

**УСЛОВИЯ ОБИТАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ
ENVIRONMENTS OF FISHERIES RESOURCES**

Научная статья

УДК [551.464.38+551.464.618+574.55](265.54)

DOI: 10.26428/1606-9919-2026-206-161-171

EDN: PKKTNA

**МЕЖГОДОВАЯ ДИНАМИКА ОБЩЕГО РАСТВОРЕННОГО ФОСФОРА
В ЗОНЕ ОБИТАНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ
(ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ)****Е.В. Левченко¹, Е.В. Журавель^{2*}**¹ Национальный научный центр морской биологии
им. А.В. Жирмунского ДВО РАН,

690041, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17;

² Дальневосточный федеральный университет,
690922, Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, 10

Аннотация. Проведен анализ межгодовой динамики общего растворенного фосфора в зоне обитания морских прибрежных растительных сообществ на акваториях зал. Петра Великого (Японское/Восточное море) летом 2017–2024 гг. Использованы гидрохимические и статистические методы. Установлено, что межгодовая динамика общего растворенного фосфора в исследованных акваториях Амурского залива имеет нелинейный характер: каждый четвертый летний период содержание общего растворенного фосфора увеличивалось в среднем в 3 раза по сравнению с минимальным уровнем 0,030 мг/л (1,0 мкМ), постоянным на протяжении трех предыдущих лет. Содержание общего растворенного фосфора в Уссурийском заливе и в прол. Старка на протяжении всего периода исследований имело близкие средние значения (приблизительно в 3 раза ниже, чем в Амурском заливе), и в прол. Старка находилось на одном уровне, а в Уссурийском заливе имело слабовыраженную тенденцию к уменьшению. Периодическое увеличение содержания общего растворенного фосфора в прибрежных акваториях Амурского залива может проявляться в росте первичной и вторичной продукции в прибрежных экосистемах залива.

Ключевые слова: содержание растворенного фосфора, межгодовая динамика, морские прибрежные воды, прибрежные экосистемы, залив Петра Великого

Для цитирования: Левченко Е.В., Журавель Е.В. Межгодовая динамика общего растворенного фосфора в зоне обитания прибрежных растительных сообществ (залив Петра Великого Японского моря) // Изв. ТИНРО. — 2026. — Т. 206, вып. 1. — С. 161–171. DOI: 10.26428/1606-9919-2026-206-161-171. EDN: PKKTNA.

* Левченко Елена Владимировна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, leovit@mail.ru, ORCID 0009-0000-5615-7021; Журавель Елена Владимировна, кандидат биологических наук, доцент, zhuravel.ev@dvfu.ru, ORCID 0009-0000-9395-330X.

© Левченко Е.В., Журавель Е.В., 2026

Interannual dynamics of total dissolved phosphorus in habitats of coastal plant communities (Peter the Great Bay, Japan Sea)

Elena V. Levchenko*, Elena V. Zhuravel**

* National Scientific Center of Marine Biology, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 17, Palchevsky Str., Vladivostok, 690041, Russia

** Far Eastern Federal University, 10, Ajax Bay, Vladivostok, 690922, Russia

* Ph.D., researcher, leovit@mail.ru, ORCID 0009-0000-5615-7021

** Ph.D., assistant professor, zhuravel.ev@dvfu.ru, ORCID 0009-0000-9395-330X

Abstract. Interannual dynamics of total dissolved phosphorus (DTP) in habitats of marine coastal plant communities of Peter the Great Bay (Japan Sea) in the summer seasons of 2017–2024 were analyzed using hydrochemical and statistical methods. The pattern of DTP variations in Amur Bay was found to be nonlinear: DTP increased, on average, 3-fold in each 4th summer season compared to the minimum level of 0.03 mg/L (1.0 μM) that had been observed unchanged for the previous three years. The DTP contents in Ussuri Bay and in the Stark Strait had similar average values (approximately 3-fold lower than in Amur Bay) throughout the study period. In the Stark Strait, the DTP content remained at the same level, while in Ussuri Bay, it showed a slight tendency to decrease. Periodic rises in DTP content in the coastal waters of Amur Bay can be manifested as increases in primary and secondary production in the coastal ecosystems of the bay.

Keywords: dissolved phosphorus content, interannual dynamics, coastal marine waters, coastal ecosystems, Peter the Great Bay

For citation: Levchenko E.V., Zhuravel E.V. Interannual dynamics of total dissolved phosphorus in habitats of coastal plant communities (Peter the Great Bay, Japan Sea), *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2026, vol. 206, no. 1, pp. 161–171. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2026-206-161-171. EDN: PKKTNA.

