedition aboard the schooner Rossinante in 1936, *Tr. Tsentr. Inst. Prognozov*, Moscow: Gidrometeoizdat, 1950, vol. 17, pp. 132–143.

Bogorov, V.G., Biological transformation and exchange of energy and substances in the ocean, Oceanology, 1967, vol. 7, no. 5, pp. 839–859.

Brazhnikov, V.K., Materials on the topography and physical geography of the Nikolaev fishing industry region, in *Rybnaya promyshlennost'Dal'nego Vostoka* (Fishing industry of the Far East), St. Petersburg: tipografiya V. Kirshbauma, 1904.

Byshev, V.I., Anisimov, M.V., Gusev, A.V., Gruzinov, V.M., and Sidorova, A.N., On the multi-decadal oscillation of the heat content of the World Ocean, *Oceanological studies*, 2020, vol. 48, no. 3, pp. 76–95. doi 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(3).5

Byshev, V.I., Neiman, V.G., Romanov, Y.A., Serykh, I.V., and Sonechkin, D.M., Statistical and Climatological Significance of Global Atmospheric Oscillation, *Oceanology*, 2016, vol. 56, no. 2, pp. 165–171. doi 10.7868/S0030157416020039

Byshev, V.I. and Orlov, V.S., On the nature of the intra-thermocline lens at the subpolar front in the North Atlantic, *Oceanology*, 1993, vol. 33, no. 3, pp. 340–346.

Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. T. 8. Japonskoe more (Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas, vol. 8: Sea of Japan), Vasilyev, A.S., Terziev, F.S., Kosarev, A.N., Eds, St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003, no. 1,

Zhabin, I.A., Gramm-Osipova, O.L., and Yurasov, G.I., Wind upwelling off the northwest coast of the Sea of Japan, *Meteorology and Hydrology*, 1993, no. 10, pp. 82–86.

Zhabin, I.A., Dmitrieva, E.V., Andreev, A.G., and Kil'matov, T.R., Wind effects on the upwelling variability in the coastal zone of Primorye (the Northwest of the Sea of Japan), *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 3, pp. 181–188. doi 10.3103/S1068373917030050

Zhabin, I.A., Taranova, S.N., and Talley, L.D., High-salinity intermediate water in the northern part of the Japan Sea, *Russ.Meteorol. Hydrol.*, 2003, no. 4, pp. 45–52.

Zvalinskii, V.I., Tishchenko, P.P., Mikhailik, T.A., and Tishchenko, P.Ya., Eutrophication of Peter the Great Bay, in *Okeanologicheskie issledovaniya dal'nevostochnykh morei i severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana* (Oceanological Studies of the Far Eastern Seas and the Northwestern Pacific Ocean), 2 vols., Akulichev, V.A., ed., Vladivostok: Dal'nauka, 2013, vol. 1, pp. 260–293.

Zuenko, Yu.I. and Nadtochii, V.V., A study of the upwelling effect on the mesoplankton abundance and composition in the coastal zone of the Sea of Japan, *Oceanology*, 2004, vol. 44, no. 4, pp. 526–534.

Zuenko, Yu.I. and Nadtochii, V.V., General features of seasonal and interannual dynamics for the zooplankton community in the Amur Bay (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Tr. Vseross. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2018, vol. 173, pp. 157–168. doi 10.36038/2307-3497-2018-173-157-170

Zuenko, Yu.I. and Rachkov, V.I., Climatic changes of temperature, salinity and nutrients in the Amur Bay of the Japan Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2005, vol. 143, pp. 186–199. doi 10.26428/1606-9919-2015-183-186-199

Karnaukhov, A.A. and Sergeev, A.F., Structure and dynamics of waters in the Peter the Great Bay in summer, in *Sovremennoe sostoyanie i tendentsii izmeneniya prirodnoi sredy zaliva Petra Velikogo Yaponskogo morya* (Current State and Trends in the Natural Environment of Peter the Great Bay, Sea of Japan), Moscow: GEOS, 2008, pp. 57–73.

Kosheleva, A.V., Yaroshchuk, I.O., Khrapchenkov, F.F., Pivovarov, A.A., Samchenko, A.N., Shvyrev, A.N., and Korotchenko, R.A., Upwelling on the narrow shelf of the Sea of Japan in 2011, *Fundam. Prikl. Gidrofizika*, 2021, vol. 14, no. 1, pp. 31–42. doi 10.7868/S2073667321010032

Minicheva, G.G., Reaction of multicellular algae to eutrophycation of ecosystems, *Al'gologiya*, 1996, vol. 6, no. 3, pp. 250–257.

