

УДК 551.464.32

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОТОКИ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ЗАЛИВАХ ШАНТАРСКОГО АРХИПЕЛАГА

© 2025 г. П. Я. Тищенко*, П. П. Тищенко, А. А. Рюмина, М. Г. Швецова

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

*e-mail: tpavel@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 17.09.2024 г.

После доработки 28.10.2024 г.

Принята к публикации 26.01.2025 г.

Представлены результаты измерений биогенных веществ (БВ – силикатов, неорганических и органических форм азота и фосфора) на акватории заливов Шантарского архипелага (ША) в июле 2016 и в сентябре 2022 гг. Установлено, что в результате фотосинтеза происходит преимущественное изъятие неорганических форм азота и фосфора из поверхностных вод заливов ША. Речной сток приводит к обогащению вод ША кремнием и растворенным органическим углеродом. Показана важная роль идущего на нерест лосося в обогащении общим фосфором и азотом вершины залива Академии, а также в изъятии БВ из вод заливов ША сеголетками лосося, мигрирующими в осенний сезон в открытую часть Охотского моря. Применение двухслойной модели LOICZ к акватории ША показало, что основным источником разных форм азота и фосфора являются придонные воды открытой части Охотского моря (80–90% от общего потока БВ в заливы). В основе модели лежат представления об эстуарной циркуляции вод, которая поддерживает устойчивое многолетнее содержание БВ в географически изолированной от Охотского моря акватории заливов ША. Сделано предположение, что важным источником БВ и продукции органического вещества могут быть солевые марши вдоль береговой линии ША. Основным стоком БВ из заливов является направленный поток верхнего слоя вод из заливов в открытое море.

Ключевые слова: биогенные вещества, потоки, Шантарский архипелаг, Охотское море, лосось, модель LOICZ

DOI: 10.31857/S0030157425030053, **EDN:** GWARHO

ВВЕДЕНИЕ

Охотское море является одним из наиболее продуктивных водоемов Мирового океана [25]. Важным условием высокой продукции является поставка биогенных веществ (БВ) из глубинных слоев моря в эвфотический слой. В работе [21] по географическому признаку были выделены пять гидродинамических систем, которые обеспечивают высокую продуктивность разных акваторий Охотского моря: Восточно-склоновая шельфовая система; Центрально-северо-восточная система; Северо-западная система; Восточно-сахалинская система; Юго-западная система. Каждую из систем авторы охарактеризовали с точки зрения причин и механизмов, обеспечивающих вертикальный транспорт БВ. Количественное распределение плотности зоопланктона в Охотском море [2] в общих чертах согласуется с установленными ранее высокопродуктивными ак-

ваториями [21], за исключением одного района. Дополнительным высокопродуктивным районом, который выделяется по распределению плотности мелкого зоопланктона (копеподы), является акватория заливов Шантарского архипелага (ША) [2]. Этот район Охотского моря в период августа–сентября является местом нагула гренландских китов – *Balaena mysticetus* Linnaeus, 1758 (ГК), особенное предпочтение относится к заливу Академии [12, 22, 23, 34].

Акватория ША является эстуарным бассейном, в нее впадает много рек, наиболее крупные из них – Уда, Тугур, Усалгин, Сыран, Ульбан – со среднегодовым расходом 823, 175, 37.4, 10.6, 9.6 м³/с соответственно [14]. Во всех реках нерестится лосось. Кета и горбуша являются основными видами лососевых рыб, которые заходят на нерест, как правило, с первой декады июля по первую декаду августа [7–9]. Мигрирующий

на нерест лосось создает направленный поток органического вещества и биогенных веществ в прибрежные экосистемы [32]. Эти огромные запасы органического вещества используются разными животными в пищу, например, белухами, косатками и тюленями, что подтверждается прямыми наблюдениями [24, 36, 37].

Проблема, которая рассматривается в статье, состоит в том, каким образом обеспечивается достаточно изолированная от открытой части Охотского моря акватория заливов ША биогенными веществами. Эта акватория плохо изучена из-за сурового климата и высоких приливов. До 2016 г. полностью отсутствовали сведения о концентрациях БВ в акватории ША. В 2016, 2020, 2022 гг. лаборатория гидрохимии ТОИ ДВО РАН провела океанографические исследования, которые включали измерения их концентраций [18, 19, 39]. Сравнительный анализ распределения концентраций растворенного кремния (DSi – Dissolved Silica), неорганического азота (DIN – Dissolved Inorganic Nitrogen), органического азота (DON – Dissolved Organic Nitrogen), неорганического фосфора (DIP – Dissolved Inorganic Phosphorus), растворенного органического фосфора (DOP – Dissolved Organic Phosphorus) в июле 2016 и сентябре 2022 г. является одной из задач данной работы. Другой задачей является оценка основных потоков поступления биогенных веществ и их “стоков” в достаточно изолированной акватории заливов ША. В работе будут оценены речные потоки, потоки, обусловленные направленной миграцией лосося и потоки, обусловленные водообменом между заливами ША и морем, а также между слоями воды внутри заливов, используя двухслойную модель LOICZ (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone [30, 38]).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Акватория заливов ША расположена в северо-западной части Охотского моря и включает в себя четыре крупных залива, простирающихся с юго-запада на северо-восток: залив Николая, Академии, Тугурский и Удская губа (рис. 1). В соответствии с лоцией залив Николая считается частью залива Академии [11], однако для облегчения оценки потоков он будет рассматриваться нами отдельно. Залив Николая впадает в восточный берег залива Академии на 65 км в южном направлении между мысами Ламсдорфа (54°04' с. ш., 138°40' в. д.) и Тукургу (53°59.7' с. ш., 138°34.9' в. д.), расстояние между которыми со-

ставляет 9 км и отмечено пунктирной линией (см. рис. 1). Глубины на входе в залив составляют 13–14 м [11] при средней исследуемой глубине около 14 м и общей площади залива 671 км². В вершину залива впадает р. Усалгин.

Залив Академии глубоко вдаётся в материк между мысом Врангеля (54°17' с. ш., 138°40' в. д.) на востоке и мысом Сенека (54°19' с. ш., 137°44' в. д.), расстояние между которыми около 61 км (отмечено пунктирной линией на рис. 1). Глубины на входе в залив Академии не превышают 52 м, в средней части залива глубины составляют около 30 м, а по мере приближения к берегам они постепенно уменьшаются при средней глубине исследования около 23 м и общей площади 4861 км² (без учета площади залива Николая). В вершину залива впадают несколько рек, наиболее крупные из них – Сыран, Ульбан, Иткан.

Залив Тугурский вдаётся в берег материка с западной стороны полуострова Тугурский; его входными мысами являются на юго-востоке мыс Берсеньева (54°18' с. ш., 137°23' в. д.), а на северо-западе – мыс Большой Дуганджа (54°39' с. ш., 136°50' в. д.) [11], расстояние между которыми около 53 км (показано пунктирной линией на рис. 1). Глубины посередине входа в залив Тугурский – 20–22 м. К югу от входа глубины постепенно уменьшаются при средней глубине исследования около 17 м и общей площади 2420 км². В вершину залива впадают реки Тугур и Кутын.

Удская губа расположена к западу от Шантарских островов и вдаётся в материк в юго-западном направлении. Входными мысами являются мыс Большой Дуганджа и отстоящий на 85 км к северо-северо-западу от него мыс Маджалинда (55°17' с. ш., 136°08' в. д.) [11]. Внешняя граница губы показана пунктирной линией на рис. 1. Наибольшие глубины на входе в губу – 36 м, которые постепенно уменьшаются при средней глубине исследования около 22 м и общей площади губы – 4573 км². В вершину Удской губы впадает много рек, крупнейшие из которых – Уда, Тором, Ал, Тыл и на западном побережье – Киран.

Экспедиционные работы в акватории заливов ША выполняли на НИС “Профессор Гагаринский” в июле 2016 г. [19] и в сентябре 2022 г. [16, 39]. Работы проводили на моторной лодке в 2016 г. в вершине залива Академии и эстуариях рек Сыран (14 июля) и Ульбан (26 июля) [14, 15], а в 2022 г. – в эстуариях рек Сыран (14 сентября), Ульбан (15 сентября) и Тугур (17 сентября) [39]. Зондирование воды в обеих экспедициях осуществляли зондом SBE 19plus V2, оснащённым

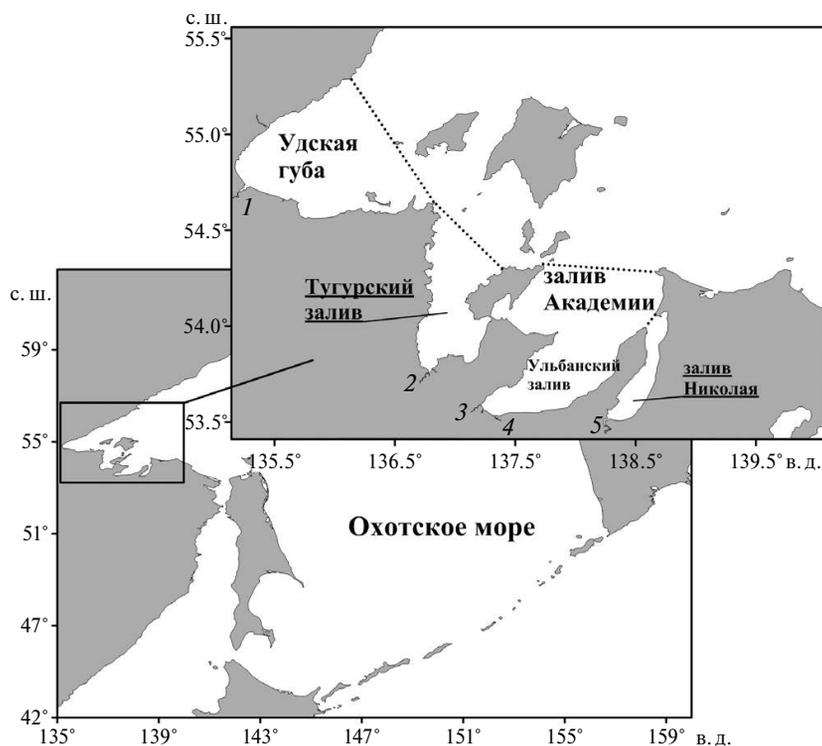


Рис. 1. Географическое положение изучаемого объекта. На вставке показана акватория заливов Шантарского архипелага: 1 – р. Уда, 2 – р. Тугур, 3 – р. Сыран, 4 – р. Ульбан, 5 – р. Усалгин. Пунктирными линиями показаны внешние границы заливов.