Введение

Фосфор является важным питательным веществом для всех форм жизни. Это «ключевой игрок» и в фундаментальных биохимических реакциях с участием АТФ и НАДФ, составляющих суть энергетического обмена, и в структурной поддержке организмов фосфолипидами мембран и биоминеральным гидроксипатитом костей. В морских прибрежных экосистемах изменение содержания растворенного фосфора в первую очередь влияет на функционирование сообществ первичных продуцентов — автотрофных организмов бентоса, перифитона и планктона. Влияние может проявляться как изменением эффективности работы фотосинтетического аппарата каждой отдельной автотрофной клетки, так и увеличением или уменьшением численности и биомассы в популяциях автотрофов [Богоров, 1967; Кабанова, 1967; Raymond, 1980; Смирнова и др., 1999].

Об обеспеченности первичных продуцентов питательными солями судят по гидрохимическим данным, которые используют также для оценки продуктивности морских акваторий и расчета первичной продукции [Сапожников, 2014; Аржанова, 2017]. Для мелководной части зал. Петра Великого комплексный гидрохимический анализ был проведен 50 лет назад (1975–1978 гг.). Исследования носили прикладной характер, в частности в интересах развития мариккультуры. По данным одноразовых съемок в прибрежных акваториях зал. Петра Великого от мыса Гамова до п-ова Песчаного в летний период в отсутствие речного паводка было отмечено невысокое содержание фосфатов и общего растворенного фосфора. Средняя концентрация общего растворенного фосфора составила 0,034 мг/л [Подорванова и др., 1989]. Позднее были представлены данные гидрохимических параметров Амурского залива во время высокого паводка р. Раздольной в середине летнего периода 2005 г. [Звалинский и др., 2008]. За исключением приустьевой зоны на всей акватории залива как на поверхностном (глубина 0,5–2,0 м), так и на придонном горизонте (1,0–1,5 м от дна) были определены низкие (близкие к аналитическому нулю) концентрации растворенных фосфатов.

Результаты приведенных выше кратковременных или одноразовых съемок не позволяют выявить межгодовые изменения содержания растворенных форм биогенных элементов в различных прибрежных акваториях зал. Петра Великого и выполнить моделирование зависимости динамики численности сообществ первичных продуцентов от динамики содержания биогенных элементов как одного из факторов среды. Поэтому была поставлена задача проведения многолетнего гидрохимического анализа в различных прибрежных акваториях зал. Петра Великого (вместе с исследованием динамики численности сообществ автотрофных организмов).

Цель настоящего исследования — описание межгодовой динамики содержания общего растворенного фосфора летом в зоне обитания морских прибрежных растительных сообществ в разных акваториях зал. Петра Великого (Японское/Восточное море).

Материалы и методы

Исследования выполняли в 10 прибрежных акваториях зал. Петра Великого. Уссурийский залив (УЗ): бухты Патрокл ($43^{\circ}04'23''$ с.ш. $131^{\circ}57'36''$ в.д.), Соболев ($43^{\circ}04'33''$ с.ш. $131^{\circ}57'46''$ в.д.), Тихая ($43^{\circ}05'12''$ с.ш. $131^{\circ}58'23''$ в.д.), Стеклянная ($43^{\circ}08'41''$ с.ш. $132^{\circ}03'24''$ в.д.) и безымянная бухта около свалки Горностаев ($43^{\circ}08'21''$ с.ш. $132^{\circ}03'01''$ в.д.). Амурский залив (АЗ): бухта около мыса Красного ($43^{\circ}11'59''$ с.ш. $131^{\circ}55'10''$ в.д.), бухта между мысами Грозный и Фирсова ($43^{\circ}10'50''$ с.ш. $131^{\circ}54'24''$ в.д.), бухта Кирпичного Завода ($43^{\circ}08'45''$ с.ш. $131^{\circ}54'03''$ в.д.) и мелководный зал. Угловой ($43^{\circ}17'17''$ с.ш. $132^{\circ}00'30''$ в.д.). Исследования также проводили в прол. Старка между Амурским и Уссурийским заливами со стороны о. Попова ($42^{\circ}58'03''$ с.ш. $131^{\circ}45'00''$ в.д.) (рис. 1).



