

**УСЛОВИЯ ОБИТАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ**

УДК 551.464.38:543.319

**П.Я. Тищенко, Ю.А. Барабанщиков, Г.Ю. Павлова, А.А. Рюмина,  
С.Г. Сагалаев, П.Ю. Семкин, П.П. Тищенко, О.А. Уланова,  
М.Г. Швецова, Е.М. Шкирникова, Е.Ю. Тибенко\***

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

**ГИДРОХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАЛИВА УГЛОВОГО  
(АМУРСКИЙ ЗАЛИВ) В РАЗНЫЕ СЕЗОНЫ**

В 2019 и 2020 гг. проведены сезонные гидролого-гидрохимические наблюдения зал. Углогого. За период исследований в акватории залива выполнено 120 станций для четырех сезонов (октябрь 2019 г., февраль, май, июнь 2020 г.). Для осеннего сезона 2020 г. исследован гидрохимический состав 13 мелких рек, впадающих в северо-восточную часть залива. Установлено, что воды рек Песчанка, Саперка и Грязнуха содержат чрезвычайно высокие концентрации биогенных веществ, обусловленные стоком канализационных вод в реки, что определяет эвтрофикацию залива. Вблизи устьев этих рек в зимний сезон, при отсутствии ветрового перемешивания, подо льдом образуются аномалии гидрохимических параметров (низкое содержание кислорода и pH, высокие концентрации общего азота, фосфора, аммония, кремния, взвеси и парциального давления углекислого газа). В теплый период года благодаря ветровому перемешиванию гипоксия вод отсутствует. Во все климатические сезоны обнаружены высокие концентрации общего азота (10,0–40,0 мкмоль/л), общего фосфора (1,5–2,0 мкмоль/л), растворенного органического углерода (3–5 мгС/л), хлорофилла (0,5–2,0 мкг/л), что указывает на высокую интенсивность продукционно-деструкционных процессов в заливе. Деструкция органического вещества доминирует над продукцией, так как воды залива недосыщены по отношению к кислороду и пересыщены по отношению к углекислому газу, что обусловлено береговым и речным стоком органического вещества. Подводное фотографирование показало отсутствие лугов зостеры (*Zostera marina* L.) в заливе. Сравнение эпизодических исследований прошлых лет с нашими результатами указывает на деградацию экосистемы залива. Видимым проявлением этой деградации является исчезновение лугов морских трав, возникновение гипоксийных явлений, воды залива стали источником углекислого газа для атмосферы. Сделано предположение, что ограничение водообмена между открытой частью Амурского залива и зал. Угловым гидротехническими сооружениями

---

\* Тищенко Павел Яковлевич, доктор химических наук, заведующий лабораторией, e-mail: [travel@poi.dvo.ru](mailto:travel@poi.dvo.ru); Барабанщиков Юрий Александрович, научный сотрудник, e-mail: [biw90@mail.ru](mailto:biw90@mail.ru); Павлова Галина Юрьевна, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: [ravlova@poi.dvo.ru](mailto:ravlova@poi.dvo.ru); Рюмина Анна Александровна, аспирант, e-mail: [ryuminaanna@bk.ru](mailto:ryuminaanna@bk.ru); Сагалаев Сергей Григорьевич, научный сотрудник, e-mail: [sagalaev@poi.dvo.ru](mailto:sagalaev@poi.dvo.ru); Семкин Павел Юрьевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, e-mail: [rahno@list.dvo.ru](mailto:rahno@list.dvo.ru); Тищенко Петр Павлович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, e-mail: [eq15@poi.dvo.ru](mailto:eq15@poi.dvo.ru); Уланова Ольга Анатольевна, научный сотрудник, e-mail: [olga\\_shitkova@mail.ru](mailto:olga_shitkova@mail.ru); Швецова Мария Геннадьевна, научный сотрудник, e-mail: [chippers@ Rambler.ru](mailto:chippers@ Rambler.ru); Шкирникова Елена Михайловна, научный сотрудник, e-mail: [elmi@poi.dvo.ru](mailto:elmi@poi.dvo.ru); Тибенко Евгения Юрьевна, ведущий инженер, e-mail: [tibenko@poi.dvo.ru](mailto:tibenko@poi.dvo.ru).

(дюкер, 1982 г., и низководный мост, 2012 г.) и эвтрофикация залива стали основными причинами деградации экосистемы залива.

**Ключевые слова:** эвтрофикация, биогенные вещества, парциальное давление CO<sub>2</sub>, растворенный кислород, продукционно/деструкционные процессы, залив Угловой.  
DOI: 10.26428/1606-9919-2021-201-138-157.

**Tishchenko P.Ya., Barabanshchikov Yu.A., Pavlova G.Yu., Ryumina A.A., Sagalaev S.G., Semkin P.Yu., Tishchenko P.P., Ulanova O.A., Shvetsova M.G., Shkirnikova E.M., Tibenko E.Yu.** Hydrochemical state of the Uglovoy Bight (Amur Bay) in different seasons // *Izv. TINRO.* — 2021. — Vol. 201, Iss. 1. — P. 138–157.

Hydrological and chemical surveys were conducted in the Uglovoy Bight in October, 2019, February, May and June, 2020 (in total 120 stations) and chemical analyses of water from 13 small rivers running into the bight were done on October 21–22, 2020. Extremely high concentration of nutrients was detected in the Peschanka, Saperka and Gryaznukha Rivers that was obviously caused by waste waters discharge. These rivers were the main source of the bight eutrophication. Within the bight, the highest anomalies of chemical parameters, as low oxygen content, low pH, high concentrations of nutrients (N, P, Si), high turbidity, and high CO<sub>2</sub> partial pressure were observed close to these rivers mouths, in particular under the ice in winter, when wind mixing was absent. The hypoxia disappeared in the warm period of year because of wind mixing. High concentrations of total nitrogen (10.0–40.0 μmol/L), total phosphorus (1.5–2.0 μmol/L), dissolved organic carbon (3–5 mgC/L), and chlorophyll *a* (0.5–2.0 μg/L) in all seasons were the results of active production-destruction processes, obviously with prevalence of organic matter destruction, since the water in the bight was undersaturated with oxygen and supersaturated with carbon dioxide — the bight accumulates and mineralizes organic matter from terrestrial and riverine discharge. Underwater photographs did not detect *Zostera* meadows at the bottom, which were observed in the northwestern Uglovoy bight in the past. Comparison of historical data on episodic studies in the bight with results of the surveys indicates degradation of its ecosystem, with such signs as disappearance of seagrass, hypoxia in winter, and CO<sub>2</sub> flux into the atmosphere. Reduce in water exchange between the bight and the Amur Bay caused by construction of the underwater pipeline in 1982 and the bridge in 2012 is suggested as a reason of the degradation.

**Key words:** eutrophication, nutrient, CO<sub>2</sub> partial pressure, dissolved oxygen, production/destruction process, Uglovoy Bight.

## Введение

Наиболее важным научным событием 20-го века является установление непрерывного роста концентрации углекислого газа в атмосфере (кривая Килинга). Факт увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере означает, что глобальный

---

*Tishchenko Pavel Ya., D.Chem., head of laboratory, Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: tpavel@poi.dvo.ru; Barabanshchikov Yury A., researcher, Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: biw90@mail.ru; Pavlova Galina Yu., Ph.D., leader researcher, Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: pavlova@poi.dvo.ru; Ryumina Anna A., post-graduate student, Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: ryuminaanna@bk.ru; Sagalaev Sergey G., researcher, Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: sagalaev@poi.dvo.ru; Semkin Pavel Yu., Ph.D., senior researcher, Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: pahno@list.dvo.ru; Tishchenko Petr P., Ph.D., senior researcher, Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: eq15@poi.dvo.ru; Ulanova Olga A., researcher, Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: olga\_shitkova@mail.ru; Shvetsova Maria G., researcher, Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: chippers@rambler.ru; Shkirnikova Elena M., researcher, Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: elmi@poi.dvo.ru; Tibenko Evgenia Yu., leading engineer, Pacific Oceanological Institute, Russian Ac. Sci., 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia, e-mail: tibenko@poi.dvo.ru.*

планетарный цикл углерода находится в нестационарном состоянии. Образное объяснение причины нестационарного состояния атмосферного пула углерода было дано ранее [Nellemann et al., 2009]. Углерод, обуславливающий концентрацию углекислого газа в атмосфере, подразделяется на три пула: «черно-коричневый», «зеленый» и «голубой», соотношения между ними изменяются во времени. Увеличение количества углекислого газа в атмосфере, возникающее вследствие сжигания ископаемого топлива и другой промышленной деятельности, называется «черно-коричневым» углеродом. Изъятый из атмосферы в результате фотосинтеза наземной растительностью (деревья, кустарники, травы) и пребывающий в этой форме органического вещества углекислый газ назван «зеленым углеродом». Углекислый газ, изъятый из атмосферы посредством фотосинтеза высокопродуктивными прибрежными акваториями (мангровые леса, марши, луга морских трав) Мирового океана и захороненный в донных отложениях, назван «голубым углеродом», величина его составляет примерно 55 % от «зеленого углерода» [Nellemann et al., 2009]. По инициативе 4 международных организаций ООН (UNEP, FAO, IOC, UNESCO) предложена технология под названием «голубой углерод», направленная на сдерживание роста углекислого газа в атмосфере. Суть этого проекта сводится к увеличению на нашей планете площадей, занятых высокопродуктивными растениями, которые сдерживали бы рост углекислого газа [Duarte et al., 2013]. В этом проекте мелководные бухты, заросшие зостерой морской *Zostera marina* L., рассматриваются как перспективные бассейны по изъятию углекислого газа из атмосферы. Существуют большие неопределенности в оценке величины «голубого углерода» как на региональном, так и на глобальном уровне. Причины, приводящие к неопределенности в оценке «голубого углерода», перечислены в литературе [Duarte et al., 2013]. Был предложен и путь к преодолению этих неопределенностей [Howard et al., 2014]. Он состоит в использовании унифицированной методики инвентаризации «голубого углерода» в прибрежных акваториях, содержащих мангровые леса, марши и луга морских трав, которая была принята международным сообществом [Howard et al., 2014]. Первым шагом выполнения данной программы на таком региональном уровне, как зал. Петра Великого, является инвентаризация площадей лугов зостеры.