датчиками температуры, давления, электропроводности (солености), растворенного кислорода (DO), флуоресценции хлорофилла-а, мутности, фотосинтетически активной радиации (ФАР) в комплекте с пробоотборной системой SBE-55 из 6 батометров, объемом 4 л каждый. Пробы воды отбирали с верхнего горизонта (1.5–2 м от поверхности) и придонного горизонта (1.5–2 м над дном). Анализ неорганических форм БВ (нитраты, нитриты, аммонийный азот, анионы ортофосфорной кислоты, кремний) выполняли фотометрическим методом с помощью стандартной процедуры [18, 31]. Определение общего фосфора и азота выполняли персульфатным сжиганием с ультрафиолетовым облучением на автоматическом анализаторе SKALAR SAN++, методические принципы и особенности изложены в работе [31]. Концентрации DON и DOP получали как разности между общими формами биогенных веществ (P_{tot} , N_{tot}) и неорганическими (DIP, DIN).

Мы рассматриваем три источника биогенных веществ, поступающих в акваторию заливов ША: 1) реки, впадающие в залив; 2) лосось; 3) обмен вод заливов с морем. Причем лосось и обмен вод заливов с морем могут быть как источниками, так и стоком биогенных веществ.

Суточный поток биогенного вещества i , F_i^j , поставляемого рекой j в залив, рассчитывался по уравнению

$$F_i^j = C_i^j Q_j, \quad (1)$$

где C_i^j и Q_j – концентрация биогенного вещества i (ммоль/м³) и суточный расход воды (м³/сут) в реке j соответственно. Данные о среднегодовом расходе воды основных рек, впадающих в заливы ША, были взяты из работы [14]. Суточный расход воды мелких рек, Q_x , для которых отсутствуют данные, рассчитывался из соотношения

$$Q_x = Q_j \cdot A_x / A_j. \quad (2)$$

Здесь A_j , A_x – площади водосбора реки j с известным расходом воды и реки x с неизвестным соответственно. Расходы рек, которые использовались для расчета потока биогенных веществ реками, впадающими в заливы ША, представлены в табл. 1.

Все реки акватории заливов ША являются нерестовыми в отношении горбуши и кеты [6, 8]. Из площади нерестилищ кеты и горбуши (см. табл. 1), которые были взяты из работы [6], рассчитывали численность лосося, N_{Sal} , идущего на нерест в реки, впадающие в исследуемые заливы [6]:

Таблица 1. Характеристики заливов ША: годовые объемы воды, поступающие в заливы с речным стоком (V_Q); площадь залива (A); средняя глубина (H); объем залива (V_o). Среднегодовые суточные расходы рек (Q), впадающих в заливы [14], площадь нерестилищ кеты (A_K) и горбуши (A_G) [6]

| Залив | V_Q , м ³ /год | A , км ² | H , м | V_o , км ³ | Река | $Q \cdot 10^{-6}$, м ³ /сут | $A_K \cdot 10^{-3}$, м ² | $A_G \cdot 10^{-3}$, м ² |
|-------------|--------------------------------|--------------------------|------------|----------------------------|---------|--|---|---|
| Удская губа | $2.95 \cdot 10^{10}$ | 4573 | 22 | 101 | Уда | 71.11 | 4500 | 1000 |
| | | | | | Тыль | 1.73 | 500 | 120 |
| | | | | | Тором | 5.18 | 1800 | 1800 |
| | | | | | Ал | 2.51 | 400 | 1000 |
| | | | | | Киран | 0.43 | 900 | 1500 |
| Тугурский | $5.68 \cdot 10^9$ | 2420 | 17 | 41 | Тугур | 13.82 | 6000 | 2000 |
| | | | | | Кутын | 0.43 | 150 | 375 |
| | | | | | Сыран | 0.92 | 600 | 1000 |
| Академии | $7.95 \cdot 10^8$ | 4861 | 23 | 112 | Ульбан | 0.83 | 800 | 1000 |
| | | | | | Иткан | 0.43 | 30 | 150 |
| Николая | $1.02 \cdot 10^9$ | 671 | 14 | 9 | Усалгин | 3.23 | 2550 | 1800 |

$$N_{Sal} = \frac{A_{Sal}}{100} P_{Aver} + N_1. \quad (3)$$

где A_{Sal} – площадь нерестилища лосося (кеты, горбуши); P_{Aver} – средняя плотность производителей в нерестилище площадью 100 м²; N_1 – количество лосося, пришедшего в течение года на нерест и съеденного хищниками.

Поток биогенных веществ в заливы, Nut (моль/год), поставляемый направленной миграцией лосося, рассчитывался с использованием соотношения

$$Nut = \frac{m_{Sal} N_{Sal}}{10 M_{org}} n_s. \quad (4)$$

Здесь m_{Sal} – масса лосося (горбуша, 1.2 кг; кета, 3.5 кг [6]), съеденного хищниками в заливе и погибшего после нереста в реках длиной менее 100 км; N_{Sal} – число лосося, определяемое соотношением (3); M_{org} – молекулярный вес “формулы” органического вещества для лосося, которая соответствует стехиометрии – $(CH_2O)_{61}(NH_3)_{12}H_3PO_4$ [32]; n_s – стехиометрическое число для азота (12) и фосфора (1); 10 – коэффициент перевода сырой биомассы в сухую [33]. Существует также направленный “отток” биогенных веществ из заливов ША посредством миграции смолтов лосося в открытую часть Охотского моря, а затем в Тихий океан [3, 26]. Этот отток биогенных веществ был оценен с помощью соотношения (4).

В рамках международного проекта LOICZ (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone) была разработана модель по оценке потоков биогенных веществ в прибрежных акваториях полузакрытого типа [30, 38]. Используя баланс воды и соли (консервативные трассеры), рассматривали годовой водообмен с морем (V_X) двухслойной системы (обычный эстуарий). Этот объем рассчитывали по следующему соотношению [38]:

$$V_X = V_Q S_s / (S_{seab} - S_s), \quad (5)$$

где V_Q – годовой объем речного стока в залив; S_s , S_{seab} – средняя соленость поверхностного слоя в прибрежной системе и придонного слоя в море соответственно.

Кроме обмена водой между морем и прибрежной системой, придонный и поверхностный слой частично обмениваются между собой. Этот объем, V_Z , рассчитывали с помощью соотношения [38]

$$V_Z = V_X (S_{seab} - S_b) / (S_b - S_s). \quad (6)$$

Здесь S_b – средняя соленость придонного слоя в прибрежной системе.

Важным элементом экосистемы является время τ_i , необходимое для полного водообмена в слое i . Его можно рассчитать из данных общего объема воды, V_i^o , в слое i и суммы объемов воды, проходящих через каждый слой в течение 365 дней. Для поверхностного слоя:

$$\tau_s = V_s^o \cdot 365 / (V_Q + V_X + V_Z). \quad (7)$$

Для придонного слоя:

$$\tau_b = V_b^o \cdot 365 / (V_X + V_Z). \quad (8)$$

Годовое приращение биогенных веществ в поверхностном слое, ΔNut_s , обусловленное обменом вод, оценивали по следующему соотношению [38]:

$$\Delta Nut_s = V_Q(Nut_Q - Nut_s) + V_X(Nut_b - Nut_s) + V_Z(Nut_b - Nut_s), \quad (9)$$

и в придонном слое:

$$\Delta Nut_b = V_X(Nut_{seab} - Nut_b) - V_Z(Nut_b - Nut_s). \quad (10)$$

Здесь ΔNut_b – годовое приращение биогенных веществ в придонном слое; Nut_{seab} – средняя концентрация биогенного вещества в придонном слое, в море. При получении уравнений (5)–(10) предполагается, что прибрежная экосистема находится в стационарном состоянии. Атмосферные осадки и испарения незначительны в сравнении с речным стоком, не оказывают влияние на водный, солевой и биогенный баланс, не сказывается вклад подземных вод в общий баланс воды, солёности и биогенных веществ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение гидрологических характеристик.

Сравнение гидрологических характеристик (температуры, солёности) поверхностных и придонных вод акватории заливов ША, полученных в периоды 11–25 июля 2016 г. и 7–23 сентября 2022 г., представлено на рис. 2, 3. Из данных зондирования следует, что почти на всей акватории заливов ША в июле 2016 г. наблюдалась двухслойная гидрологическая структура (рис. 2а, б).

Поверхностный слой, как правило, более тёплый (см. рис. 2а) и подвержен распреснению речными водами и тающим дрейфующим льдом (рис. 3а). Неоднородность по температуре и солёности поверхностного слоя отчасти связана не только с речным стоком, но и с таянием дрейфующего льда. В южной части Тугурского залива 19 июля 2016 г. лёд не растаял. По этой причине не были выполнены океанографические работы в южной части этого залива. Температура придонного слоя отрицательна (см. рис. 2б) и солёность более однородна – 31–32 епс (рис. 3б).