Рис. 1. Карта района исследований: 1 — прол. Старка; 2 — бухта Патрокл; 3 — бухта Соболев; 4 — бухта Тихая; 5 — безымянная бухта около свалки Горностаев; 6 — бухта Стеклянная; 7 — бухта около мыса Красного; 8 — бухта между мысами Грозный и Фирсова; 9 — бухта Кирпичного Завода; 10 — зал. Угловой

Fig. 1. Map of study area: 1 — Stark Strait; 2 — Patrokl Cove; 3 — Sobol Cove; 4 — Tikhaya Cove; 5 — an unnamed cove near the Gornostay solid waste landfill; 6 — Steklyannaya Cove; 7 — a cove near Cape Krasny; 8 — a cove between Cape Grozny and Cape Firsov; 9 — Kirpichny Zavod Cove; 10 — Uglovoi Bay

Пробы морской воды в горизонте произрастания макрофитов (глубина 1,5–3,0 м) отбирали в июне-июле 2017–2024 гг. при температуре воды на указанных станциях 20 °С и отсутствии осадков не менее 5 дней. 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 всегда была в пределах 32–34 ‰. В Амурском заливе значения солености колебались в пределах 27–33 ‰. Соленость измеряли с помощью рефрактометра WZ–201 (RHS-10) (Kelilong Instruments, КНР). Диапазон измерения концентрации соли 0–100 ‰, с разрешением 1 ‰ и точностью ± 1 ‰. Температуру измеряли с помощью термометра TESTO 720 с погружным зондом F–SW (Testo SE & Co. KGaA., ФРГ). Диапазон измерения от –30 до +100 °С, с разрешением 0,1 °С и точностью $\pm 0,2$ °С.

Пробы воды (2 л) фильтровали с использованием вакуумного насоса через мембранные фильтры (0,45 мкм). Для определения общего растворенного фосфора ($OP_{\text{раст}}$) предварительно проводили минерализацию органических форм фосфора при нагревании проб воды с добавлением персульфата калия, а затем определяли концентрацию $OP_{\text{раст}}$ спектрофотометрическим методом Морфи-Райли по синему гетерополифосфорно-молибденовому комплексу [Murphy and Riley, 1962; Методы..., 1988; Руководство..., 2003] с использованием спектрофотометра УФ–1100 Ecoview производства Shanghai Marada Instruments Co. (КНР). Оптическая плотность при фотометрировании 882 нм. Для построения калибровочных графиков использовали государственный стандартный образец состава водных растворов фосфат-ионов ГСО 7018–93 (ЦСОВВ, Россия).

При статистической обработке данных использовали стандартные процедуры пакета прикладных программ Statistica 13.3 (ID ANS8121585721A134–7). Для сравнения средних значений содержания $OP_{\text{раст}}$ между исследованными прибрежными акваториями выполнили вычисления t -критерия Стьюдента для средних с неравными дисперсиями [Pollard, 1979], за ноль-гипотезу (H_0) было принято предположение об отсутствии различий. При описании межгодовой динамики содержания общего растворенного фосфора использовали метод регрессионного анализа. Метод регрессионного анализа подразумевает выбор модели, которая описывает в динамике полученные экспериментальные данные с наименьшей остаточной дисперсией и наименьшими ошибками оцениваемых коэффициентов (параметров) регрессии. За ноль-гипотезы были приняты предположения об отсутствии линейной и нелинейной связи между временным рядом и содержанием $OP_{\text{раст}}$. Стартовые значения коэффициентов подбирали с учетом разброса значений экспериментальных данных и предполагаемого характера зависимости. Оценку параметров моделей и проверку их значимости (ANOVA) выполнили с помощью модуля «Углубленные линейные/Нелинейные модели» (Advanced Linear/Nonlinear Models).

Результаты и их обсуждение

Средние уровни и межгодовая динамика содержания общего растворенного фосфора в горизонте произрастания макрофитов летом 2017–2024 гг. в Амурском и Уссурийском заливах и в прол. Старка имели существенные различия (табл. 1, 2, рис. 2).

Сравнение средних уровней содержания $OP_{\text{раст}}$. Средние значения содержания $OP_{\text{раст}}$ имели незначимые различия между УЗ и прол. Старка ($t_{\text{расч}} = 0,0203$, $t_{\text{табл}} = 3,6$ при $p = 0,001$) и достоверные различия между АЗ с одной стороны и прол. Старка и УЗ — с другой ($t_{\text{расч}} = 6,066$ и $t_{\text{расч}} = 5,475$, $t_{\text{табл}} = 3,6$ при $p = 0,001$). Нулевая гипотеза об отсутствии различий в первом случае принимается, а во втором отклоняется с минимальным риском ошибки. Таким образом, среднее содержание $OP_{\text{раст}}$ в исследованных акваториях УЗ и в прол. Старка находилось на одном уровне, а в АЗ достоверно отличалось: в АЗ было приблизительно в 3 раза выше, чем в УЗ, и в 3,6 раза выше, чем в прол. Старка.