Гидробиологические особенности зостеры морской, ее географическая заселенность дна мелководных бассейнов зал. Петра Великого обобщены в трех диссертационных работах [Паймеева, 1984; Лысенко, 1985; Блиновская, 2001]. В ряде других работ [Бычков и др., 1989; Раков, 2008] указывалось наличие лугов зостеры морской в северо-западной части зал. Углогового. Более того, в местах распространения зостеры воды зал. Углогового поглощали углекислый газ из атмосферы [Павлова, 2001] и были пересыщены по отношению к кислороду [Семилетов, 1987]. Иначе говоря, идея изъятия атмосферного углекислого газа высокопродуктивной морской травой подтверждалась предыдущими исследованиями в отношении данного залива. Однако наши попытки изучения раннего диагенеза органического вещества в донных отложениях в местах зарослей зостеры не увенчались успехом для зал. Углогового, поскольку такие заросли не были там обнаружены [Тищенко и др., 2020].

В связи с найденными изменениями в экосистеме залива возникла необходимость в более подробных гидрохимических исследованиях в разные сезоны для установления направленности потока углекислого газа на границе раздела вода/атмосфера и оценки возможных причин исчезновения лугов зостеры.

### Материалы и методы

Залив Угловой — мелководный бассейн второго порядка Амурского залива (рис. 1), его площадь равна 42 км<sup>2</sup>. Западный берег залива возвышенный, за исключением низкого участка берега в районе перешейка, отделяющего п-ов Де-Фриз от материка. Северный берег залива низкий, порос травой и окаймлен осушкой. Восточный берег залива также низкий; в глубине этого берега местность повышается. На вос-

точном берегу раскинулся пос. Трудовое. Вследствие мелководности и большого количества песчано-илистых банок, расположенных к юго-западу от линии входных мысов, зал. Угловой существенного навигационного значения не имеет. Глубины на фарватерах, ведущих в залив, изменяются в пределах 0,4–3,6 м\*. На восточном и северо-восточном берегу в залив впадает много мелких ручьев и речек, наибольшие из них реки Черная Речка, Богатая, Весенняя, Пятый Ключ, Песчанка, Саперка, Грязнуха и Аэродромная ([Лосев, 2019], рис. 1). Более подробное географическое и гидрологическое описание зал. Угловой дано ранее [Раков, 2008].

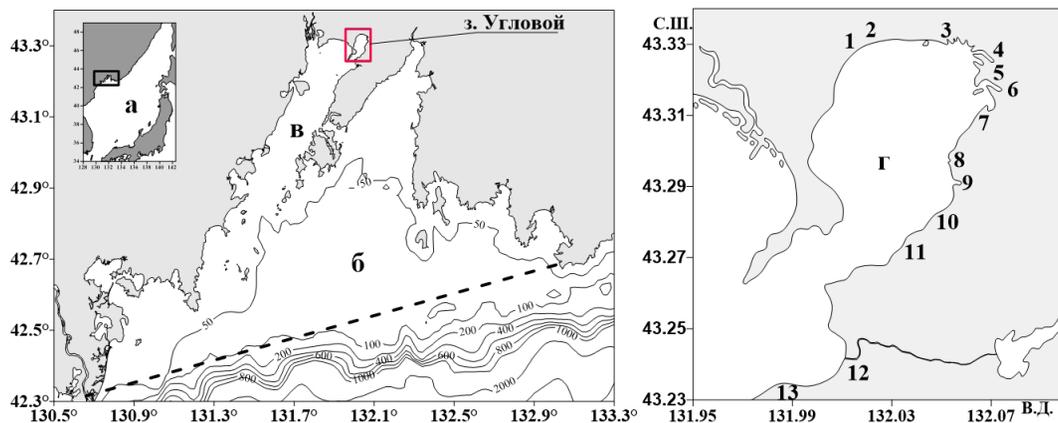


Рис. 1. Географическое положение изучаемого района: а — Японское море; б — зал. Петра Великого; в — Амурский залив; г — зал. Угловой. Места впадения рек: 1 — безымянная-1, 2 — Прохладная, 3 — Аэродромная, 4 — Грязнуха, 5 — Саперка, 6 — Песчанка, 7 — Угольная, 8 — Чистая, 9 — Пятый Ключ, 10 — Весенняя, 11 — безымянная-2, 12 — Богатая, 13 — Черная Речка

Fig. 1. Scheme of studied area: Japan Sea (а); Peter the Great Bay (б); Amur Bay (в); Uglovoy Bight (г); the river mouths: 1 — bezimyannaya-1, 2 — Prokhladnaya, 3 — Aerodromnaya, 4 — Gryaznukha, 5 — Saperka, 6 — Peschanka, 7 — Ugolnaya, 8 — Chistaya, 9 — Pyaty Kluch, 10 — Vesennaya, 11 — bezimyannaya-2, 12 — Bogataya, 13 — Chernaya Rechka

Экспедиционные работы в заливе выполняли на резиновой моторной лодке. Зондирование воды осуществляли зондом Sea-Bird-19 plus V2, оснащенным датчиками температуры, давления, электропроводности (солености), растворенного кислорода (DO), флуоресценции хлорофилла *a* и мутности. Датчик мутности был откалиброван в единицах мутности по формазину (FTU). На каждой станции проводили измерение глубины видимости диска Секки. Отбор проб воды производили батометром Нискина. В октябре 2019 г., феврале, мае 2020 г. на каждой станции проводили подводные видеосъемки дна. Отбирали воду для анализа на следующие гидрохимические параметры: соленость, DO, pH, общая щелочность (ТА), хлорофилл *a*, растворенный органический углерод (DOC), гумусовое вещество, фосфаты, силикаты, нитраты, нитриты, ион аммония, общий азот, общий фосфор. Исследования выполняли 1–3 октября 2019 г.; 25, 26 февраля, 13–15 мая и 22–24 июня 2020 г. Гидрохимическую съемку основных речек, впадающих в зал. Угловой, проводили один раз — 21, 22 октября 2020 г. Для характеристики речных вод пробы воды отбирали на расстоянии от 200 до 2000 м от устьев рек.

Значения pH измеряли потенциометрическим методом, используя ячейку безжидкостного соединения [Тищенко и др., 2006]. ТА анализировали прямым титрованием по методу Бруевича [Павлова и др., 2008]. Элементы карбонатной системы ( $pH_{in situ}$ , DIC — растворенный неорганический углерод,  $PCO_2$  — парциальное давление двуокиси углерода) рассчитывали с учетом поправки на содержание органической щелочности [Тищенко и др., 2006].

\* Лоция северо-западного берега Японского моря. От реки Туманная до мыса Белкина. СПб.: ГУНИО МО, 1996. 360 с.

Анализ нитритов, аммонийного азота, анионов ортофосфорной кислоты, кремния выполняли спектрофотометрическим методом с помощью стандартной процедуры [Grasshoff et al., 1983]. Определение общего фосфора и азота проводили на автоматическом анализаторе SKALAR SAN++.

Растворенный кислород в морской воде анализировали с помощью метода Винклера, модифицированного Карпентером [Carpenter, 1965]. В данном варианте метода применяли микробюретку Brinkman/Dosimate-665 (объемом 1 мл), которая позволяет измерять титруемый раствор с точностью до 0,001 мл. Использовали кислородные склянки объемом около 125 мл. Ошибка измерения составила  $\pm 0,005$  мл/л.

DOC в речной воде измеряли на анализаторе TOC-VCPN производства Shimadzu (Япония). Калибровку прибора проводили с помощью стандартных растворов бифталаата калия, точность оценивали из параллельных измерений, она составляла  $\pm 1,5$  %.