Minicheva, **G.G.**, Structural and functional features of the formation of marine benthic algae communities, *Al'gologiya*, 1993, vol. 3, no. 1, pp. 3–12.

Pavlyuk, O.N., Preobrazhenskaya, T.V., and Tarasova, T.S., Annual changes in meiobenthos community structure in Alekseev Bight, Sea of Japan, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2001, vol. 27, no. 2, pp. 105–110. doi 10.1023/A:1016699331438

Parensky, V.A. and Levchenko, E.V., A Study of the Properties of the Multi-Step Recurrent Models for the Interannual Dynamics of Epiphytic Diatom Communities, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2018, vol. 44, no. 7, pp. 580–591. doi 10.1134/S1063074018070064

Podorvanova, N.F., Ivashinnikova, T.S., Petrenko, V.S., and Khomichuk, L.S., *Osnovnye cherty gidrokhimii zaliva Petra Velikogo (Yaponskoye more)* (Main Features of Hydrochemistry of Peter the Great Bay (Sea of Japan)), Vladivostok: Dal'nevost. Otd. Akad. Nauk SSSR, 1989.

Ponomarev, V.I., Fayman, P.A., Mashkina, I.V., and Dubina, V.A., Vortex structure of current in the north-western Sea of Japan, in *Okeanologicheskie issledovaniya dal'nevostochnykh morei i severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana* (Oceanological Studies of the Far Eastern Seas and the Northwestern Pacific Ocean), 2 vols, Akulichev, V.A., ed., Vladivostok: Dal'nauka, 2013, vol. 1, pp. 146–159.

Semkin, P.Ju., Tishchenko, P.Ya., Lobanov, V.B., Sergeev, A.F., Tishchenko, P.P., Koltunov, A.M., Sagalaev, S.G., Chichkin, R.V., Shvetsova, M.G., and Pavlova, G.Yu., Features of chemical parameters distribution in the Ussuri Bay (Japan Sea) in summer season, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2012, vol. 168, pp. 152–168.

Skopincev, B.A., Bordovskij, O.K., and Ivanenkov, V.N., Carbon of dissolved organic matter, in *Khimiya okeana* (Ocean Chemistry), Bordovskij, O.K. and Ivanenkov, V.N., eds, Moscow: Nauka, 1979, vol. 1, pp. 251–259.

Smyrnova, L.L., Ryabushko, V.I., Ryabushko, L.I., and Babich, I.I., The influence of the content of nutrients on microalgae communities of coastal shallows of the Black Sea, *Al'gologiya*, 1999, vol. 9, no. 3, pp. 32–42.

Tarasova, T.S., Romanova, A.V., Pletnev, S.P., and Annin, V.K., Modern assemblages of benthic foraminifera in the Zhitkov Bay (Russky Island) of Peter the Great Bay, Japan Sea, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2016, vol. 184, pp. 158–167. doi 10.26428/1606-9919-2016-184-158-167

Tishchenko, P.P., Tishchenko, P.Ya., Lobanov, V.B., Sergeev, A.F., and Semkin, P.Yu., Role of downwelling/upwelling in formation/destruction of hypoxia in the bottom waters of the Amur Bay (Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2015, vol. 183, pp. 156–165. doi 10.26428/1606-9919-2015-183-156-165

Hailov, K.M., *Ekologicheskii metabolizm v more* (Ecological Metabolism in the Sea), Kiev: Naukova Dumka, 1971.

Harlamenko, V.I., Destruction of organic compounds by microorganisms of coastal ecosystems, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Vladivostok, 1985.

Khrapchenkov, F.F., Yaroshchuk, I.O., Kosheleva, A.V., and Dubina, V.A., Wind-Induced Upwelling in Peter the Great Bay as Inferred from Satellite and Instrumental Data, *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2014, no. 3, pp. 33–40. doi 10.7868/S0205961414020067

Schornikov, E.I. and Zenina, M.A., *Ostrakody kak indikatory sostoyaniya i dinamiki vodnykh ekosistem (na primere zaliva Petra Velikogo Yaponskogo morya)* (Ostracods as Indicators of Conditions and Dynamics of Water Ecosystems (on the Example of Peter the Great Bay, Sea of Japan)), Vladivostok: Dalnauka, 2014.