Регрессионный и дисперсионный анализ межгодовой динамики содержания $OP_{\text{раст}}$. При аппроксимации линейной функцией коэффициенты детерминации (R^2) во

Таблица 1

Содержание общего растворенного фосфора в зоне обитания прибрежных растительных сообществ (зал. Петра Великого Японского моря) по акваториям, мг/л

Table 1

Total dissolved phosphorus contents in habitats of coastal plant communities (Peter the Great Bay, Japan Sea) in different water areas, mg/L

Год отбора проб	Акватория, № станции									
	Прол. Старка	Уссурийский залив					Амурский залив			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
2017	—	0,026	0,033	0,027	—	0,012	—	0,053	0,013	—
2018	0,020	0,019	0,014	0,012	0,023	0,016	0,031	0,036	0,026	0,045
2019	0,014	0,022	0,014	0,036	0,056	0,019	0,085	0,094	0,153	0,057
2020	0,014	0,015	0,018	0,021	0,023	0,015	0,043	0,019	0,041	0,048
2021	0,009	0,016	0,013	0,018	0,009	0,011	0,057	0,028	0,041	0,032
2022	0,012	0,011	0,021	0,036	0,015	0,014	0,010	0,042	0,034	—
2023	0,012	0,001	0,004	0,005	0,003	0,006	0,099	0,091	0,029	0,080
2024	0,018	0,014	0,020	0,016	0,014	0,011	0,016	0,034	0,070	0,026

Примечание. Номера станций, как на рис. 1.

Таблица 2

Описательные статистические характеристики анализа данных по содержанию общего растворенного фосфора, мг/л

Table 2

Descriptive statistical characteristics for the data on total dissolved phosphorus content, mg/L

Акватория	Кол-во наблюдений (2017–2024 гг.)	Среднее значение содержания ОР _{раст}	Минимальное значение содержания ОР _{раст}	Максимальное значение содержания ОР _{раст}	Стандартное отклонение	Стандартная ошибка
Амурский залив	29	0,051	0,010	0,153	0,032	0,006
Уссурийский залив	39	0,017	0,001	0,056	0,010	0,002
Прол. Старка	7	0,014	0,009	0,020	0,004	0,001

Рис. 2. Межгодовая динамика общего растворенного фосфора в исследованных прибрежных акваториях зал. Петра Великого в 2017–2024 гг.: 1, 2 — модели для Амурского залива (черные кружки); 3 — линейный тренд для Уссурийского залива (треугольники); 4 — постоянный уровень в прол. Старка (белые кружки)

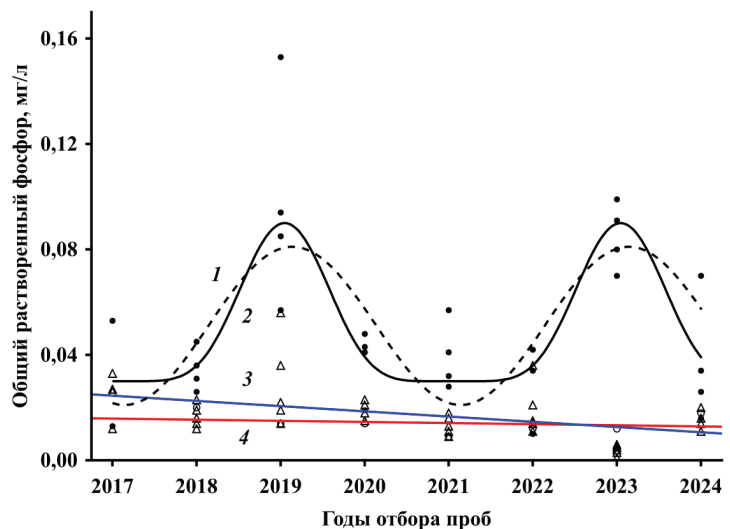


Fig. 2. Interannual dynamics of total dissolved phosphorus in the coastal waters of Peter the Great Bay in 2017–2024: 1, 2 — two models for Amur Bay (black circles); 3 — linear trend for Ussuri Bay (triangles); 4 — constant level for the Stark Strait (white circles)

всех случаях меньше 20 %: для АЗ — 0,0008 %, для прол. Старка — 6 %, для УЗ — 19 %. Коэффициенты уравнения незначимы для АЗ и прол. Старка (вероятность ошибки соответственно 0,9 и 0,6) и значимы для УЗ (вероятность ошибки 0,005). Следовательно, линейная функция незначима для АЗ и прол. Старка. Содержание $OP_{\text{раст}}$ в прол. Старка находится на среднем уровне 0,014 мг/л (рис. 2, модель 4). Для описания межгодовой динамики содержания $OP_{\text{раст}}$ в АЗ требуется нелинейная модель.