Хлорофилл *a* и феофитин измеряли спектрофотометрическим методом в соответствии с ГОСТ 17.1.4.02.-90. Пробы воды фильтровали через мембранные фильтры Владипор МФАС-ОС-3 с диаметром пор 0,8 мкм. Затем фильтры высушивали, растворяли в 5 мл 90 %-ного раствора ацетона и помещали в холодильник. Через сутки на спектрофотометре PC 3600 производства Shimadzu проводили измерения.

Концентрации макрокомпонентов речных вод ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) измеряли методом ионно-обменной хроматографии на хроматографе LC-20A производства Shimadzu (Япония). Точность измерения — 1 %.

### Результаты и их обсуждение

Залив Петра Великого, включая Амурский залив, характеризуется неправильными полусуточными приливами с амплитудой 30–50 см [Супранович, Якунин, 1976]. Не является исключением зал. Угловой, для которого средняя величина приливов составляет 40 см [Раков, 2008]. Малая глубина залива, приливно-отливное и ветровое перемешивание обеспечивают высокую однородность гидрохимических характеристик по глубине, поэтому здесь приводятся результаты гидрохимических свойств только для поверхностного горизонта (0,5 м ниже границы раздела вода/воздух). Следует отметить, что температура вод залива была однородна не только по глубине, но и по площади и находилась в пределах: минус 1,0...1,8 °С (февраль); 15–16 (май); 18–19 (июнь); 20–21 °С (октябрь). В отличие от температуры, соленость поверхностных вод залива существенно изменяется не только в зависимости от сезона, но и пространственно (рис. 2). В результате льдообразования и мелководности залива максимальная соленость воды наблюдалась в зимний сезон, минимальная — в октябре, после выпадения атмосферных осадков (дождя). Существенное опреснение отмечалось в восточной и северной частях залива, куда впадают мелкие речки, а берег низменный, болотистый.

Другая важная особенность залива — высокая мутность воды, которая обусловлена тремя основными причинами: ветровое перемешивание в условиях мелководности залива; поступление взвеси с береговым стоком; эвтрофикация залива береговым стоком и впадающими речками. В зимний сезон, когда залив покрыт льдом, ветровое перемешивание отсутствует, а береговой сток минимальный, мутность вод также минимальная, исключая область гидрохимических аномалий в северо-восточной части залива (рис. 3).

В зимний сезон в северо-восточной части залива обнаружена гидрохимическая аномалия — высокие концентрации общего азота (рис. 4), общего фосфора (рис. 5) и гипоксия (рис. 6). Несмотря на отсутствие ветрового перемешивания, для области гидрохимической аномалии наблюдается высокая мутность, которая, на наш взгляд, обусловлена взвешенным органическим веществом (см. рис. 3, а). Здесь характерны высокие концентрации неорганических форм биогенных веществ соответственно 24, 110, 156 мкмоль/л для фосфатов, аммония и силикатов. Содержание нитратов было невысоким (0,3 мкмоль/л). Этот факт можно объяснить существованием восстанови-

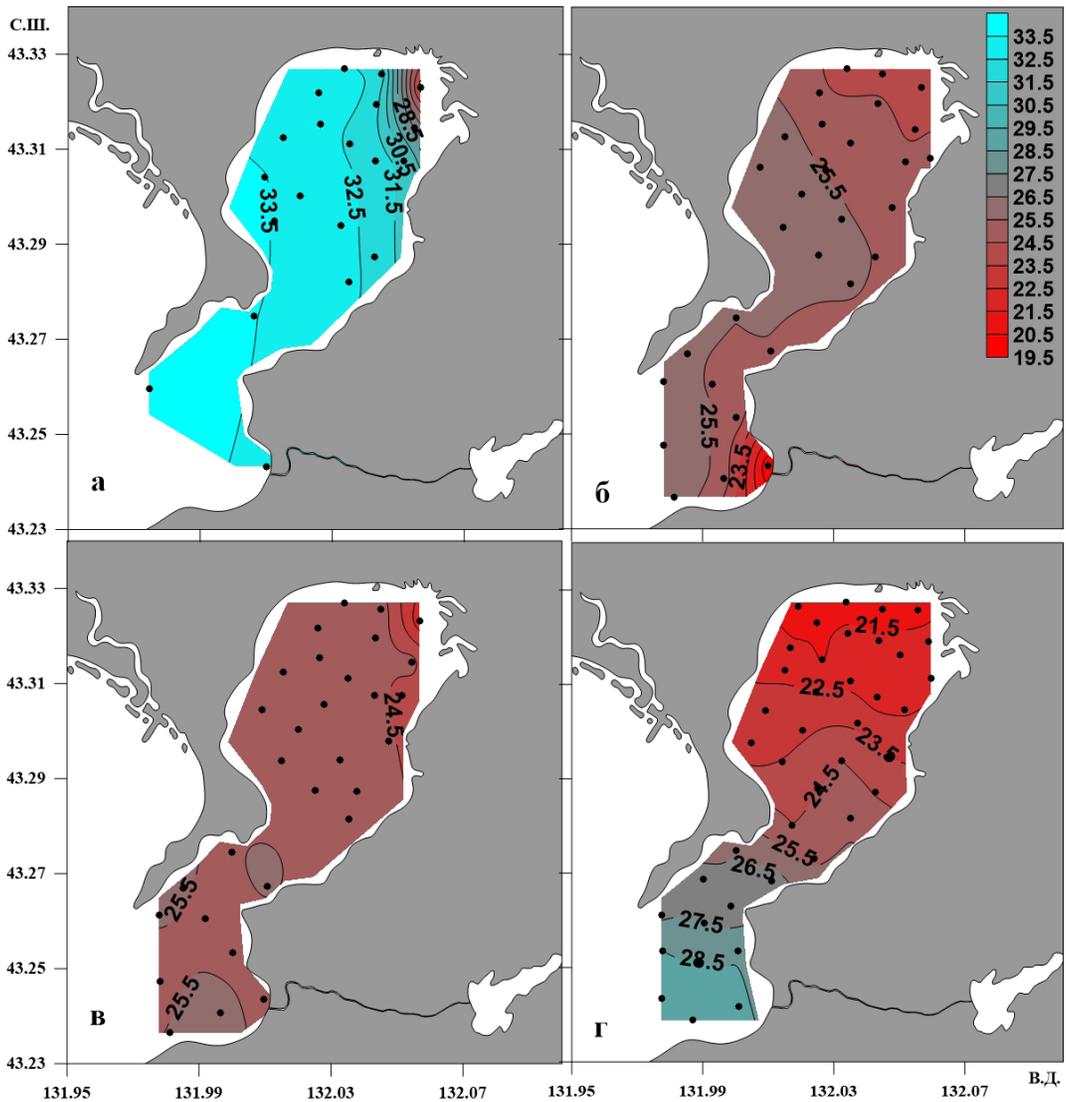


Рис. 2. Распределение солености (‰) в поверхностных водах зал. Углогового в разные сезоны: а — 25, 26 февраля 2020 г.; б — 13–15 мая 2020 г.; в — 22–24 июня 2020 г.; г — 1–3 октября 2019 г. Точками указано расположение станций

Fig. 2. Salinity (‰) at the surface of the Uglovoy Bight, by seasons: а — 25–26 February, 2020; б — 13–15 May, 2020; в — 22–24 June, 2020; г — 1–3 October, 2019. Stations are shown by dots

тельной среды с высокими концентрациями аммония и DOC (17 мгС/л). Необходимо отметить, что для основной акватории залива концентрация DOC в разные сезоны находилась в пределах 3–5 мгС/л.

Основная причина возникновения гидрохимической аномалии — эвтрофикация, обусловленная канализационными стоками в реки водосбора залива в период ледостава. Лед ограничивает газовый обмен между морской водой и атмосферой, а также устраняет ветровое перемешивание. Эти два фактора способствуют образованию локальной гипоксии и аномалий других гидрохимических параметров в зимний сезон. Гипоксийные условия в водах зал. Углогового в северо-восточной его части также отмечались ранее [Раков, 2008; Петухов и др., 2019], что обусловлено стоком р. Песчанка, в которую осуществляется сброс из канализационно-очистных сооружений [Лосева, Гриванова, 2014].