В сентябре 2022 г. воды заливов ША были теплее, пространственное распределение температуры воды было более однородным (рис. 2в, г). Благодаря приливному перемешиванию температуры вод поверхностных и придонных горизонтов мало отличались и находились в диапазоне 12–15°C (см. рис. 2). Солёность для основной ча-

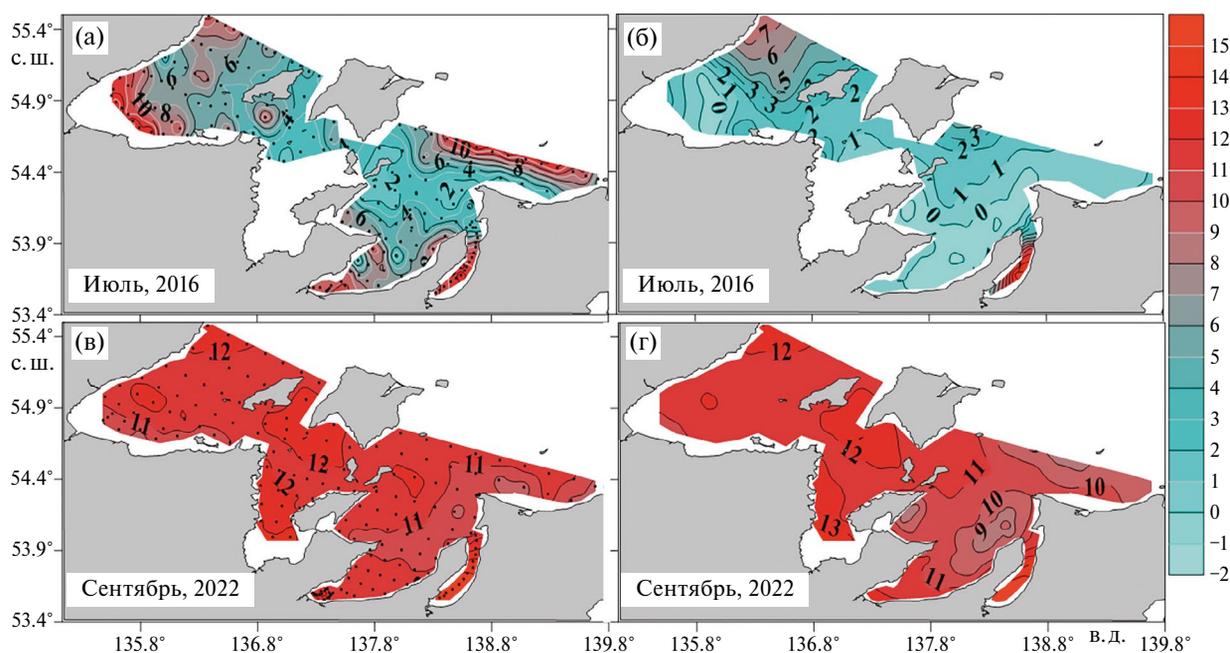


Рис. 2. Распределение температуры в акватории заливов Шантарского архипелага в июле 2016 г. (а, б) и в сентябре 2022 г. (в, г). Слои: поверхностный (а, в) и придонный (б, г) соответственно. Точками на рисунках (а) и (в) указано расположение станций.

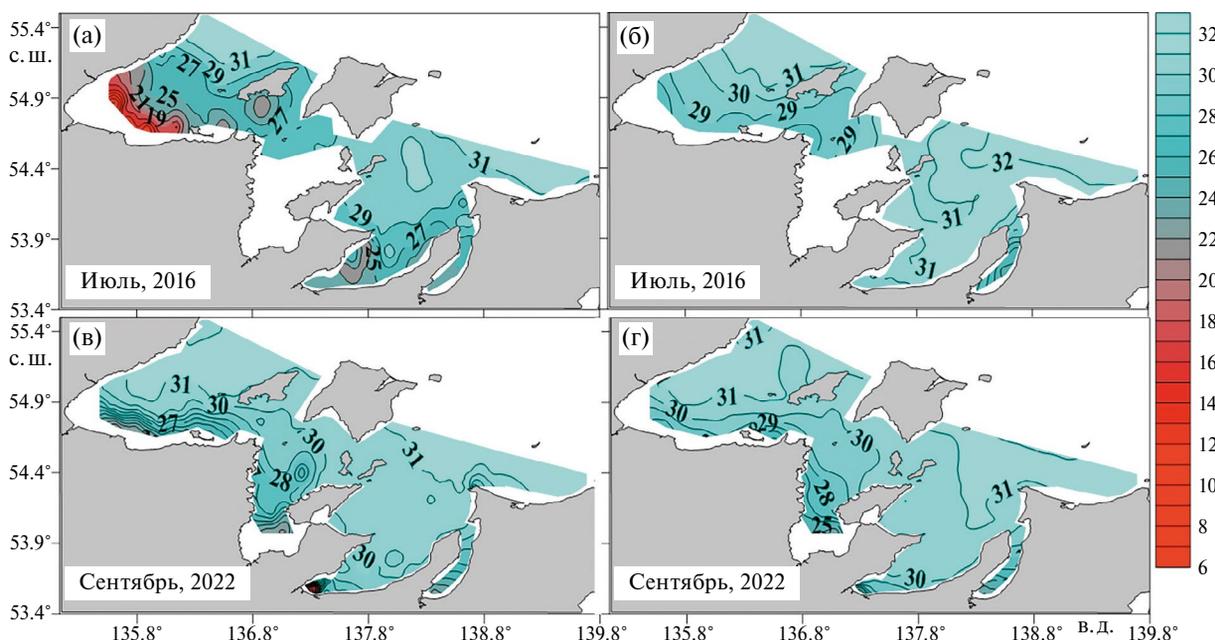


Рис. 3. Распределение солёности в акватории заливов Шантарского архипелага в июле 2016 г. (а, б) и в сентябре 2022 г. (в, г). Слои: поверхностный (а, в) и придонный (б, г) соответственно.

сти акватории поверхностных и придонных слоев изменялась в диапазоне 30–32 епс (рис. 3в, г). Только вершины заливов были подвержены распреснению. В большей степени этот эффект проявлялся для поверхностных вод (см. рис. 3в). Основная причина заключается в том, что максимальный речной сток здесь наблюдается в начале июля, а в сентябре он существенно меньше [15].

Пространственное распределение содержания БВ. Распределения концентраций DSi, DIP, DOP, DIN, DON в поверхностных и придонных слоях вод акватории заливов ША, полученных в периоды 11–25 июля 2016 г. и 7–23 сентября 2022 г., представлены на рис. 4–8. Форма пространственной изменчивости содержания кремния (рис. 4) повторяет особенности распределения

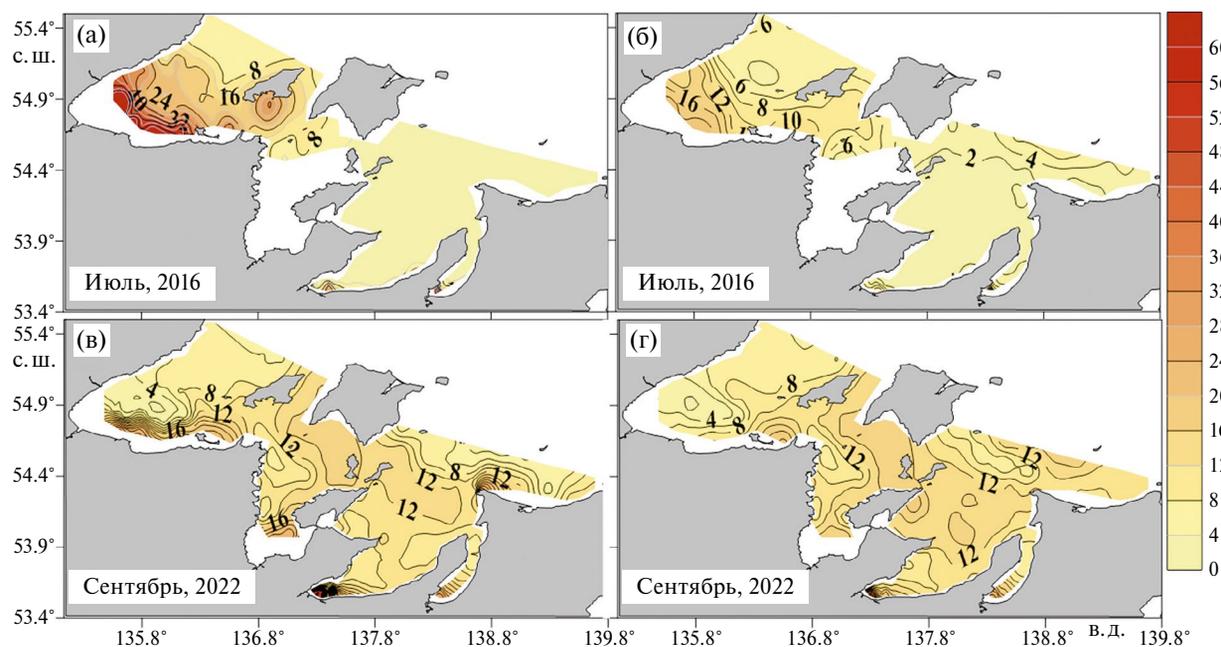


Рис. 4. Распределение концентраций силикатов (мкмоль/л) в акватории заливов Шантарского архипелага в июле 2016 г. (а, б) и в сентябре 2022 г. (в, г). Слои: поверхностный (а, в) и придонный (б, г) соответственно.