Мы определили, что изменения исследуемых данных по Амурскому заливу могут быть представлены в виде периодической функции (рис. 2, функция 1). В общем явном виде это функция косинуса со сдвигом в положительную область определяемой величины Y :

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

где Y — содержание $OP_{\text{раст}}$; X — годы отбора проб; a — амплитуда отклонения 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.

Модельное уравнение выглядит следующим образом:

$$Y = 0,030 \left(\cos \left(2\pi \left(\frac{X-2019,141}{4} \right) \right) + 1 \right) + 0,021. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации 44,2 % и вероятность ошибки расчетных параметров уравнения $p < 0,03$. Получен статистически значимый результат, но уровень значимости не самый высокий. Полученную периодическую функцию модифицировали, чтобы обеспечить большее приближение модельного тренда к исходным (оригинальным) данным (рис. 2, функция 2 и табл. 3):

$$Y = \frac{0,030(\cos(2\pi(\frac{X-2019,049}{3,997})+1))^3}{4} + 0,030. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации 62,7 % и вероятность ошибки расчетных параметров $p < 0,000$ (очень высокий уровень значимости). Коэффициенты модели характеризуются небольшими стандартными ошибками, не меняющими знаки коэффициентов на противоположные. Рассчитанное значение F -критерия (табл. 3) больше критического ($F = 23,508$, $F_{3,25} = 2,99$ при $p = 0,05$), что указывает на значимость параметров модели. Нулевая гипотеза об отсутствии нелинейной связи отклоняется.

Таблица 3

Оценка и проверка значимости коэффициентов модели (2) о содержании $OP_{\text{раст}}$ в Амурском заливе

Table 3

Statistical significance for coefficients of model (2) and testing the model on the data on total dissolved phosphorus in Amur Bay

Коэффициент	Расчетное значение	Стандартная ошибка	Вероятность ошибки p-value	95 %-ные доверительные границы	
				Нижняя	Верхняя
a	0,030	0,005	0,000	0,030	0,005
b	2019,049	0,203	0,000	2019,049	0,203
c	3,997	0,273	0,000	3,997	0,273
d	0,030	0,006	0,000	0,030	0,006
<i>Результаты дисперсионного анализа модели</i>					
Источник вариации	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат отклонений	Критериальная статистика F	Сила влияния R^2
Общая	0,028058	28	—	—	1,000
Модель	0,017587	3	1,031009	23,508	0,627
Остаток	0,010471	25	0,000004	—	0,373

Таким образом, представленная модифицированная периодическая функция наиболее правдоподобно и достоверно описывает межгодовую динамику содержания $OP_{\text{раст}}$ в АЗ летом в 2017–2024 гг. с очень высоким уровнем значимости параметров уравнения и хорошим коэффициентом детерминации. Период функции — 4 года, т.е. изменения в содержании общего растворенного фосфора, увеличение в среднем в 3 раза, в исследованных акваториях Амурского залива в указанный временной промежуток происходили раз в четыре года по сравнению с минимальным уровнем 0,030 мг/л (1,0 мкМ), который оставался постоянным в течение последующих трех лет.

Межгодовая динамика содержания $OP_{\text{раст}}$ в УЗ может быть описана линейной функцией

$$Y = 4,0234 - 0,002 \cdot X \quad (3)$$

(рис. 2, модель 3), коэффициенты которой значимы на высоком уровне ($p < 0,005$), имеющей небольшой угол наклона и коэффициент детерминации 19 %. Это слабо выраженный убывающий временной тренд. Нулевая гипотеза об отсутствии линейной связи отклоняется.

Среднее значение содержания $OP_{\text{раст}}$ по всем исследованным прибрежным акваториям АЗ, УЗ и прол. Старка составляет 0,027 мг/л (см. табл. 2). Исследования, выполненные ранее, в 1978 г. [Подорванова и др., 1989], показали сходные летние среднемесячные концентрации $OP_{\text{раст}}$: 0,034 мг/л в прибрежных акваториях западной части зал. Петра Великого от мыса Гамова до п-ова Песчаного. Это сходство данных через 45 лет важно для понимания стабильности существования среднего уровня $OP_{\text{раст}}$ около 0,030 мг/л (1,0 мкМ) в прибрежных акваториях зал. Петра Великого в летний период.