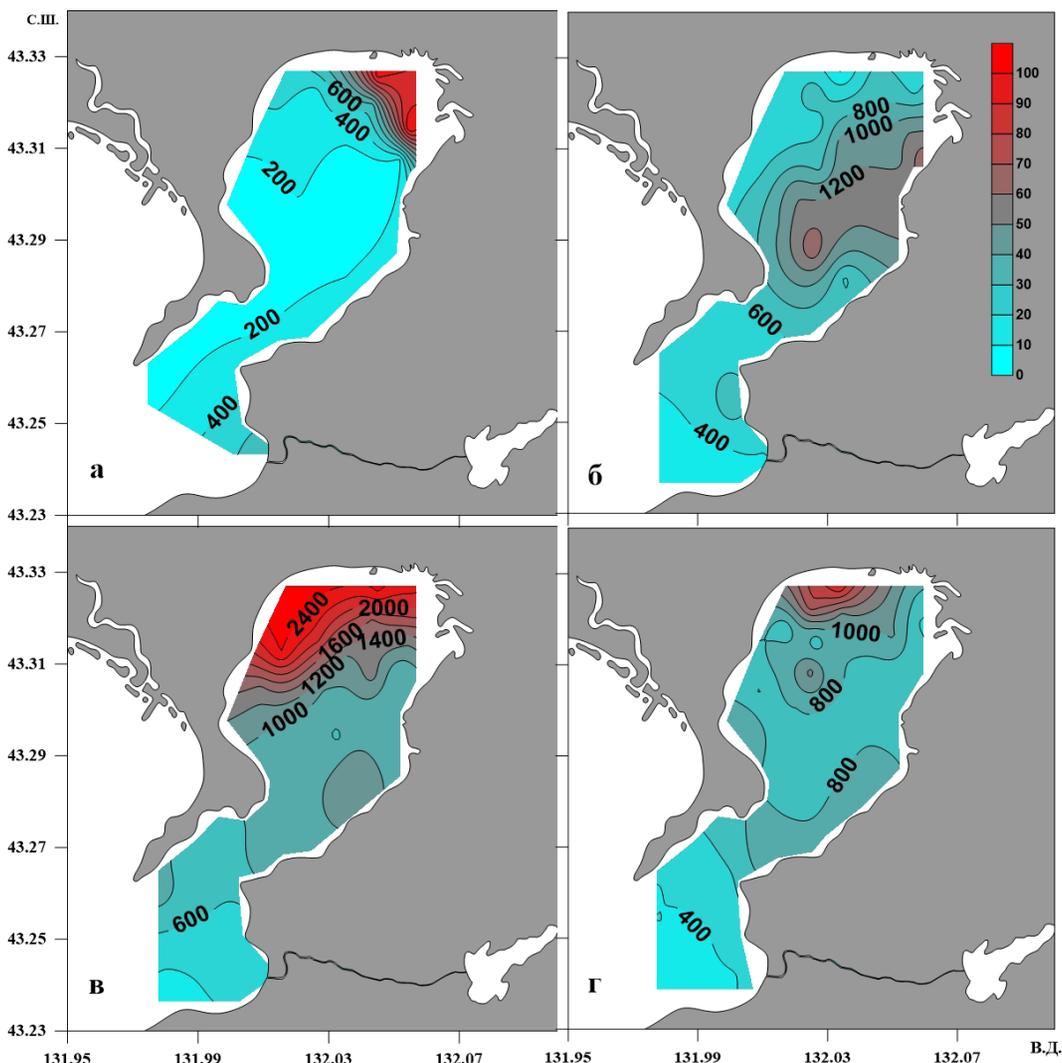


Рис. 3. Распределение мутности (FTU — Formazin Turbidity Unit) в поверхностных водах зал. Углогового в разные сезоны: а — 25, 26 февраля 2020 г.; б — 13–15 мая 2020 г.; в — 22–24 июня 2020 г.; г — 1–3 октября 2019 г.

Fig. 3. Turbidity (FTU — Formazin Turbidity Unit) at the surface of the Uglovoy Bight, by seasons: а — 25–26 February, 2020; б — 13–15 May, 2020; в — 22–24 June, 2020; г — 1–3 October, 2019

Химический состав речных вод приведен в табл. 1. Судя по солености речных вод и макрокомпонентному составу, некоторые пробы содержали морскую воду (реки безымянная-1, Прохладная, Грязнуха, Пятый Ключ и Весенняя). Очевидно, с нагонными ветрами морская вода проникает далеко вглубь реки. Из данных табл. 1 видно, что все речки содержат высокие концентрации биогенных веществ и DOC. Наиболее высокие концентрации характерны для рек Саперка, Грязнуха и Песчанка. Река Саперка является правым притоком р. Песчанка и впадает в нее около 500 м выше устья. Сток этих рек не только формирует гидрохимическую аномалию в зимний сезон, но и приводит к эвтрофикации залива в целом. Этот вывод следует из высоких концентраций общего азота и общего фосфора (рис. 4, 5). Однако концентрации неорганических форм азота и фосфора могут ограничивать фотосинтез. Опубликованные в литературе средние [Sarhou et al., 2005] значения констант Михаэлиса-Ментона для скоростей

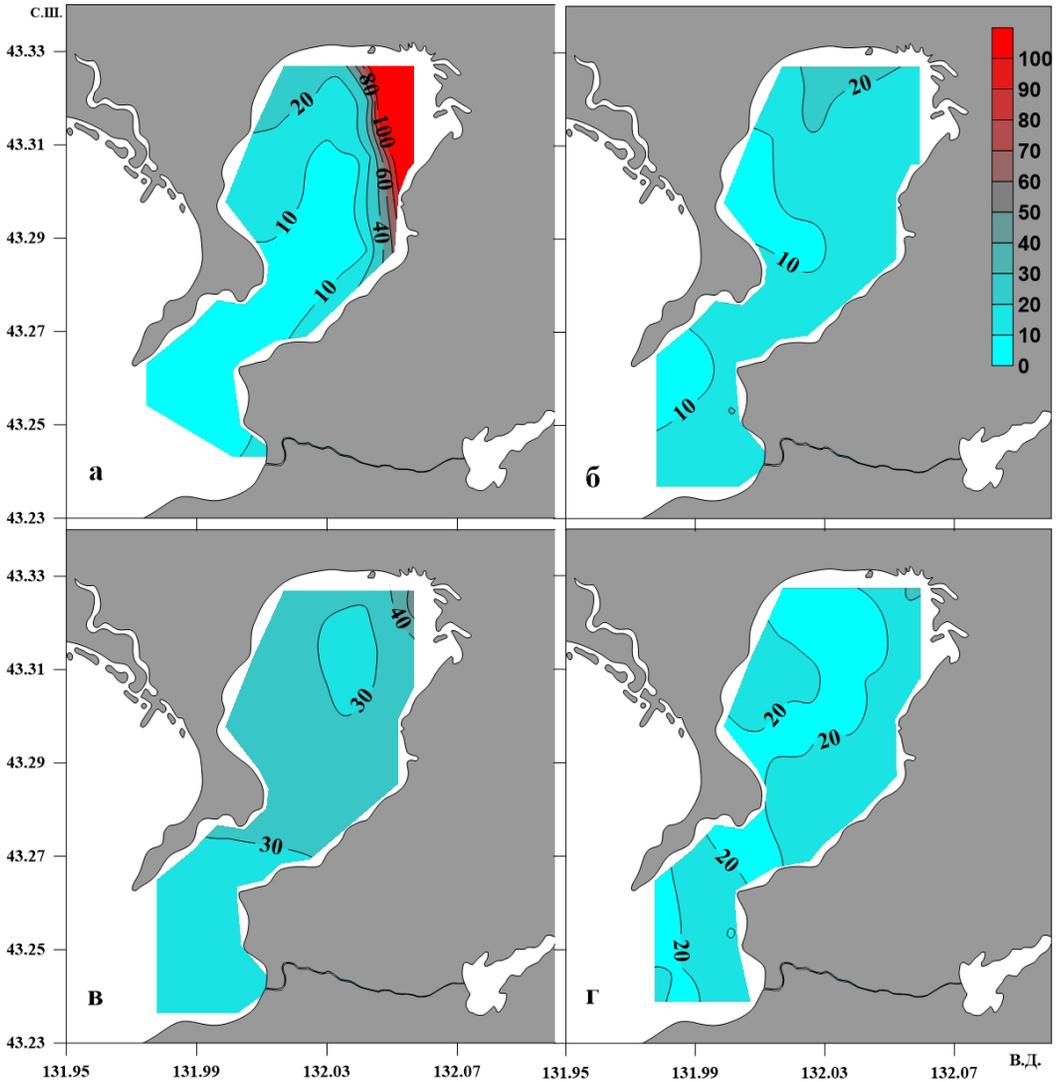


Рис. 4. Распределение концентрации общего азота (мкмоль/л) в поверхностных водах зал. Углогового в разные сезоны: а — 25, 26 февраля 2020 г.; б — 13–15 мая 2020 г.; в — 22–24 июня 2020 г.; г — 1–3 октября 2019 г.

Fig. 4. Concentration of total nitrogen ( $\mu\text{mol/L}$ ) at the surface of the Uglovoy Bight, by seasons: а — 25–26 February, 2020; б — 13–15 May, 2020; в — 22–24 June, 2020; г — 1–3 October, 2019

извлечения диатомеями неорганических форм азота, фосфора и кремня равны соответственно 1,6, 1,2 и 3,9 мкмоль/л. Сравнение этих констант с данными изменения концентраций неорганических форм биогенных веществ ( $\text{DIN} = [\text{NH}_4^+] + [\text{NO}_2^-] + [\text{NO}_3^-]$ ,  $[\text{DIP}]$ ,  $[\text{DISi}]$ ) для разных сезонов (табл. 2) указывает на то, что только растворенный кремний не ограничивает продукцию фитопланктона в заливе. Более того, распределение концентрации кремния проявляет яркую сезонную изменчивость: наименьшие концентрации наблюдаются в зимний сезон, возрастают в теплый период года и становятся максимальными осенью (более 100 мкмоль/л) (рис. 7). Исключением становится зимняя гидрохимическая аномалия, обусловленная стоком коммунальных вод (рис. 7, а). Менее выраженная тенденция сезонного изменения в распределении неорганических форм биогенных веществ прослеживается для фосфатов, что видно из диапазона изменений их концентраций (табл. 2). Эти факты можно объяснить сезонными изменениями интенсивности берегового стока в залив.