солености (см. рис. 3). Логичным выводом из этого следует то, что основным источником поступления кремния в акваторию ША является речной сток. Действительно, реки, впадающие в заливы Шантарского моря, содержат высокие концентрации растворенного кремния – 120–160 мкмоль/л (табл. 2). Резкое уменьшение концентрации кремния в Удском заливе прежде всего связано с процессами разбавления, так как между концентрацией кремния и соленостью практически для всего диапазона соленостей наблюдается линейная зависимость [15].

Особенности распределения концентраций DIP (рис. 5) демонстрируют, что одним из источников его поступления в акваторию заливов ША являются воды Охотского моря, особенно это характерно для придонных вод северной части залива Академии и Удской губы. Концентрации DIP в поверхностном слое меньше в сравнении с таковыми в придонных водах в июле 2016 г. и в сентябре 2022 г. Очевидно, что это связано с изъятием DIP в результате фотосинтеза и последующей минерализацией в придонном слое. Этот вывод подтверждается нелинейной зависимо-

Таблица 2. Гидрохимические характеристики нижнего течения рек Уда, Сыран, Ульбан, Усалгин в июле 2016 г. [14, 15] и сентябре 2022 г. [39]

| Июль, 2016 | <i>S</i> | DIP | $P_{\text{общ}}$ | DSi | NO_2^- | NO_3^- | NH_4^+ | $N_{\text{общ}}$ | ГВ | РОУ |
|----------------|----------|-----|------------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----|------|
| р. Уда | 59 | 0.2 | 0.3 | 131.6 | 0.0 | 1.9 | 0.5 | 14.3 | 5.0 | 6.4 |
| р. Сыран | 135 | 0.2 | 5.4 | 128.2 | 0.28 | 0.02 | 4.5 | 12.4 | 4.2 | 5.2 |
| р. Ульбан | 55 | 0.5 | 1.9 | 163.7 | 0.23 | 0.37 | 3.8 | 19.4 | 7.8 | 9.5 |
| р. Усалгин | 34 | 1.1 | 4.6 | 126.2 | 0.1 | 2.1 | 2.7 | 15.5 | 7.9 | 19.7 |
| Сентябрь, 2022 | <i>S</i> | DIP | $P_{\text{общ}}$ | DSi | NO_2^- | NO_3^- | NH_4^+ | $N_{\text{общ}}$ | ГВ | РОУ |
| р. Уда | 66 | 0.3 | 0.5 | 123.0 | 0.1 | 2.8 | 0.1 | 16.7 | 6.9 | 9.9 |
| р. Сыран | 89 | 1.5 | 2.5 | 134.5 | 0.0 | 0.1 | 1.3 | 18.7 | 8.0 | 13.9 |
| р. Ульбан | 50 | 0.4 | 0.9 | 150.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 18.1 | 7.8 | 14.3 |
| р. Усалгин | 37 | 1.7 | 2.2 | 168.2 | 0.1 | 1.2 | 0.5 | 25.4 | 7.5 | 16.1 |

Примечание. *S* – соленость (мг/кг); DIP, $P_{\text{общ}}$, $N_{\text{общ}}$, DSi, NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ – характеристики (мкмоль/л); ГВ – гумусовые вещества (мгС/л); РОУ – растворенный органический углерод (мг С/л).

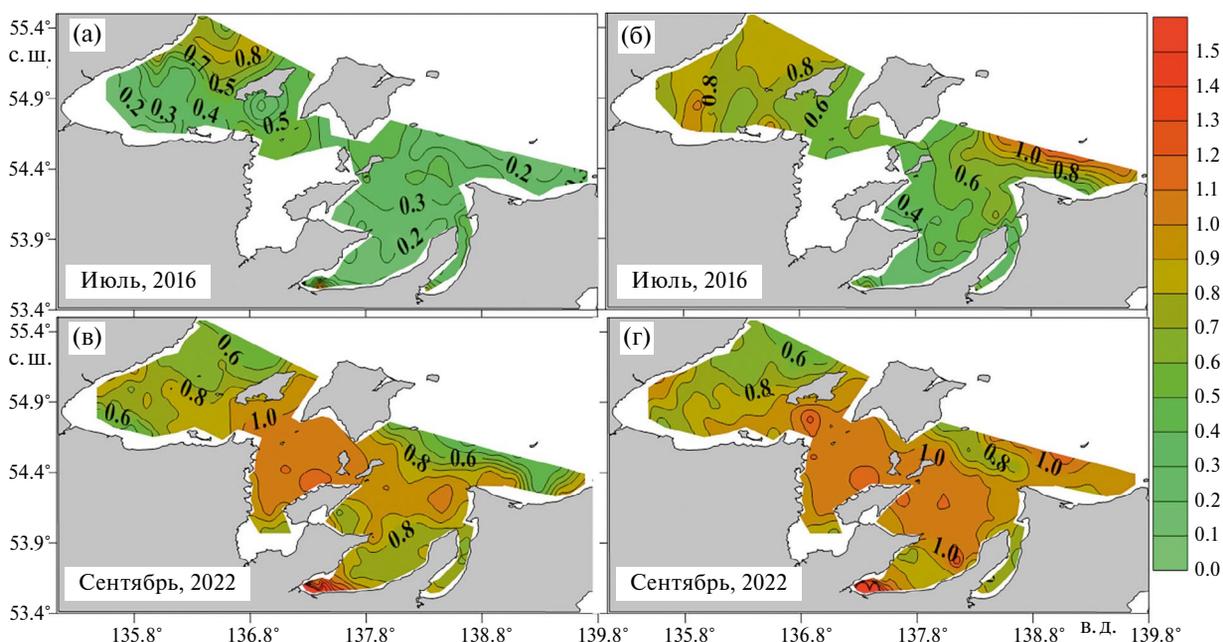


Рис. 5. Распределение концентраций DIP (мкмоль/л) в акватории заливов Шантарского архипелага в июле 2016 г. (а, б) и в сентябре 2022 г. (в, г). Слои: поверхностный (а, в) и придонный (б, г) соответственно.

стью DIP от солености [15]. Высокие концентрации фосфатов в кутовой части Ульбанского залива, по-видимому, обусловлены разложением туш отнерестившегося лосося. В вершину Ульбанского залива впадают три нерестовые реки – Иткан, Ульбан, Сыран. После нереста лосося происходит микробиологическая деструкция туш погибшего

лосося, что является источником поступления биогенных веществ, в том числе DIP.

Концентрации органических форм фосфора в июле 2016 г. выше в сравнении с сентябрем 2022 г. (рис. 6). Для вершины Ульбанского залива характерны высокие концентрации DOP в поверхностных и придонных горизонтах,

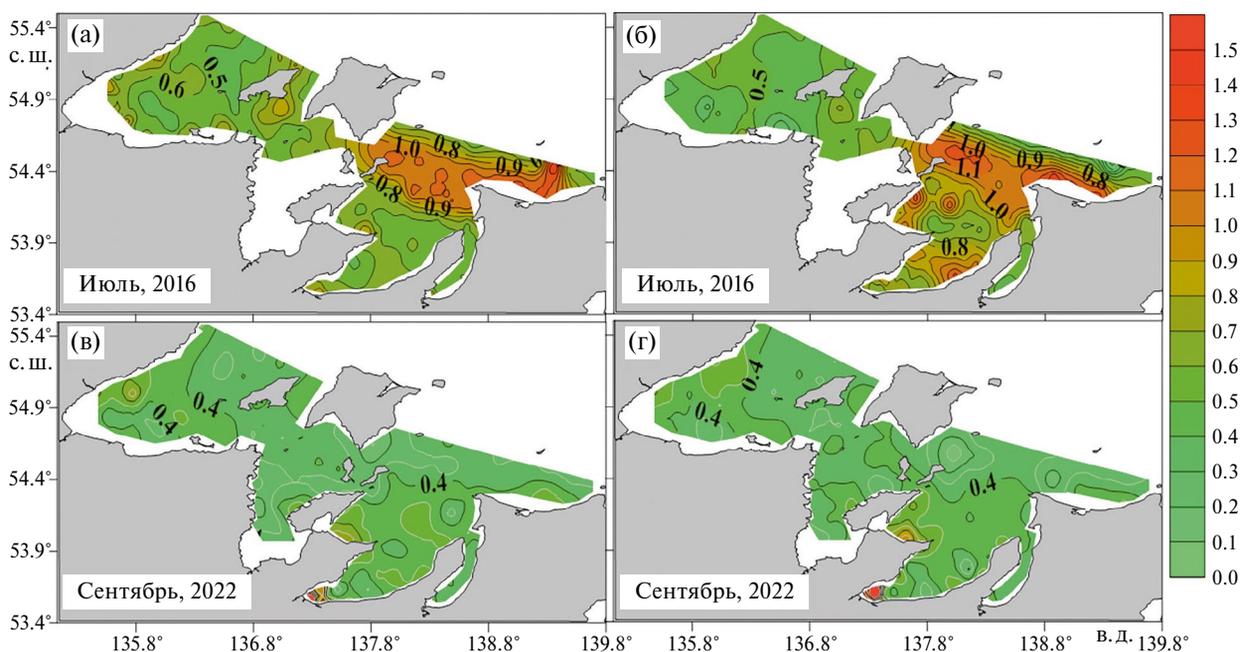


Рис. 6. Распределение концентраций DOP (мкмоль/л) в акватории заливов Шантарского архипелага в июле 2016 г. (а, б) и в сентябре 2022 г. (в, г). Слои: поверхностный (а, в) и придонный (б, г) соответственно.