Yurasov, G.I. and Vilyanskaya, E.A., Upwelling characteristics in the Peter the Great Bay in fall-winter season of 1999–2000, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, no. 35, pp. 687–694. doi 10.3103/S1068373910100067

Yurasov, G.I. and Yarichin, V.G., *Techeniya Yaponskogo morya* (Currents of the Sea of Japan), Vladivostok: Dal'nevost. Otd., Akad. Nauk. SSSR, 1991.

Brito, A.C., Moita, T., Gameiro, C., Silva, T., Anselmo, T., and Brotas, V., Changes in the Phytoplankton Composition in a Temperate Estuarine System (1960 to 2010), *Estuaries and Coasts*, 2015, vol. 38, pp. 1678–1691. doi 10.1007/s12237-014-9900-8

Byshev, V.I., Neiman, V.G., Anisimov, M.V., Gusev, A.V., Serykh, I.V., Sidorova, A.N., Figurkin, A.L., and Anisimov, I.M., Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content, *Pure Appl. Geophys.*, 2017, vol. 174, no. 7, pp. 2863–2878. doi 10.1007/s00024-017-1557-3

Carlson, C.A., Hansell, D.A., Peltzer, E.T., and Smith, W.O., Stocks and dynamics of dissolved and particulate organic matter in the southern Ross Sea, Antarctica, *Deep Sea Res., Part II*, 2000, vol. 47, no. 15–16, pp. 3201–3225. doi 10.1016/S0967-0645(00)00065-5

Cauwet, G., Organic chemistry of sea water particulates. Concepts and developments, *Marine Chemistry*, 1977, vol. 5, no. 4–6, pp. 551–552. doi 10.1016/0304-4203(77)90040-8

Chen, C.-T.A., Andreev, A., Kim, K.-R., and Yamamoto, M., Roles of continental shelves and marginal seas in the biogeochemical cycles of the North Pacific Ocean, *J. Oceanogr.*, 2004, vol. 60. pp. 17–44. doi 10.1023/B:JOCE.0000038316.56018.d4

Colbert, D. and McManus, J., Nutrient biogeochemistry in an upwelling-influenced estuary of the Pacific Northwest, *Estuaries*, 2003, vol. 26, no. 5, pp. 1205–1219. doi 10.1007/BF02803625

De Viron, O., Dickey, J.O., and Ghil, M., Global modes of climate variability, *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, pp. 1832–1837. doi 10.1002/grl.50386

Doney, S.C., The Growing Human Footprint on Coastal and Open-Ocean Biogeochemistry, *Science*, 2010, vol. 328, no. 6985, pp. 1512–1516. doi 10.1126/science.1185198

Ducklow, H.W., Hansell, D.A., and Morgan, J.A., Dissolved organic carbon and nitrogen in the Western Black Sea, *Marine Chemistry*, 2007, vol. 105, no. 1–2, pp. 140–150. doi 10.1016/j. marchem.2007.01.015

Hillebrand, H., Worm, B., and Lotze, H.K., Marine microbenthic community structure regulated by nitrogen loading and grazing pressure, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 2000, vol. 204, pp. 27–38. doi 10.3354/meps204027

Kida, S., Qiu, B., Yang, J., and Lin, X., The annual cycle of the Japan Sea throughflow, J. *Phys. Oceanogr.*, 2016, vol. 46, no. 1, pp. 23–39. doi 10.1175/JPO-D-15-0075.1

Kim, H. and An, S.-I., On the subarctic North Atlantic cooling due to global warming, *Theor. Appl. Climatol.*, 2013, vol. 114, no. 1–2, pp. 9–19. doi 10.1007/s00704-012-0805-9

Kumari, R.K. and Mohan, P.M., Review on dissolved organic carbon and particulate organic carbon in marine environment, *Ilmu Kelautan*, 2018, vol. 23, no. 1, pp. 25–36. doi 10.14710/ik.ijms.23.1.25-36

Lee, M., Kim, J.H., Kim, Y., Park, C.H., Shin, K., and Baek, S.H., Specific oceanographic characteristics and phytoplankton responses influencing the primary production around the Ulleung Basin area in spring, *Acta Oceanol. Sin.*, 2020, vol. 39, no. 2, pp. 107–122. doi 10.1007/s13131-020-1545-9

Lee, T. and McPhaden, M.J., Decadal phase change in large-scale sea level and winds in the Indo-Pacific region at the end of the 20th Century, *Geophys. Res. Lett.*, 2008, vol. 35. Art. ID L01605. doi 10.1029/2007GL032419