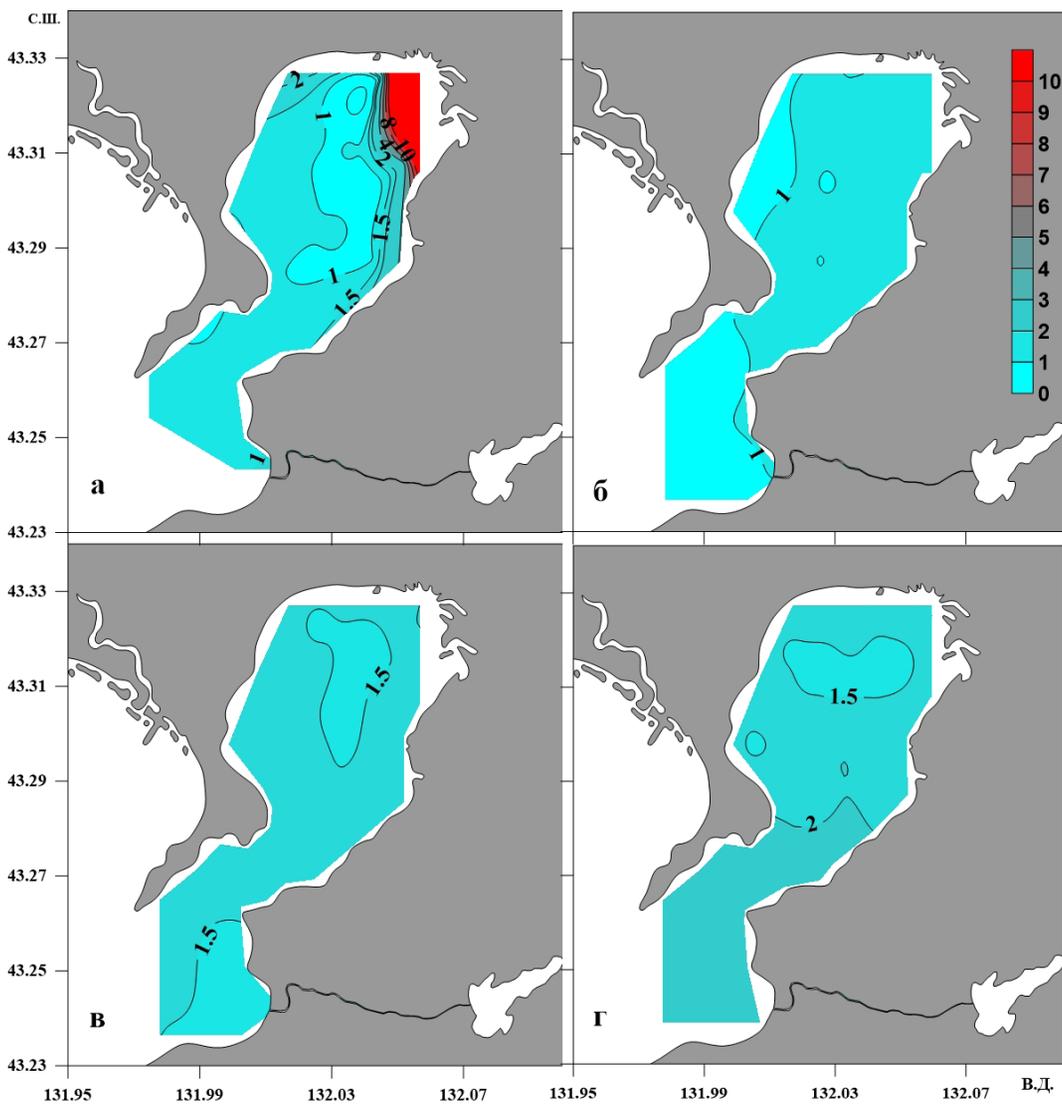


Рис. 5. Распределение концентрации общего фосфора (мкмоль/л) в поверхностных водах зал. Углогового в разные сезоны: а — 25, 26 февраля 2020 г.; б — 13–15 мая 2020 г.; в — 22–24 июня 2020 г.; г — 1–3 октября 2019 г.

Fig. 5. Concentration of total phosphorus ( $\mu\text{mol/L}$ ) at the surface of the Uglovoy Bight, by seasons: а — 25–26 February, 2020; б — 13–15 May, 2020; в — 22–24 June, 2020; г — 1–3 October, 2019

Интенсивность речного и берегового стока возрастает в теплый сезон, а соленость уменьшается (см. рис. 2). Увеличение берегового и речного стоков приводит к увеличению концентраций неорганических форм кремния и фосфора. Сезонные и пространственные тенденции изменений концентраций неорганических форм азота отсутствуют. По-видимому, это связано с более сложными процессами, в которых они участвуют. Известно, что нитрат- и нитрит-ионы в поверхностном слое морской воды подвергаются фотолизу под действием солнечного излучения ультрафиолетовой области согласно реакциям [Zafriou, True, 1979a, b; Spokes, Liss, 1996]



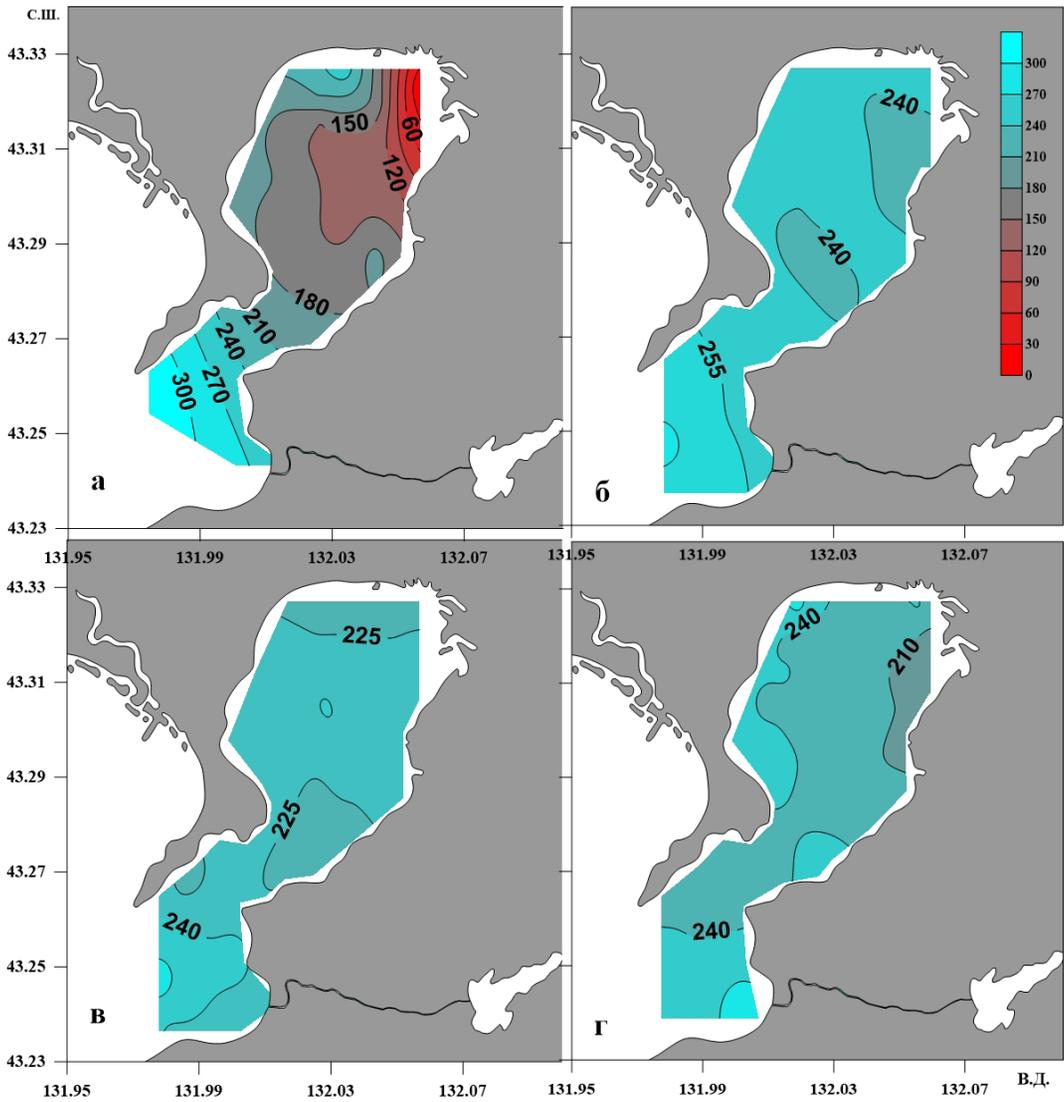


Рис. 6. Распределение концентрации растворенного кислорода (мкмоль/кг) в поверхностных водах зал. Углогового в разные сезоны: а — 25, 26 февраля 2020 г.; б — 13–15 мая 2020 г.; в — 22–24 июня 2020 г.; г — 1–3 октября 2019 г.