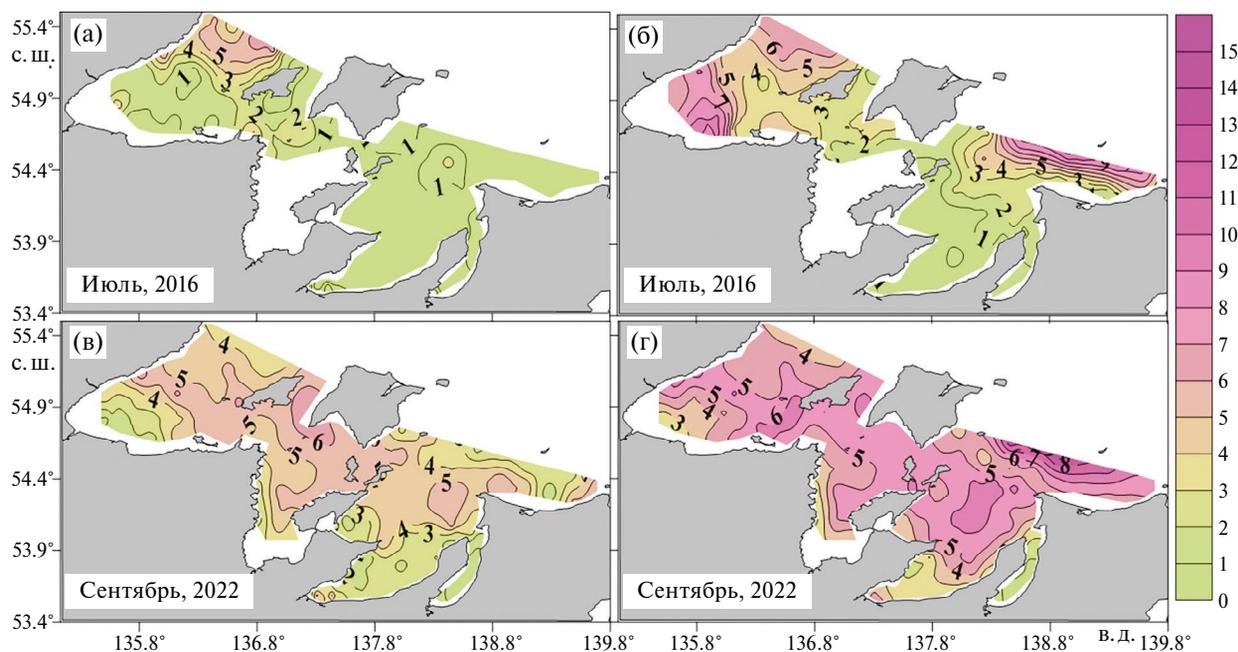


Рис. 7. Распределение концентраций DIN (мкмоль/л) в акватории заливов Шантарского архипелага в июле 2016 г. (а, б) и в сентябре 2022 г. (в, г). Слои: поверхностный (а, в) и придонный (б, г) соответственно.

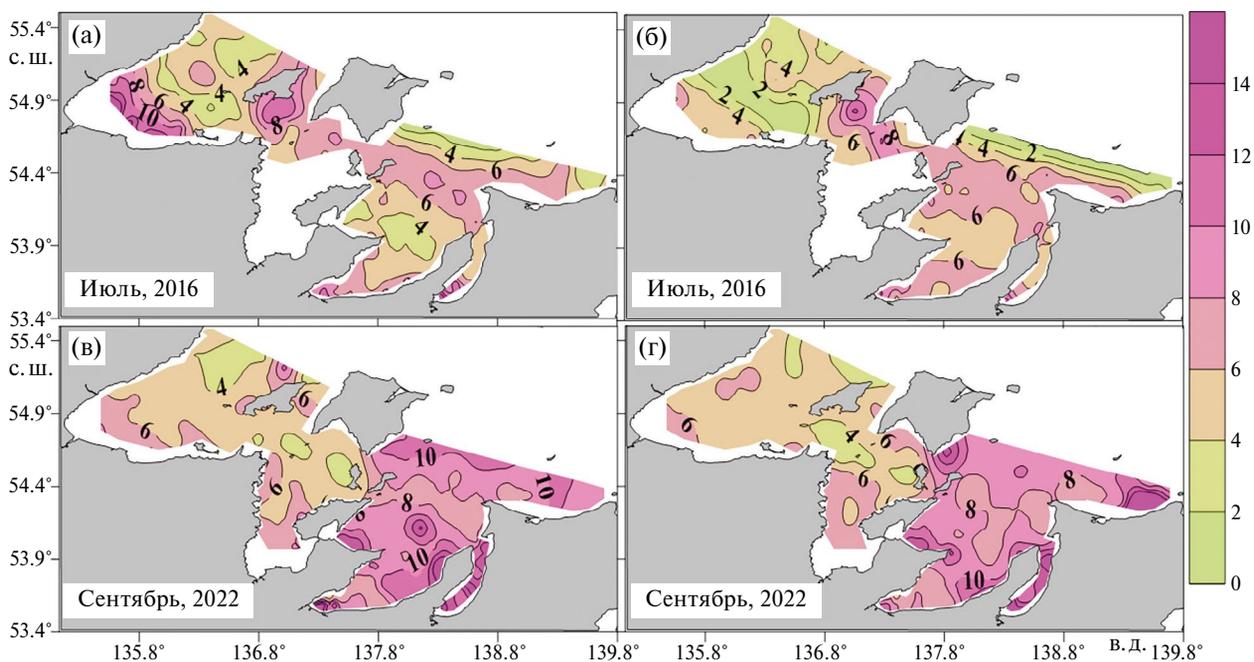


Рис. 8. Распределение концентраций DON (мкмоль/л) в акватории заливов Шантарского архипелага в июле 2016 г. (а, б) и в сентябре 2022 г. (в, г). Слои: поверхностный (а, в) и придонный (б, г) соответственно.

но не в июле, а в сентябре 2022 г., что также объясняется разложением туш лосося.

Концентрации DIN в верхнем слое вод, как и DIP, существенно меньше, в сравнении с придонными горизонтами (рис. 7), что подтверждает гипотезу о преимущественном изъятии неорганических форм биогенных веществ в результате фотосинтеза, а также нелинейной зависимостью DIN от солёности для Удской губы [15]. Концентрации органических форм азота (рис. 8) в общем выше в сравнении с DIN. Распределение DON указывает на существование внешних источников его поступления в акваторию заливов ША. Повышенные содержания DON в южной части Удской губы связаны с терригенным речным стоком органического азота. Средний расход р. Уды более чем в 40 раз превышает суммарный расход

рек Сыран и Ульбан [14], поэтому влияние этой реки на концентрации DON более значимое для Удской губы, в сравнении с заливом Академии. Распределения DIN и DON в придонных водах (рис. 7б, г, 8б, г) в северной части залива Академии указывают на возможность поступления DIN и DON в залив из Охотского моря.

Оценка речных потоков БВ. Потоки БВ в заливы ША, обусловленные речным стоком, рассчитывали по уравнению (1) с использованием данных по речному стоку и концентрациям, представленным в табл. 1, 2. Очевидно, что биогенная нагрузка на залив зависит не только от ежегодной поставки речным стоком, но также от площади залива. Поэтому для сравнения биогенной нагрузки для разных заливов потоки биогенных веществ, представленные в табл. 3,

Таблица 3. Годовые речные потоки биогенных веществ в заливы ША и Амурский залив (Японское море), рассчитанные по уравнению (1) и отнесенные к единице площади залива (ммоль/(м²·год))

| Залив | F_{DIP} | F_{DOP} | F_{DIN} | F_{DON} | F_{DSi} | $F_{ГВ}$ | F_{POY} |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| Удская губа | 1.61 | 0.97 | 17.8 | 82.3 | 821.7 | 3200 | 4383 |
| Тугурский | 0.59 | 0.35 | 6.5 | 29.9 | 298.6 | 1163 | 1593 |
| Академии | 0.11 | 0.33 | 0.5 | 2.3 | 23.6 | 95 | 146 |
| Николая | 2.14 | 3.05 | 5.6 | 25.7 | 224.8 | 980 | 2278 |
| Амурский | 7.10 | 11.93 | 178.6 | 203.5 | 608.7 | 1253 | 2074 |

были отнесены к площади залива и даны в единицах ммоль/(м²·год). В этой таблице в качестве сравнения приведены потоки биогенных веществ, поступающие в Амурский залив (Японское море), который находится под воздействием человека [5].

Эстуарная динамика прибрежных вод предполагает поверхностный сток более легких вод из залива, с одновременным подтоком придонной воды из открытой части моря (компенсационное течение) и водообменом между поверхностными и придонными водами в результате ветрового и приливного перемешивания [30, 38]. Используя средние значения солености в поверхностном и придонном слоях внутри каждого залива, а также средние значения солености в придонном слое за пределами залива (Охотское море), по уравнениям (5), (6) были рассчитаны годовые объемы воды заливов, которые участвуют в водообмене между заливом и морем (V_X) и между слоями (V_Z) внутри залива. Эти объемы соответствуют годовым потокам воды. Время водообмена для поверхностного и придонного слоев рассчитывалось по уравнениям (7), (8). Необходимую в этих расчетах толщину поверхностного слоя оценивали из вертикальных профилей условной плотности. Было получено среднее значение толщины верхнего слоя, равное 7 м, а придонного слоя – ($H - 7$) м, где H – глубина залива. Зная концентрации биогенных веществ в каждом слое (поверхностном, придонном внутри залива и в придонном слое в Охотском море), по уравнениям (9), (10) были рассчитаны годовые изменения биогенных веществ в каждом

слое и отнесены на единицу площади залива. Эти величины по своему смыслу представляют годовые потоки, приведенные к единице площади. Результаты представлены в табл. 4.