Средний уровень $OP_{\text{раст}}$ в океане составляет 0,074 мг/л (2,4 мкМ) [Иваненков, 1979] при достаточно широком диапазоне величин содержания в разных акваториях. Например, в водах Южного океана южнее антарктической конвергенции на поверхности содержание может быть в пределах 0,047–0,068 мг/л (1,5–2,1 мкМ) и меньше 0,016 мг/л (0,5 мкМ) немного севернее субтропической конвергенции [Семина и др., 1982; Артамонова и др., 2021]. В открытой части Мексиканского залива в поверхностных водах содержание общего растворенного фосфора очень низкое — меньше 0,005 мг/л (0,16 мкМ) [Зернова, 1982]. Очень высокий уровень содержания растворенного фосфора — 17–89 мг/л (548–2871 мкМ) — может быть в поверхностных водах 200-мильной зоны, прилегающей к берегам Перу и Эквадора и 100-мильной зоны вдоль побережья Чили (приблизительно между 5–20° ю.ш. и 79–85° з.д.) [Ведерников, Стародубцев, 1971; Kämpf, Chapman, 2016]. Следует отметить, что существуют оценки оптимальных концентраций биогенных элементов для природных популяций фитопланктона, основанные на данных из высокопродуктивных районов апвеллинга. Концентрация фосфора около 0,09 мг/л (2,9 мкМ) при соответствующей концентрации азота 0,42–0,56 мг/л (30–40 мкМ), по-видимому, является для естественных природных популяций оптимальной, а первичная продукция близка к природному максимуму [Ведерников, Стародубцев, 1971; Calvert, Price, 1971; Максимова, 1977]. Средний уровень содержания $OP_{\text{раст}}$ в прибрежных акваториях Амурского залива, Уссурийского залива и прол. Старка летом в 2017–2024 гг. (табл. 2) ниже среднего уровня в океане и оптимального уровня $OP_{\text{раст}}$. Поэтому все исследованные прибрежные акватории зал. Петра Великого являлись в разной степени фосфордефицитными экосистемами. Исключение — каждый четвертый летний период в Амурском заливе, когда содержание $OP_{\text{раст}}$ увеличивалось в среднем до 0,09 мг/л (2,9 мкМ).

Таким образом, межгодовая динамика изменения содержания общего растворенного фосфора, исследованная летом 2017–2024 гг. в зоне обитания морских прибрежных растительных сообществ вдоль восточного побережья Амурского залива, наиболее достоверно может быть описана в виде модифицированной периодической функции с периодом 4 года. Содержание $OP_{\text{раст}}$ увеличивалось в среднем в 3 раза по сравнению с минимальным уровнем 0,030 мг/л (1,0 мкМ), который оставался посто-

янным в течение предыдущих трех лет. Межгодовая динамика содержания общего растворенного фосфора в этот же период наблюдений в прибрежных акваториях вдоль западного побережья Уссурийского залива может быть описана как линейный слабовыраженный убывающий временной тренд при среднем уровне 0,017 мг/л (0,55 мкМ), а в прол. Старка со стороны о. Попова содержание $OP_{\text{раст}}$ оставалось постоянным на среднем уровне 0,014 мг/л (0,45 мкМ). Среднее значение содержания $OP_{\text{раст}}$ по всем исследованным прибрежным акваториям в АЗ, УЗ и в прол. Старка (приблизительно 0,030 мг/л) близко с полученным ранее средним значением 0,034 мг/л для прибрежных акваторий западной части зал. Петра Великого от мыса Гамова до п-ова Песчаного [Подорванова и др., 1989]. Одновременно с этим средние уровни $OP_{\text{раст}}$ в прибрежных акваториях зал. Петра Великого, которые были исследованы нами и нашими коллегами ранее, ниже среднего уровня $OP_{\text{раст}}$ в океане и ниже концентрации, которая может считаться оптимальной для естественных природных условий. Это свидетельствует о возможной лимитирующей роли фосфора как биогенного элемента в производстве первичной продукции на прибрежных акваториях зал. Петра Великого в целом.

Заключение

Межгодовая динамика содержания общего растворенного фосфора, исследованная в летний период 2017–2024 гг. в зоне обитания морских прибрежных растительных сообществ в акваториях зал. Петра Великого Японского моря, имела существенные различия. Для акваторий вдоль восточного побережья Амурского залива выявлены два выраженных всплеска концентрации с интервалом в 4 года, и изменения наиболее достоверно могут быть описаны в виде модифицированной периодической функции. Содержание $OP_{\text{раст}}$ в Уссурийском заливе имело слабовыраженную тенденцию к уменьшению, а в прол. Старка находилось на одном уровне.