Fig. 6. Dissolved oxygen content ( $\mu\text{mol/kg}$ ) at the surface of the Uglovoy Bight, by seasons: а — 25–26 February, 2020; б — 13–15 May, 2020; в — 22–24 June, 2020; г — 1–3 October, 2019

Конечным продуктом фотолиза нитрат- и нитрит-ионов является плохо растворимый газ  $\text{NO}$ , который может удаляться в атмосферу. В средних широтах ( $40^\circ$  с.ш.) время жизни нитрит-иона, обусловленное фотолизом в поверхностных морских водах, составляет 5,3 ч [Zuo, Deng, 1998]. Образовавшийся в результате фотолиза нитрат-иона нитрит (реакция (1)) может при участии бактерий взаимодействовать с ионом аммония в соответствии с известной микробиологической реакцией — ANAMMOX (anoxic ammonium oxidation [Thamdrup, Dalsgaard, 2002]:



Реакции (1)–(4) удаляют из экосистемы активные в биологическом отношении формы азота ( $[\text{NH}_4^+]$ ,  $[\text{NO}_2^-]$ ,  $[\text{NO}_3^-]$ ), что приводит к оздоровлению экосистемы.

Другая естественная реакция экосистемы на поступление биогенных веществ в залив — образование первичной продукции органического вещества микро-

Таблица 1

Географические координаты станций в реках (1 — безымянная-1, 2 — Прохладная, 3 — Аэродромная, 4, 6 — Грязнуха, 5 — Саперка, 7, 8 — Песчанка, 9 — Угольная, 10 — Чистая, 11 — Пятый Ключ, 12 — Весенняя, 13 — безымянная-2, 14 — Богатая, 15 — Черная Речка) и гидрохимические характеристики речных вод\*

Table 1

Location of samplings in the rivers: 1 — bezimyannaya in the north, 2 — Prokhladnaya, 3 — Aerodromnaya, 4, 6 — Gryaznuhka, 5 — Saperka, 7, 8 — Peschanka, 9 — Ugolnaya, 10 — Chistaya, 11 — Pyaty Kluch, 12 — Vesenniyaya, 13 — bezimyannaya in the south, 14 — Bogataya, 15 — Chernaya Rechka) and chemical parameters of the rivers water

Показатель	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
С.ш., °	43,325	43,331	43,334	43,329	43,324	43,331	43,316	43,316	43,308	43,297	43,290	43,278	43,270	43,246	43,229
В.д., °	132,010	132,023	132,048	132,071	132,078	132,066	132,083	132,075	132,067	132,056	132,057	132,043	132,035	132,029	132,003
T, °C	12,6	15,0	13,0	14,6	13,6	9,9	9,6	9,7	9,7	9,6	10,2	9,4	9,5	10,7	8,8
S	1,965	13,695	0,338	6,012	0,337	4,583	0,366	0,774	0,316	0,188	1,653	1,129	0,270	0,412	0,104
[O <sub>2</sub> ]	139,3	276,7	252,6	100,1	24,9	184,8	248,3	224,4	309,9	258,9	204,1	292,8	333,1	232,0	267,0
pH(15)	7,510	7,891	7,505	7,463	7,046	7,694	7,442	7,244	7,419	7,214	7,421	7,814	7,420	7,226	7,081
TA	3,531	2,406	2,833	4,486	4,404	5,307	5,316	3,821	4,284	2,366	2,122	3,815	3,428	1,227	1,135
DIC	3,657	2,295	2,960	4,589	5,200	5,303	5,692	4,212	4,602	2,666	2,227	3,846	3,673	1,357	1,343
PCO <sub>2</sub>	3846,4	762,9	3906,4	4701,4	18031,8	2867,4	7623,7	8019,0	6572,8	6023,7	2690,5	1971,1	5261,3	2942,1	3953,4
DIP	0,51	2,44	1,77	2,28	35,32	2,24	0,32	13,01	3,22	2,23	3,76	2,32	1,33	0,51	1,91
DISi	88,73	53,01	93,26	119,26	282,81	128,15	194,08	204,98	269,56	204,48	224,44	188,54	214,20	180,82	228,80
[NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ]	0,25	2,97	0,22	20,47	0,00	18,03	0,32	0,47	3,73	2,33	3,95	0,82	0,75	0,28	1,18
[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	16,44	53,38	13,80	81,72	0,09	86,58	13,00	11,72	139,54	52,94	67,12	50,33	109,17	20,38	67,97
[NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ]	2,61	49,17	0,15	214,79	128,06	254,09	29,73	219,29	49,75	15,09	42,20	2,62	1,33	7,09	56,13
N <sub>общ</sub>	72,31	178,85	78,97	707,32	940,11	1007,70	62,85	318,00	273,32	142,19	170,63	118,51	177,45	71,05	145,15
P <sub>общ</sub>	1,56	4,58	2,75	4,98	45,36	6,76	0,65	16,03	3,91	2,71	4,72	2,15	1,73	1,09	2,47
DOC	8,59	7,76	8,53	14,93	14,20	17,00	3,47	6,48	5,22	5,56	5,34	6,19	5,76	2,57	4,65
Гумины	3,94	4,12	4,75	6,49	5,43	7,22	2,16	2,78	2,38	2,74	2,43	3,15	3,14	2,64	1,34
Chl a	0,00	2,03	6,63	16,46	4,85	27,26	0,00	6,49	1,96	2,47	2,21	1,95	0,96	1,64	0,55
Phe	3,32	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,22
Chl b	2,85	1,27	2,74	2,14	4,67	4,58	0,82	0,63	0,95	0,66	1,06	0,47	0,27	1,36	0,43

Na <sup>+</sup>	24,42	182,60	2,76	77,92	1,80	58,77	4,85	9,68	1,78	0,98	20,98	13,43	1,50	4,84	0,56
K <sup>+</sup>	0,716	3,958	0,220	2,117	0,219	1,788	0,085	0,253	0,147	0,098	0,521	0,424	0,128	0,155	0,046
Ca <sup>+2</sup>	2,018	4,640	1,045	2,845	1,455	2,336	0,939	0,961	1,777	1,062	1,302	1,703	1,510	0,572	0,490
Mg <sup>+2</sup>	2,678	4,887	2,885	5,396	1,949	5,789	1,973	2,556	3,048	8,039	2,323	2,307	2,345	2,401	4,997
Cl <sup>-</sup>	27,84	212,67	2,95	91,02	1,30	67,98	0,79	8,37	1,43	0,80	24,00	14,78	1,39	5,97	0,46
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	2,146	11,113	0,323	4,841	0,473	3,588	0,902	1,071	0,471	0,322	1,449	0,889	0,364	0,452	0,189

\* S — соленость, ‰; [O<sub>2</sub>] — растворенный кислород, мкмоль/кг; рН(15) — рН, измеренная при 15 °С; TA — общая щелочность, ммоль/кг; DIC — растворенный неорганический углерод, ммоль/кг; PCO<sub>2</sub> — парциальное давление углекислого газа (мкатм); DIP — фосфаты, мкмоль/л; DISi — растворенный кремний, мкмоль/л; [NO<sub>2</sub><sup>-</sup>] — нитриты, мкмоль/л; [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] — нитраты, мкмоль/л; [NH<sub>4</sub><sup>+</sup>] — аммоний, мкмоль/л; N<sup>общ</sup> — общий азот, мкмоль/л; P<sup>общ</sup> — общий фосфор, мкмоль/л; DOC — растворенный органический углерод, мгС/л; гумин — гуминовые вещества, мгС/л; Chl *a* — хлорофилл *a*, мкг/л; Phe — феофетин, мкг/л; Chl *b* — хлорофилл *b*, мкг/л; Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> — концентрации ионов соответственно натрия, калия, кальция, магния, хлорида и сульфата, ммоль/кг.