Оценка потоков БВ, обусловленная миграцией лосося. Идущий на нерест лосось является пищей зубатых китов (белухи, косатки), которые встречают его в устьях рек. Если принять, что каждая взрослая особь белухи (вес – 1.3 т) съедает в сутки лосося 2% от своей биомассы [35], то за месячный период кормления заметная биомасса лосося, которая в желудках хищников превращается в БВ, выходит во внешнюю среду вместе с экскрециями. В коротких реках (менее 100 км) биогенные вещества умершего после нереста лосося также поступают в устьевую часть заливов. С помощью соотношения (4) и нерестовых площадей рек исследуемых заливов ([6]; табл. 1) были оценены биомасса умершего после нереста лосося и поступившие в среду биогенные вещества в форме P_{tot} и N_{tot} . Результаты представлены в табл. 5.

Количество икры горбуши и кеты (см. табл. 5) оценивали из количества производителей в нерестилищах: для кеты было принято 12 производителей, а для горбуши – 16 на каждые 100 м² [6]. В сентябре средний размер и вес сеголеток горбуши достигает 18 см и 61 г соответственно, далее сеголетки мигрируют в открытую часть моря, а в октябре–ноябре покидают Охотское море через Курильские проливы [3, 26]. При оценке потока общего азота и фосфора из заливов нами было принято, что смертность мальков достигает 50%, а вес сеголеток, на момент миграции из заливов ША, равен 40 г.

Таблица 4. Годовые объемы воды, участвующие в водообмене между заливом и морем (V_X) и между слоями (V_Z) внутри залива (м³/год); время водообмена (τ , сут); годовые потоки биогенных веществ в верхнем слое (I), придонном слое (II) заливов ША, рассчитанные по уравнениям (7), (8), отнесенные к единице площади залива (ммоль/(м²·год))

| Залив | Слой | V_X | τ | F_{DIP} | F_{DOP} | F_{DIN} | F_{DON} | F_{DSi} |
|-------------|------|----------------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Удская губа | I | $3.35 \cdot 10^{11}$ | 19 | 7.18 | -3.26 | 97.3 | -9.2 | 374.0 |
| Тугурский | | $5.17 \cdot 10^{10}$ | 31 | -0.94 | 5.02 | 2.0 | 26.0 | 179.8 |
| Академии | | $1.47 \cdot 10^{10}$ | 166 | 1.64 | 0.28 | 15.8 | -8.1 | 40.7 |
| Николая | | $5.04 \cdot 10^9$ | 33 | 1.28 | 2.91 | 18.0 | 87.5 | 107.0 |
| | | V_Z | | | | | | |
| Удская губа | II | $2.40 \cdot 10^{11}$ | 41 | -14.40 | -3.61 | -42.0 | -54.9 | 255.8 |
| Тугурский | | $1.40 \cdot 10^{11}$ | 45 | -0.39 | -4.33 | 23.7 | -57.2 | 112.9 |
| Академии | | $5.93 \cdot 10^{10}$ | 380 | -1.43 | -0.53 | -4.8 | 9.0 | -16.0 |
| Николая | | $4.65 \cdot 10^{10}$ | 33 | 1.23 | 1.00 | 29.6 | -105.5 | 94.3 |

Таблица 5. Потоки общего фосфора и общего азота, поступление которых в заливы связано с месячным питанием белух лососем, идущим на нерест. Ежегодное изъятие общего фосфора и общего азота из заливов молодым лососем (смолтами), идущим в Охотское море и Тихий океан из заливов ША

| Залив | N_B | W_{Sal}^1 | W_{Sal}^2 | $F_{P_{tot}}$ | $F_{N_{tot}}$ | N_{Caviar} | $F_{P_{tot}}$ | $F_{N_{tot}}$ |
|-------------|-------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|
| Удская губа | 2464 | 1922 | 1026 | 0.03 | 0.36 | $2.11 \cdot 10^9$ | -0.43 | -5.19 |
| Тугурский | 1506 | 1175 | 135 | 0.03 | 0.30 | $1.39 \cdot 10^9$ | -0.54 | -6.48 |
| Академии | 2334 | 1821 | 1013 | 0.03 | 0.33 | $5.15 \cdot 10^8$ | -0.10 | -1.14 |
| Николая | 100 | 78 | 0 | 0.01 | 0.07 | $6.75 \cdot 10^8$ | -0.94 | -11.32 |

Примечание. N_B , N_{Caviar} – число белух и икры соответственно; W_{Sal}^1 , W_{Sal}^2 – вес лосося, соответственно съеденного белухами и погибшего после нереста (т); $F_{P_{tot}}$, $F_{N_{tot}}$ – потоки общего фосфора и общего азота (ммоль/(м²·год)) в заливы ША (знак “+”) и из заливов (знак “-”).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Реки, впадающие в акваторию заливов ША, являются одним из источников БВ. Однако их содержание в речных водах низкое, за исключением растворенного кремния и органического углерода (см. табл. 2). Удельная нагрузка (поток, отнесенный к единице площади) биогенными веществами, DIP, DIN, заливов ША на порядок меньше в сравнении с эвтрофированным Амурским заливом (см. табл. 3), что предполагает низкую первичную продукцию фитопланктона (ПП), особенно в заливах Тугурском и Академии. Действительно, исследования ПП фитопланктона в Тугурском заливе [4] привели автора к выводу, что продуктивность вод этого залива соответствует олиготрофно-мезотрофному уровню. В то же время залив Академии является высокопродуктивным районом [17], что предполагает поставку БВ другими источниками, помимо речных вод. Было высказано предположение, что таким источником БВ может служить идущий на нерест лосось (кета горбуша) [18]. Несмотря на низкие удельные потоки общего азота и фосфора (см. табл. 5), этот источник БВ, по нашему мнению, проявляется в вершине залива Академии в распределении концентраций DIP, DOP (см. рис. 5, 6) и в меньшей степени DON (см. рис. 8) измеренных в сентябре 2022 г. Высокие концентрации общего азота и фосфора были отмечены не только в вершине залива Академии, но и в эстуариях рек Сыран и Ульбан в сентябре 2022 г., в сравнении с результатами измерений июля 2016 г. [16, 39], т. е. после прихода лосося, который идет на нерест в июле–августе [9]. Следует отметить особенность этого источника БВ, которая состоит в импульсном характере и в локальном проявлении. Высокие концентрации

общего фосфора и азота особенно проявляются в вершине залива Академии. Этот факт можно объяснить тремя причинами. Во-первых, количество белух в вершинах заливов разное (см. табл. 5), а в заливе Николая, в отличие от других заливов, нет постоянного стада [36]. Во-вторых, длина рек разная: в реках длиной более 100 км кета и горбуша уходят далеко от моря и БВ от разложившихся туш лосося участвуют в продукционных процессах рек, а не эстуариев [27]. В-третьих, разная интенсивность перемешивания морских и речных вод. Наиболее высокие приливы и речной сток характерны для Тугурского залива и Удской губы. Эти три фактора приводят к тому, что обогащение БВ (общий азот, общий фосфор) идущим на нерест лососем наблюдается только в вершине залива Академии после нереста лосося. В вершинах других заливов эвтрофикации, обусловленной гибелью лосося, не наблюдается. Следует отметить высокую скорость минерализации туш лосося [16]. Очевидно, что она возрастает в желудках хищников за счет ферментативного разложения продуктов питания, с последующей их экскрецией.

В сентябре отток общего азота и фосфора из заливов ША сеголетками горбуши и кеты, которые мигрируют в открытую часть моря, примерно на порядок выше в сравнении с притоком производителей (см. табл. 5). Питательная основа мальков лосося у береговой линии ША не изучена, но мы предполагаем, что ее основой являются солевые марши, т. е. часть суши, которая периодически затапливается приливами. Эта часть суши чрезвычайно продуктивная [29] и обеспечивает корм не только малькам лосося, но и множеству птиц, которых мы наблюдали на осушках в период проведения гидрохимических работ во время отливов в эстуариях рек ША.

Сток рек в акваторию заливов ША формирует эстуарную циркуляцию в бассейне, которая проявляется в трех особенностях. Во-первых, благодаря силам Кориолиса образуются элементы циклонической циркуляции, которые хорошо видны по распределению солёности и DSi в сентябре 2022 г. в вершине Удской губы (см. рис. 3в, 4в). Шлейф повышенных концентраций кремния, выходящий из вершин заливов, имеет северо-восточное направление (см. рис. 4в) вследствие влияния силы Кориолиса на речной сток. В 2016 г. такой характер распределения DSi не проявляется, так как наблюдения проводились сразу после таяния дрейфующего льда, а дрейфующий лед вносит свои “коррективы”, подчиняясь силе и направлению ветра. Во-вторых, в эстуарных бассейнах наблюдается двухслойная структура. Наиболее характерна эта структура для июля 2016 г. (см. рис. 2, 3). Третья особенность состоит в том, что сток речных вод формирует доминирующее поверхностное течение от берега к морю и компенсационное придонное течение от моря к берегу [13]. Указанные выше две последние особенности эстуарной циркуляции используются в модели LOICZ для оценки потока БВ между открытым морем и прибрежной акваторией [30, 38]. Данная модель предполагает два источника БВ в прибрежную акваторию: 1) реки; 2) придонные воды моря. Придонные воды открытого моря в большей степени обогащены БВ в сравнении с вышележащими водами вследствие работы “биологического насоса” [28].