Mackas, D.L. and Harrison, P.J., Nitrogenous nutrient sources and sinks in the Juan de Fuca Strait/Strait of Georgia/Puget Sound estuarine system: Assessing the potential for eutrophication, *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 1997, vol. 44, no. 1, pp. 1–21. doi 10.1006/ecss.1996.0110

Middelburg, J.J., The Return from Organic to Inorganic Carbon, in *Marine Carbon Biogeochemistry. A Primer for Earth System Scientists*: Springer Briefs in Earth System Sciences, Cham, Germany: Springer, 2019, pp. 37–56. doi: 10.1007/978-3-030-10822-9_3

Modern Foraminifera, Gupta, B.K.S., ed., Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.

Moheimani, N.R., Webb, J.P., and Borowitzka, M.A., Bioremediation and other potential applications of coccolithophorid algae: A review, *Algal Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 120–133. https://doi. org/10.1016/j.algal.2012.06.002

Nakamura, M., Greenland sea surface temperature change and accompanying changes in the North Hemispheric climate, J. Clim. 2013, vol. 26, pp. 8576–8596. doi 10.1175/JCLI-D-12-00435.1

NOWPAP CEARAC 2011: Integrated report on eutrophication assessment in selected sea areas in the NOWPAP region: evaluation of the NOWPAP Common Procedure, 2001. http://www.cearac-project.org/cearac-project/integrated-report/eut 2011.pdf

Ohshima, K.I., Simizu, D., Ebuchi, N., Morishima, S., and Kashiwase, H., Volume, heat, and salt transports through the Soya Strait and their seasonal and interannual variations, *J. Phys. Oceanogr.*, 2017, vol. 47, pp. 999–1019. doi 10.1175/JPO-D-16-0210.1

Pollard, J.H., A Handbook of Numerical and Statistical Techniques: with Examples Mainly from the Life Sciences, N.Y.: Cambridge Univ. Press, 1979.

Prego, R., Biogeochemical pathways of phosphate in a Galician Ria (north-western Iberian Peninsula), *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 1993, vol. 37, no. 5, pp. 437–451. doi 10.1006/ecss.1993.1066

Raven, J.A., Contributions of anoxygenic and oxygenic phototrophy and chemolithotrophy to carbon and oxygen fluxes in aquatic environments, *Aquat. Microb. Ecol.*, 2009, vol. 56, pp. 177–192. doi 10.3354/ame01315

Schumacher, B.A., *Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments: ecological risk assessment support center*, U.S. Environmental Protection Agency, 2002.

Smith, S.V., Marine macrophytes as a global carbon sink, *Science*, 1981, vol. 211, pp. 838–840. doi 10.1126/science.211.4484.838

Smith, S.V., Buddemeier, R.W., Wulff, F., Swaney, D.P., Camacho-Ibar, V.F., David, L.T., Dupra, V.C., Kleypas, J.A., San Diego-McGlone, M.L., McLaughlin, C., and Sandhei , P., C, N, P fluxes in the coastal zone, in *Coastal Fluxes in the Anthropocene*, Crossland, C.J., Kremer, H.H., Lindeboom, H.J., Marshall Crossland, J.I., Le Tissier, M.D.A., eds, Berlin: Springer, 2005, pp. 95–143. doi 10.1007/3-540-27851-6 3

Tarasova, T.S., Long-term variations in the composition and distribution of recent benthic Foraminifera in the northern part of Amursky Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan), *Ecological Studies and the State of the Ecosystem of Amursky Bay and Estuarine Zone of the Razdolnaya River (Sea of Japan)*, Vladivostok: Dal'nauka, 2008. vol. 1, pp. 186–207.

Williams, R.G. and Follows, M.J., Ocean Dynamics and the Carbon Cycle. Principles and Mechanisms, Cambridge: University Press, 2011. doi 10.1017/CBO9780511977817

Wunsch, C. and Ferrari, R., Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2004, vol. 36, pp. 281–314. doi 10.1146/annurev.fluid.36.050802.122121

User's manual: Total organic carbon analyzer TOC-LCPH/CPN, Shimadzu Corporation, 2011–2014. https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com.an/files/pim/pim_document_file/brochures/10330/415 c391e079g.pdf

Поступила в редакцию 11.04.2023 г.

После доработки 29.05.2023 г.

Принята к публикации 30.05.2023 г.

The article was submitted 11.04.2023; approved after reviewing 29.05.2023; accepted for publication 30.05.2023