дорослями и макрофитами. Для каждого сезона наблюдался широкий разброс в концентрациях хлорофилла (табл. 2) от станции к станции, и картина мозаичная. Однако средние концентрации хлорофилла достаточно высокие — 1,7; 0,7; 1,8; 1,8 мкг/л соответственно для февраля, мая, июня и октября. Высокие концентрации общего азота, общего фосфора, хлорофилла *a*, не зависящие от сезона, указывают на высокую интенсивность продукционных и деструкционных процессов. Тот факт, что для всех сезонов значения кажущегося поглощения кислорода положительные (воды залива недосыщены по отношению к атмосферному кислороду), а парциальное давление углекислого газа поверхностных вод больше атмосферного значения (400 мкатм, рис. 8) означает, что деструкционные процессы доминируют над первичной продукцией. Отчасти это можно объяснить тем, что речные воды содержат не только высокие концентрации биогенных веществ, DOC, но также DIC, TA и высокие парциальные давления углекислого газа (см. табл. 1). Но основная причина, на наш взгляд, состоит в том, что деструкция органического вещества доминирует над продукцией благодаря аллохтонному поступлению органического вещества в залив. Другими словами, вследствие поступления канализационных стоков залив становится преимущественно гетеротрофным. Очевидно, что деструкция органического вещества осуществляется не только бактериями, но также фитофагами, прежде всего устрицами (*Crassostrea gigas*), колонии которых были обнаружены нами подводным фотографированием в местах выполнения гидрохимических станций. Их присутствие в зал. Угловом отмечалось в работах В.А. Ракова [1984, 2008]. Необходимо отметить, что физиологическая активность устриц приводит к понижению рН среды, и в аквариумах с этими организмами устанавливается диапазон значений 7,3–7,7 [Раков, 1975]. Средние значения рН поверхностных вод залива были 7,84, 7,80, 7,70 и 7,50 соответственно для февраля, мая, июня и октября, они не сильно отличаются от аквариумных значений. Помимо устриц, подводная видеосъемка регистрировала множество отверстий разного диаметра в местах мягких илов, которые мы рассматриваем как поселения инфуны, также принимающей участие в деструкции органического вещества.

Таблица 2

Диапазон изменений концентраций неорганических форм (мкмоль/л) биогенных веществ (DIN =  $[\text{NH}_4^+] + [\text{NO}_2^-] + [\text{NO}_3^-]$ , [DIP], [DISi]), хлорофилла *a* (мкг/л) и DOC (мгС/л) для разных сезонов

Table 2

Ranges of nutrients concentration (DIN =  $[\text{NH}_4^+] + [\text{NO}_2^-] + [\text{NO}_3^-]$ , DIP, DISi; mmol/L) and concentration of chlorophyll-*a* ( $\mu\text{g/L}$ ) and dissolved organic carbon (DOC; mgC/L), by seasons

Месяц	DIN	[DIP]	[DISi]	Chl	DOC
Февраль	0,2–111,3	0,07–24,80	13,3–156,9	0,51–4,08	2,3–5,0
Май	0,2–6,1	0,06–0,34	21,1–50,6	0,00–1,69	2,2–17,4
Июнь	0,5–29,7	0,34–1,02	34,9–74,1	0,00–14,67	2,5–4,3
Октябрь	0,5–11,8	0,66–1,86	71,0–110,7	0,53–3,59	2,5–3,6

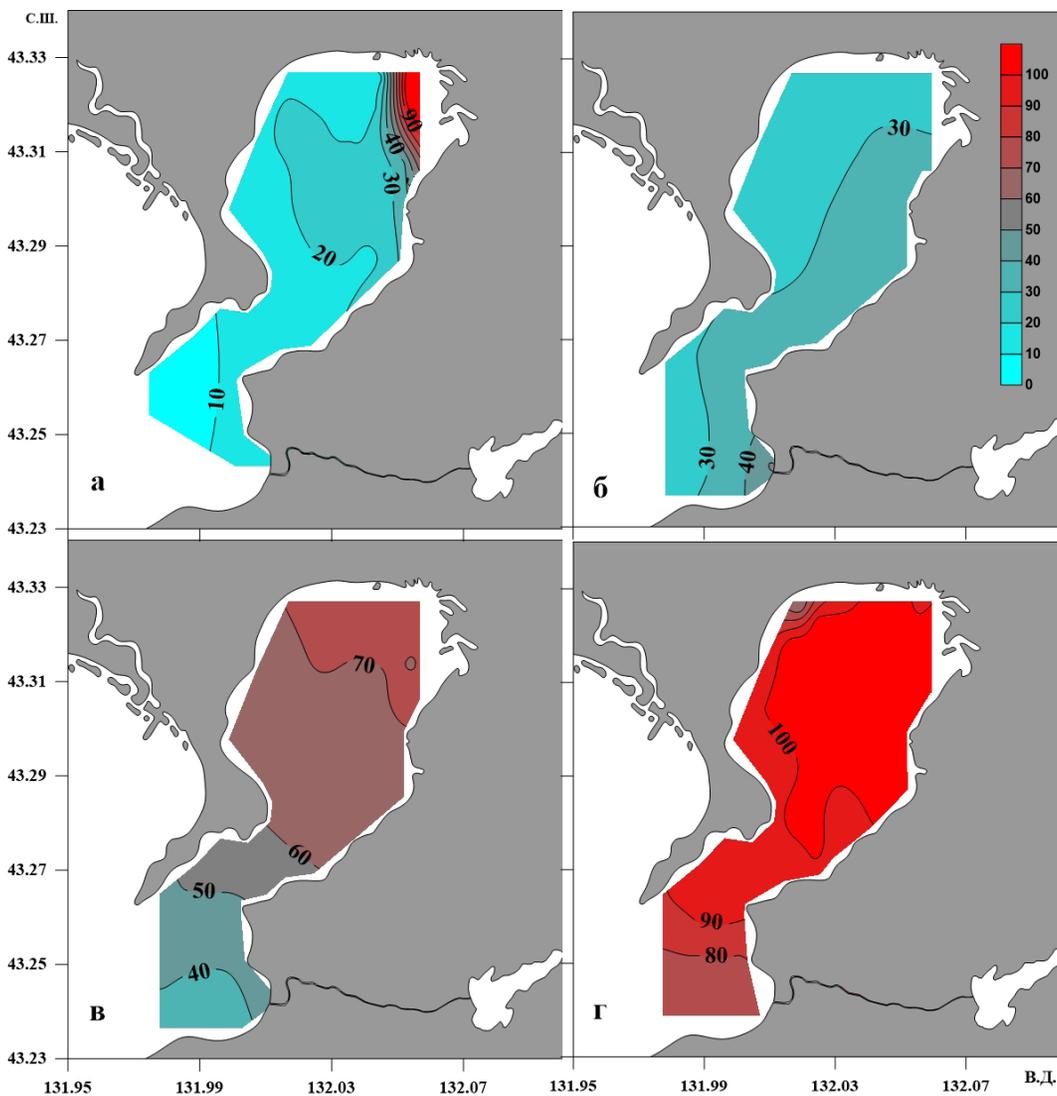


Рис. 7. Распределение концентрации растворенного кремния (мкмоль/л) в поверхностных водах зал. Углового в разные сезоны: а — 25, 26 февраля 2020 г.; б — 13–15 мая 2020 г.; в — 22–24 июня 2020 г.; г — 1–3 октября 2019 г.

Fig. 7. Silicon concentration ( $\mu\text{mol/L}$ ) at the surface of the Uglovoy Bight, by seasons: а — 25–26 February, 2020; б — 13–15 May, 2020; в — 22–24 June, 2020; г — 1–3 October, 2019