Для определения объема воды в годовом водообмене между заливами и морем (V_X) используются консервативные характеристики среды – объемы воды, поставляемые в заливы с речным стоком, солёность вод заливов (поверхностного и придонного слоев) и солёность придонного слоя вод, находящихся за пределами залива (внешние границы заливов указаны пунктирными линиями на рис. 1). В балансовых расчетах учитывался водообмен между верхним и нижним слоем в заливах (V_Z), но не учитывался водообмен между атмосферой и водами заливов (испарение/осадки). В период отливов (перепад уровня между приливом и отливом мог достигать 6, 10, 9 м для заливов Академии, Тугурского и Удской губы соответственно) и низком расходе воды, реки и заливы были разделены баром. В этом случае речные воды поступали в залив как грунтовые. Поскольку это явление происходило два раза в сутки, то нами не делалось каких-либо разли-

чий между “речными” и “грунтовыми” водами по составу и весь расход воды рассматривался как речной. Из табл. 4 следует, что потоки придонной воды из моря в заливы находятся в ряду: Удская губа > Тугурский > Академии > Николая. Время, необходимое для полного водообмена заливов, оценивается по времени, которое затрачивается для полного водообмена нижнего слоя вод заливов (см. табл. 4). Полный водообмен заливов происходит за период менее двух месяцев, за исключением залива Академии, для последнего этот период соответствует периоду около одного года (см. табл. 4).

Годовые потоки БВ в поверхностные и придонные слои заливов рассчитывали по уравнениям (9), (10) на основе годовых потоков воды в заливах, а также средних концентраций БВ как внутри заливов, так и в придонном слое вне заливов (за пределами пунктирных линий на рис. 1). Следует отметить, что потоки неорганических форм БВ (DIP , DIN , DSi) в верхний слой заливов Академии и Удской губы (см. табл. 4) формируют достаточно высокие концентрации, необходимые для производства ПП.

В рассматриваемой модели потоки БВ в заливы ША обусловлены тремя вкладами: речным стоком, потоком морских придонных вод в заливы и идущим на нерест лососем, суммарная величина потоков отнесена к площади заливов:

$$F_{Nut}^{in} = (V_Q Nut_Q + V_X Nut_{seab} + F_{Sal}^{in}) / A. \quad (11)$$

Здесь F_{Sal}^{in} – поток БВ, обусловленный идущим на нерест лососем; A – площадь залива. В табл. 6 приведены потоки кремния, общего фосфора, общего азота, поступающие в заливы с реками, придонной водой из Охотского моря и лососем, а также их относительные вклады для потоков из придонных вод моря и лосося. Вклад речного потока легко рассчитывается от 100%.

Сток БВ из заливов ША обусловлен поверхностным стоком вод из залива и миграцией сеголеток лосося из заливов в открытую часть моря. Сток отнесен к площади залива A :

$$F_{Nut}^{out} = [(V_Q + V_X) Nut_s + F_{Sal}^{out}] / A, \quad (12)$$

где F_{Sal}^{out} – сток БВ из заливов, обусловленный миграцией молоди лосося. Результаты стока кремния, общего фосфора, общего азота и относительные вклады лосося в сток фосфора и азота приведены в табл. 7.

Таблица 6. Потоки кремния (Si), общего фосфора (P), общего азота (N), поступающие в заливы (F_{Nut}^{in}) с реками, придонной водой из Охотского моря и лососем (ммоль/(м²·год)). Процентная доля потока БВ из моря и за счет лосося

| Залив | F_{Si}^{in} | Si [%] _{sea} | $F_{P_{tot}}^{in}$ | P [%] _{sea} | $F_{N_{tot}}^{in}$ | N [%] _{sea} | F_P^{sal} , % | F_N^{sal} , % |
|-------------|---------------|--------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| Удская губа | 1395 | 41.1 | 80.1 | 96.8 | 756 | 86.8 | 0.038 | 0.048 |
| Тугурский | 580 | 48.5 | 31.0 | 97.0 | 247 | 85.3 | 0.097 | 0.121 |
| Академии | 59 | 60.2 | 4.2 | 89.5 | 52 | 94.6 | 0.718 | 0.638 |
| Николая | 314 | 28.3 | 14.5 | 64.2 | 153 | 79.5 | 0.069 | 0.046 |

Таблица 7. Потоки кремния (Si), общего фосфора (P), общего азота (N), вытекающие из заливов (F_{Nut}^{out}) с поверхностными водами, и процентная доля потоков P, N, обусловленная миграцией молоди лосося

| Залив | F_{Si}^{out} | F_P^{out} | F_N^{out} | F_P^{sal} , % | F_N^{sal} , % |
|-------------|----------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| Удская губа | 766 | 94.1 | 764.9 | 0.45 | 0.68 |
| Тугурский | 287 | 31.6 | 252.6 | 1.71 | 2.56 |
| Академии | 35 | 4.2 | 39.8 | 2.37 | 3.00 |
| Николая | 112 | 10.1 | 123.5 | 9.34 | 9.17 |

Из табл. 6 видно, что роль придонных вод Охотского моря в поставке фосфора и азота в заливы ША является доминирующей (80–90%). Мы полагаем, что потоками с моря достигается высокая продуктивность заливов. Максимальный вклад в потоки фосфора и азота, обусловленный миграцией идущего на нерест лосося, составляет около 1% от общей величины потоков и относится к заливу Академии. Более значимый вклад лосося для залива Академии обусловлен тем, что реки, впадающие в залив, короткие, поэтому БВ, выделившиеся из туш погибшего лосося, возвращаются в эстуарий.

Основной сток БВ обусловлен поверхностными водами, вытекающими из заливов в Охотское море. Относительный вклад сеголеток лосося в величину стока азота и фосфора составляет 1–3% для Удской губы, заливов Тугурский и Академии. Для залива Николая достигает 9%.

Здесь использовался наипростейший вариант модели LOICZ, поэтому полученные результаты следует рассматривать как предварительные. Метеорологические наблюдения за атмосферными осадками над ША могут внести коррективы в рассчитываемые потоки. Также используемый вариант модели может легко быть расширен включением таких биогеохимических процессов, как взаимодействие с донными осадками [38]. Для большинства прибрежных экосистем это взаимодействие является важным. Однако в случае зали-

вов ША мощные приливные течения и высокая подвижность придонных вод приводят к тому, что на основной площади дна заливов не происходит накопление мелких (пелитово-алевритовых) фракций в донных осадках. В 2016 г. на всех станциях исследуемой акватории ША были сделаны попытки взятия донных осадков геологической трубкой. Только один раз трубка пришла с песком, включающим алеврит. Взятие грунта черпаком было более успешным, как правило, он содержал гальку, покрытую губками, и песок. Некоторые авторы полагают, что заливы являются зоной транзита осадочного вещества [1, 10]. Иначе говоря, сток БВ в форме взвешенного органического вещества осуществляется за пределами заливов и входит в рассчитанные нами потоки (F_{Nut}^{out}). Однако этот вопрос требует дальнейшего уточнения. Белым пятном остается область солевых маршей, ее роль в продукции органического вещества и в формировании прибрежных потоков БВ.

Также нами не рассматривался фитобентос, включая микрофитобентос, в котором доминируют диатомеи [20]. Очевидно, что донная растительность может служить дополнительным стоком БВ, включая растворенный кремний. Этот сток БВ либо минерализуется и возвращается в среду, либо в форме взвешенного органического вещества выносится за пределы заливов.

ВЫВОДЫ

Предложен механизм, поддерживающий устойчивое многолетнее содержание БВ в географически изолированной от Охотского моря акватории заливов ША. Он предполагает взаимодействие заливов ША с открытой частью Охотского моря. Такое взаимодействие приводит к преимущественному обогащению акватории ША БВ, формируя в акватории высокую продукционную активность. Применение модели LOICZ к акватории ША показало, что, действительно, неорганические формы биогенных веществ (DIP, DIN) в верхнем слое заливов ША обеспечиваются эстуарной циркуляцией вод, т. е. БВ придонных горизонтов из открытой части Охотского моря поступают в верхний слой заливов.

Дополнительными источниками в акваторию заливов ША для DSi и растворенного органического углерода являются сток рек и лосось, пришедший на нерест, который приводит к обогащению вершины залива Академии DIP, DOP, DON. Однако доля биогенных веществ, поступающая в результате миграции идущего на нерест лосося, незначительная – менее 1%.

Важным стоком БВ является отток верхнего слоя вод заливов в Охотское море и сток общего азота и общего фосфора из заливов ША подростыми смолтами лосося, которые осенью мигрируют в открытую часть Охотского моря. Сток азота и фосфора, обусловленный миграцией молоди лосося, составляет 1–3% для всех заливов, кроме залива Николая, для которого он достигает 9%.

Благодарности. Авторы благодарят научный состав и членов экипажей 71-го и 82-го рейсов НИС “Профессор Гагаринский” за всестороннюю помощь в экспедиционных исследованиях, администрацию ФГБУ “Заповедное Приамурье” за возможность работы в национальном парке “Шантарские острова”.

Финансирование работы. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект 21-55-53015-ГФЕН) и государственных программ Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева, регистрация № 121-21500052-9, 121021700346-7.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоус О.В., Леонова Т.Д., Валитов М.Г. Природные условия и рельеф дна залива Академии (Охот-

ское море) // Тихоокеан. геология. 2023. Т. 42. № 1. С. 33–44.

2. Волков А.Ф. Интегральные схемы количественного распределения массовых видов зоопланктона дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана по среднемноголетним данным (1984–2006) // Известия ТИНРО. 2008. Т. 154. С. 135–143.