Ценность проведенного исследования заключается в понимании доступности фосфора как важнейшего биогенного элемента для первичных продуцентов на прибрежных акваториях зал. Петра Великого. Обнаруженный низкий средний уровень $OP_{\text{раст}}$ позволяет предположить, что экосистемы исследованных прибрежных акваторий в летний период испытывают недостаток в содержании данного биогенного элемента, а выявленные периодические увеличения содержания $OP_{\text{раст}}$ могут влиять на рост продукции в прибрежных экосистемах Амурского залива. Полученные результаты будут использованы в дальнейшем при моделировании зависимостей изменения численности и биомассы в сообществах первичных продуцентов от динамики содержания общего растворенного фосфора.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают благодарность и признательность консультанту, соавтору идеи исследования, заслуженному деятелю науки Российской Федерации доктору биологических наук [Н.К. Христофоровой].

The authors are deeply grateful to [N.K. Khristoforova](FEFU) for the fruitful idea for this study and advice.

Финансирование работы (FUNDING)

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования.
The study had 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; Е.В. Журавель — обработка проб, получение результатов, обсуждение.

E. V. Levchenko — the study concept and conducting, the chemical samples collection and processing, the study results analyzing, the text writing and illustrating; E. V. Zhuravel — the samples processing, the study results discussing.

Список литературы

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

Артамонова К.В., Гангнус И.А., Духова Л.А. и др. Пространственная гидрохимическая структура поверхностного слоя атлантического и индоокеанского секторов Южного океана // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2021. — Т. 67, № 4. — С. 328–347. DOI:10.30758/0555-2648-2021-67-4-328-347. EDN: TJMJQQ.

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

Ведерников В.И., Стародубцев Е.Г. Первичная продукция и хлорофилл в юго-восточной части Тихого океана // Тр. ИО АН СССР. — 1971. — Т. 89. — С. 33–42.

Звалинский В.И., Тищенко П.П., Тищенко П.Я. и др. Результаты съемки гидрохимических и продукционных параметров на акватории Амурского залива в период паводка реки Раздольной в августе 2005 года // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. — М. : ГЕОС, 2008. — С. 199–229. EDN: UXKTQV.

Зернова В.В. Зависимость количественного распределения фитопланктона Мексиканского залива от абиотических факторов // Тр. ИО АН СССР. — 1982. — Т. 114. — С. 60–72.

Иваненков В.Н. Общие сведения об азоте, фосфоре и кремнии // Химия океана : в 2 томах / отв. ред. О.К. Бордовский и В.Н. Иваненков. — М. : Наука, 1979. — Т. 1. — С. 176–184.

Кабанова Ю.Г. Изучение минерального питания морского фитопланктона // Океанология. — 1967. — Т. 7, № 3. — С. 495–504.

Максимова М.П. Критерии оценки степени обеспеченности фитопланктона питательными солями // Тр. ВНИРО. — 1977. — Т. 119. — С. 6–15.

Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов / сост. В.В. Сапожников, А.И. Агатова, Н.В. Аржанова и др. — М. : ВНИРО, 1988. — 119 с.

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.

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

Сапожников В.В. Гидрохимические методы оценки биопродуктивности промысловых районов Мирового океана // Тр. ВНИРО. — 2014. — Т. 152. — С. 3–14. EDN: TGTNTD.

Семина Г.И., Голикова Г.С., Нагаева Г.А. Фитопланктон южной части Атлантического океана в ноябре-декабре 1971 г. // Тр. ИО АН СССР. — 1982. — Т. 114. — С. 5–19.

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. EDN: OYVMWP.

Calvert S.E., Price N.B. Upwelling and nutrient regeneration in the Benguela Current, October, 1968 // Deep-Sea Res. — 1971. — Vol. 18, № 5. — P. 505–523. DOI: 10.1016/0011-7471(71)90074-X.

Kämpf J., Chapman P. Upwelling Systems of the World : A scientific journey to the most productive marine ecosystems. — Switzerland: Springer International Publishing, 2016. — 433 p. DOI: 10.1007/978-3-319-42524-5.

Murphy J. and Riley J.P. A modified single solution for the determination of phosphate in natural waters // *Analytica Chimica Acta*. — 1962. — Vol. 27. — P. 31–36. DOI: 10.1016/S0003-2670(00)88444-5.

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.