3. Волобуев В.В., Марченко С.Л. Тихоокеанские лососи континентального побережья Охотского моря (биология, популяционная структура, динамика численности, промысел). Магадан: СВНЦДВО-РАН, 2011. 303 с.

4. Дзюбан А.Н. Первичные продукционные процессы в воде Тугурского залива Охотского моря // Океанология. 2003. Т. 43. № 3. С. 383–392.

5. Звалинский В.И., Тищенко П.П., Михайлик Т.А. и др. Эвтрофикация залива Петра Великого // Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 260–293.

6. Золотухин С.Ф. Предварительная оценка нерестового фонда кеты и горбуши Тугуро-Чумиканского района (Охотское море) // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. 2005. Вып. 3. С. 622–628.

7. Иванков В.Н., Иванкова Е.В., Кульбачный С.Е. Внутривидовая экологическая и темпоральная дифференциация у тихоокеанских лососей. Эколого-темпоральные расы и темпоральные популяции кеты *Oncorhynchus keta* // Известия ТИНРО. 2010. Т. 163. С. 91–105.

8. Канзепарова А.Н. Особенности биологии и современное состояние запасов горбуши (*Oncorhynchus gorbuscha*) северо-западного побережья Охотского моря: Дис. ... канд. биол. наук: 03.02.06. Владивосток, 2018. 148 с.

9. Кульбачный С.Е. Экология и структура популяций кеты северо-западной части континентального побережья Охотского моря: Дис. ... канд. биол. наук: 03.02.06. Владивосток, 2010. 148 с.

10. Леонова Т.Д., Белоус О.В., Теницкий И.И. Формирование рельефа дна Тугурского залива // Тихоокеан. Геология. 2010. Т. 29. № 2. С. 81–89.

11. Лоция Охотского моря. Выпуск 2. Северная часть моря. М.: Изд. УНГСВ МФ СССР. 1960. 200 с.

12. Мельников В.В., Федорец Ю.В. Распределение зоопланктона и полярного кита *Balaena mysticetus* Linnaeus, 1758 в заливе Академии Охотского моря // Биология моря. 2016. Т. 42. № 3. С. 189–194.

13. Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 175 с.

14. Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Павлова Г.Ю. и др. Карбонатная система эстуариев рек Сыран и Ульбан (Ульбанский залив Охотского моря) в период летнего паводка // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 5. С. 650–661.

15. Семкин П.Ю., Тищенко П.Я., Павлова Г.Ю. и др. Влияние речного стока на гидрохимические характеристики вод Удской губы и залива Николая (Охотское море) в летний сезон // *Океанология*. 2021. Т. 60. № 3. С. 387–400.
16. Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Тищенко П.П. и др. Лосось как основа функционирования экосистемы залива Академии (Охотское море). Возможные угрозы ее деградации // *Вестник ДВО РАН*. 2024. № 2. С. 90–106.
17. Тищенко П.П., Тищенко П.Я., Семкин П.Ю. и др. Первичная продукция фитопланктона в акватории Шантарского архипелага // *Биология моря*. 2023. Т. 49. № 1. С. 56–65.
18. Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Тищенко П.П. и др. Гидрохимические исследования залива Академии (Охотское море) // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 1. С. 98–111.
19. Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Шулькин В.М. и др. Комплексные исследования прибрежных акваторий Японского и Охотского морей, находящихся под влиянием речного стока (71-й рейс научно-исследовательского судна “Профессор Гагаринский”) // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 2. С. 340–342.
20. Цой И.Б., Прушковская И.А. Диатомовые водоросли поверхностных осадков залива Академии Охотского моря // *Биология моря*. 2023. Т. 49. № 2. С. 82–93.
21. Чернявский В.И., Жигалов И.А., Матвеев В.И. Океанологические основы формирования зон высокой биологической продуктивности // *Гидрометеорология и гидрохимия морей*. Охотское море. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. Т. 9. Вып. 2. С. 157–160.
22. Шпак О.В., Парамонов А.Ю. Гренландский кит *Balaena mysticetus* Linnaeus, 1758 в западной части Охотского моря (2009–2016 гг.): особенности распределения, поведение, угрозы // *Биология моря*. 2018. Т. 44. № 3. С. 179–186.
23. Шпак О.В., Парамонов А.Ю. Наблюдения за гренландскими китами (*Balaena mysticetus*) в Шантарском регионе Охотского моря; потенциальные угрозы для восстановления численности популяции // *Морские млекопитающие Голарктики*. 2015. Т. 2. С. 334–342.
24. Шпак О.В., Парамонов А.Ю. Наблюдения за белухами (*Delphinapterus leucas*), косатками (*Orcinus orca*), гладкими китами (*Balaenidae*) в Ульбанском заливе Охотского моря // *Морские млекопитающие Голарктики*. 2012. Т. 2. С. 395–400.
25. Шунтов В.П. Биологические ресурсы Охотского моря. М.: Агропромиздат, 1985. 224 с.
26. Шунтов В.П., Темных О.С. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах. Владивосток: ТИПРО-центр, 2008. Т. 1. 481 с.
27. Brickell D.C., Goering J.J. The influence of decomposing salmon on water chemistry. Fairbanks: University of Alaska, Institute of Water Resources, Technical Report, 1971. No. IWR-12. 27 p.
28. De La Rocha C.L., Passow U. The biological pump // In: Holland H.D., Turekian K.K. (Eds.). *Treatise on Geochemistry*, 2nd edition. Oxford: Elsevier, 2014. V. 8. P. 93–122.
29. Fourqurean J., Johnson B., Kauffman J.B. et al. Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses // In: Howard J. et al. (Eds.). *Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature*. Arlington, Virginia, USA, 2014. 181 p.
30. Gordon D.C., Boudreau P.R., Mann K.H. et al. *LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines*. LOICZ Reports and Studies, 1996. No. 5. 96 p.
31. Grasshoff K., Ehrhardt M., Kremling K. *Methods of Seawater Analysis*. Weinheim, Deerfield, Beach, Florida: Verlag Chemie, 1983. 419 p.
32. Jonsson B., Jonsson N. Migratory Atlantic salmon as vectors for the transfer of energy and nutrients between freshwater and marine environments // *Freshwater Biology*. 2003. V. 48. P. 21–27.
33. Menden-Deuer S., Lessard E.J. Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton // *Limnol. Oceanogr.* 2000. V. 45. № 3. P. 569–579.
34. Rogachev K.A., Carmack E.C., Foreman M.G.G. Bowhead whales feed on plankton concentrated by estuarine and tidal currents in Academy Bay, Sea of Okhotsk // *Continental Shelf Research*. 2008. V. 28. P. 1811–1826.
35. Reilly S., Hedley S., Borberg J. et al. Biomass and energy transfer to baleen whales in the South Atlantic sector of the Southern Ocean // *Deep-Sea Research. Part II*. 2004. V. 51. P. 1397–1409. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.06.008>
36. Shpak O.V., Mescherky I.G., Glazov D.M. et al. Structure and Assessment of Beluga Whale, *Delphinapterus leucas*, Populations in the Russian Far East // *Marine Fisheries Review*. 2020. V. 81. No. 3–4. P. 72–86.
37. Solovyev B.A., Shpak O.V., Glazov D.M. et al. Summer distribution of beluga whales (*Delphinapterus leucas*) in the Sea of Okhotsk // *Russian Journal of Theriology*. 2015. V. 14. No. 2. P. 201–215.
38. Swaney D.P., Giordani G. Proceedings of the LOICZ Workshop on biogeochemical budget methodology and applications, Providence, Rhode Island, November 9–10, 2007. LOICZ Research & Studies No. 37. Helmholtz-Zentrum Geesthacht, 2011. 195 p.
39. Zhang J., Tishchenko P.Ya., Jiang Z.J. et al. Diverse nature of the seasonally coastal eutrophication dominated by oceanic nutrients: An eco-system based analysis characterized by salmon migration and aquaculture // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. V. 193. 115150.

DISTRIBUTIONS AND FLUXES OF NUTRIENTS IN THE BAYS OF THE SHANTAR ARCHIPELAGO

P. Ya. Tishchenko*, P. P. Tishchenko, A. A. Ryumina, M. G. Shvetsova

Ilichev Pacific Oceanological Institute, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041 Russia

**e-mail: tpavel@poi.dvo.ru*

The results of measurements of nutrients (silicates, inorganic and organic forms of nitrogen and phosphorus) content obtained in the Shantar Archipelago (ShA) water area in July 2016 and September 2022 are presented. It was found that photosynthesis results in the preferential removal of inorganic forms of nitrogen and phosphorus from surface waters. River runoff leads to enrichment of the bays in the ShA area with silicon and dissolved organic carbon. It was demonstrated the important role of spawning salmon in the enrichment of Academy Bay by total phosphorus and total nitrogen as well. It was estimated that migration of the juvenile salmon from ShA area to the open part of the Sea of Okhotsk is significant transport of the total phosphorus and total nitrogen. Application of the LOICZ model to the ShA area showed that the main source of different forms of nitrogen and phosphorus is the near-bottom waters of the Sea of Okhotsk (about 80–90% from total nutrients runoff to the bays). The model is based on ideas about estuarine water circulation, which maintains stable long-term content of nutrients in the bays of the ShA, which are comparatively geographically isolated from the Sea of Okhotsk. An assumption was made that salt marshes along the coastline of the ShA could be an important source of nutrients, and production of organic matter. The main sink of nutrients is outflow upper layer of the bays into the open sea.

Keywords: nutrients, fluxes, Shantar archipelago, Sea of Okhotsk, salmon, LOICZ model