Raymont J.E.G. Plankton and productivity in the oceans. Vol. 1: Phytoplankton. — Oxford : Pergamon Press, 1980. — 489 p.

References

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. EDN: NSGOET

Artamonova, K.V., Gangnus, I.A., Dukhova, L.A., Maslennikov, V.V., and Lavinen, N.A., Spatial hydrochemical structure in surface waters of the Southern ocean between Africa and Antarctica, *Arctic and Antarctic Research*, 2021, vol. 67, no. 4, pp. 328–347. Doi 10.30758/0555-2648-2021-67-4-328-347. EDN: TJMJQQ

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

Vedernikov, V.I. and Starodubtsev, E.G., Primary production and chlorophyll in the south-eastern Pacific, *Trudy Inst. Okeanol. Akad. Nauk SSSR*, 1971, vol. 89, pp. 33–42.

Zvalinsky, V.I., Tishchenko, P.P., Tishchenko, P.Ya., Lobanov, V.B., Sagalaev, S.G., Shvetsova, M.G., Volkova, T.I., Sergeev, A.F., and Propp, L.N., Results of hydrochemical and production parameters survey in the Amur Bay water area during the Razdolnaya river flood in August 2005, 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. 199–229. EDN: UXKTQV

Zernova, V.V., On the dependence of the development of phytoplankton in the Gulf of Mexico of the abiotic factors, *Trudy Inst. Okeanol. Akad. Nauk SSSR*, 1982, vol. 114, pp. 60–72.

Ivanenkov, V.N., General information on nitrogen, phosphorus, and silicon, in *Khimiya okeana* (Ocean Chemistry), Bordovskij, O.K. and Ivanenkov, V.N., eds, Moscow: Nauka, 1979, vol. 1, pp. 176–184.

Kabanova, Yu.G., Studies of mineral nutrition of marine phytoplankton, *Oceanology*, 1967, vol. 7, no. 3, pp. 495–504.

Maximova, M.P., Criteria of estimates availability of nutrients for phytoplankton, *Trudy Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1977, vol. 119, pp. 6–15.

Sapozhnikov, V.V., Agatova, A.I., Arzhanova, N.V., Naletova, I.A., Mordasova, N.V., Vladimirsky, S.S., Zubarevich, V.L., Torgunova, N.I., and Bondarenko, A.I., *Metody gidrokhimicheskikh issledovaniy osnovnykh biogennykh elementov* (Methods of hydrochemical studies of main nutrients), Moscow: VNIRO, 1988.

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.

Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybokhozyaystvennykh vodoyemov i perspektivnykh dlya promysla rayonov Mirovogo okeana (Guidelines for chemical analysis of marine and freshwater in the environmental monitoring of fishing reservoirs and promising areas for fishing of the oceans), Sapozhnikov, V.V., ed., Moscow: VNIRO, 2003.

Sapozhnikov, V.V., Hydrochemical Methods of the Bioproductivity Assessment in Fishing Grounds of the World Ocean, *Trudy Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2014, vol. 152, pp. 3–14. EDN: TGTNTD

Semina, H.J., Golikova, H.S., and Nagaeva, H.A., Phytoplankton of the southern Atlantic in November-December of 1971, *Trudy Inst. Okeanol. Akad. Nauk SSSR*, 1982, vol. 114, pp. 5–19.

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. EDN: OYVMWP

Calvert, S.E. and Price, N.B., Upwelling and nutrient regeneration in the Benguela Current in October, 1968, *Deep-Sea Res.*, 1971, vol. 18, no. 5, pp. 505–523. doi 10.1016/0011-7471(71)90074-X

Kämpf, J. and Chapman, P., *Upwelling Systems of the World: A scientific journey to the most productive marine ecosystems*, Switzerland: Springer International Publishing, 2016, doi 10.1007/978-3-319-42524-5

Murphy, J. and Riley, J.P., A modified single solution for the determination of phosphorus in natural waters, *Analytica Chimica Acta*, 1962, vol. 27, pp. 31–36. doi 10.1016/S0003-2670(00)88444-5

Pollard, J.H., *A handbook of numerical and statistical techniques: with examples mainly from the life sciences*, New York: Cambridge Univ. Press, 1977.

Raymont, J.E.G., *Plankton and productivity in the Oceans*, vol. 1: Phytoplankton, Oxford: Pergamon press, 1980.

Поступила в редакцию 2.10.2025 г.

После доработки 4.03.2026 г.

Принята к публикации 6.03.2026 г.

*The article was submitted 2.10.2025; approved after reviewing 4.03.2026;
accepted for publication 6.03.2026*