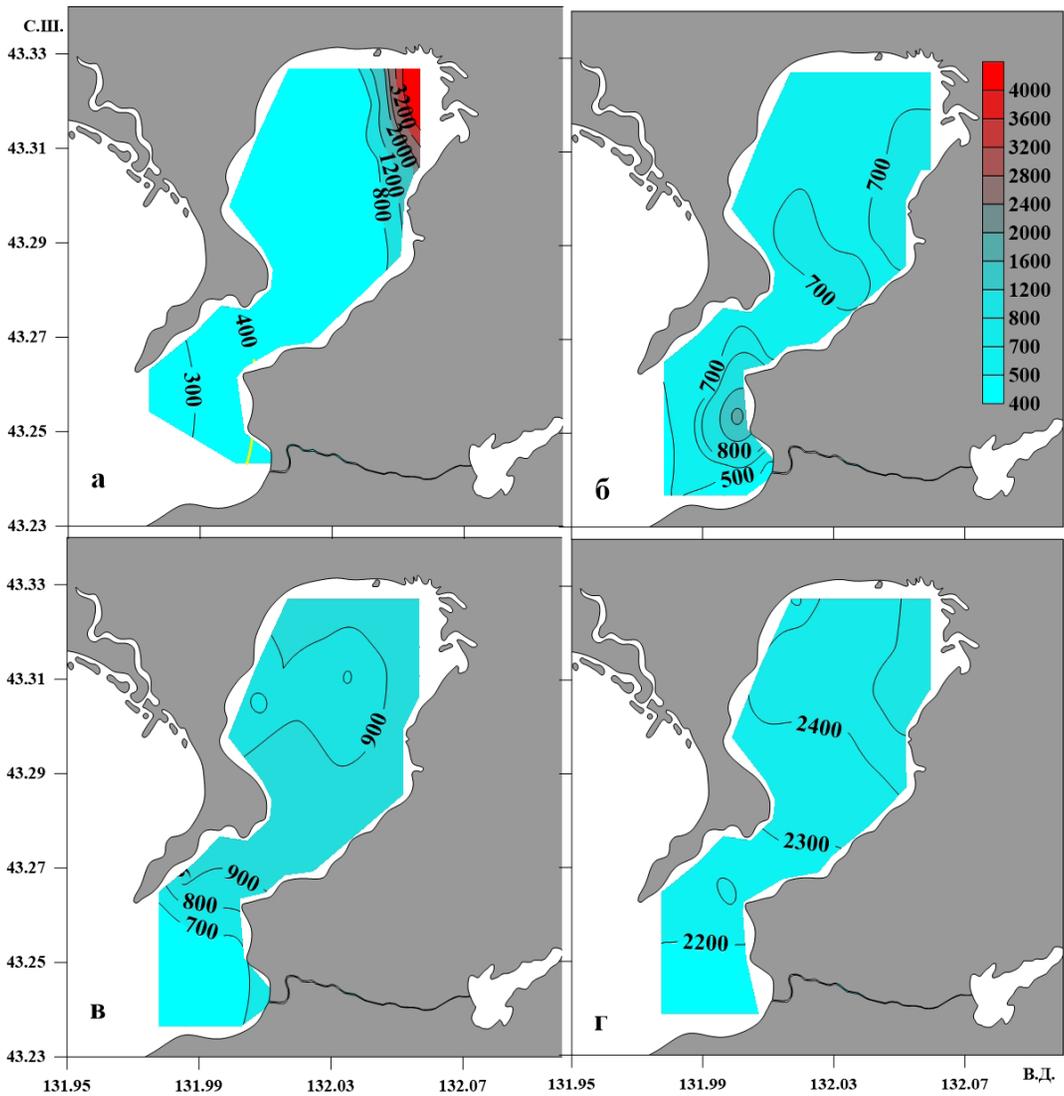


Рис. 8. Распределение парциального давления углекислого газа (мкатм) в поверхностных водах зал. Углогового в разные сезоны: **а** — 25, 26 февраля 2020 г.; **б** — 13–15 мая 2020 г.; **в** — 22–24 июня 2020 г.; **г** — 1–3 октября 2019 г.

Fig. 8. Partial pressure of carbon dioxide ( $\mu\text{atm}$ ) at the surface of the Uglovoy Bight, by seasons: **a** — 25–26 February, 2020; **б** — 13–15 May, 2020; **в** — 22–24 June, 2020; **г** — 1–3 October, 2019

Следует отметить, что не только фитопланктон играет заметную роль в продукции органического вещества в заливе. Измерения глубин видимости диска Секки указывают на то, что, несмотря на высокую мутность залива, фотосинтетически активная радиация достигает дна залива. Действительно, подводные видеосъемки показали, что грунт (камни, обломочный материал) покрыт бахромой разных типов организмов, преимущественно «ржавого» цвета. Профили хлорофилла *a* показали резкое возрастание концентрации хлорофилла у дна (рис. 9, а), т.е. наблюдаемая бахрома — растительные организмы. Следовательно, первичная продукция осуществляется и прикрепленными ко дну растительными организмами, которые также иммобилизуют неорганические формы биогенных веществ в органическое вещество (рис. 9, б). Более того, высокую мутность залива мы связываем прежде всего с органическим веществом (рис. 9, в). В зимний сезон наблюдались красивые ажурные маты, которые лежали на дне залива. Однако в теплый сезон, в результате ветрового

волнения, они частично рвались, образуя хлопья и взмучивая толщу воды. Эти хлопья мы наблюдали при подводной видеосъемке в теплый сезон (осенью).

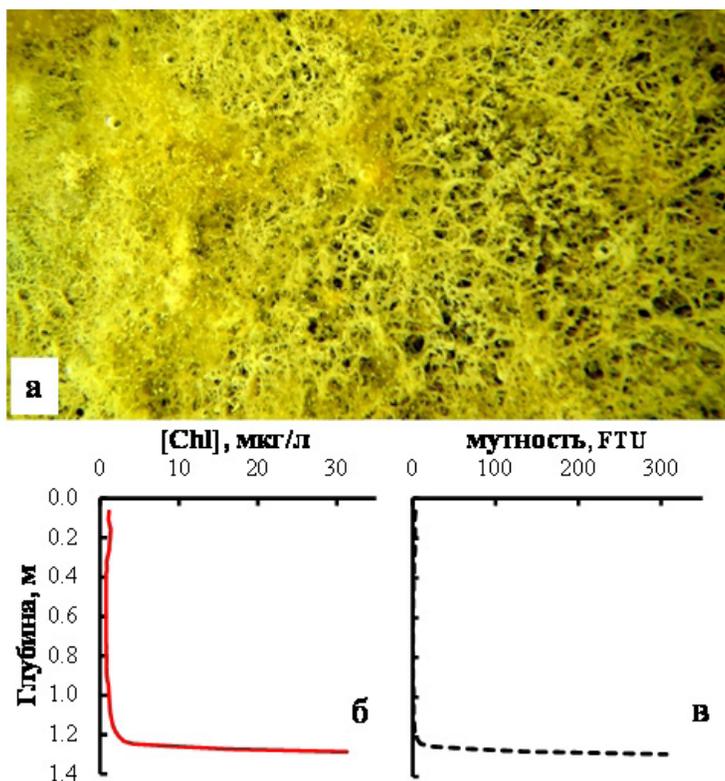


Рис. 9. Перифитон на дне зал. Углогового (а), профили хлорофилла *a* (б) и мутности (в). 14.02.2018 г., 43°18.81' с.ш. 132°01.58' в.д.

Fig. 9. Periphyton on the bottom of the Uglovoy Bight (а); profile of chlorophyll *a* concentration, µg/L (б); profile of turbidity, FTU (в) for the station at 43°18.81' N 132°01.58' E observed on February 14, 2018

Другим важным фактором очищения экосистемы залива от эвтрофикации является водообмен между зал. Угловым и основной частью Амурского залива. Из распределения мутности, концентрации биогенных веществ, парциального давления углекислого газа (см. рис. 3–5, 7, 8) видно, что для всех сезонов существует тенденция к уменьшению этих параметров в направлении горловины залива, а концентрация кислорода увеличивается в этом же направлении. Мы полагаем, что водообмен является чрезвычайно важным фактором самовосстановления залива от канализационных стоков, поступающих в него. Ограничения водообмена гидротехническими сооружениями, установленными в 1982 (дюкер) и 2012 (низководный мост) гг., снизили ассимиляционную емкость залива. Ранее в северной части залива находились луга зостеры морской *Zostera marina* L. площадью 4,9 км<sup>2</sup> [Раков, 2008], в этой части залива вода была недосыщена по отношению к атмосферному углекислому газу, а в юго-восточной части, где были устричники, пересыщена двуокисью углерода [Бычков и др., 1989; Павлова, 2001]. Очевидно, что в результате высокой продуктивности зостеры [McRoy, 1974] происходит извлечение углекислого газа из среды, а устрицы, наоборот, увеличивают скорость деструкции органического вещества, снижают рН [Раков, 1975], что приводит к увеличению парциального давления углекислого газа, именно к такому выводу пришли исследователи ранее [Бычков и др., 1989; Павлова, 2001]. В прошлом заморные явления в зал. Угловом не наблюдались, наоборот, в зимний сезон вода пересыщена по отношению к атмосферному кислороду [Семилетов, 1987]. Подводные видеосъемки,

которые сопровождали гидрохимический отбор проб в октябре 2019 г., феврале и мае 2020 г., не установили полей зостеры в северной части залива. В северной и северо-восточной частях залива вдоль береговой линии наблюдались в небольшом количестве листья травы длиной 20–40 см. На расстоянии 100 м от уреза воды в северной части залива были обнаружены одиночные кусты со стеблями 30–40 см (наблюдения проводились в октябре 2020 г.). Эта часть акватории залива, как и залив в целом, во все сезоны является не поглотителем атмосферного углекислого газа, а, наоборот, его источником, что указывает на существенные изменения состояния экосистемы залива. Исчезновение полей зостеры в зал. Угловом не является уникальным событием, а происходит во многих шельфовых акваториях Мирового океана [Стародубцева, 2011; Шкляревич, 2014; Gustafsson, Boström, 2014]. Существует много причин гибели морских трав, которые широко обсуждаются в литературе [Вехов, 1992; Ralph et al., 2006; Стародубцева, 2011; Gustafsson, Boström, 2014]. Наиболее важными причинами являются, по-видимому, паразитические заболевания [Вехов, 1992; Стародубцева, 2011]. Наряду с этими причинами рассматривается негативный эффект от эвтрофикации акваторий, обусловленный человеческой деятельностью [Ralph et al., 2006], причем отрицательная роль эвтрофикации выражается в том, что она вызывает рост фитопланктона и эпифитона, которые ограничивают проникновение света к листьям зостеры, что приводит к деградации морской травы. Также подчеркивается отрицательная роль мутности, вызванной штормовой погодой, которая способна уничтожить тысячи гектаров морской травы [Ralph et al., 2006]. В отношении зал. Углогого необходимы дальнейшие исследования по установлению причин исчезновения лугов зостеры. Однако сейчас очевидно, что сброс канализационных отходов в залив и ограничение его водообмена гидротехническими сооружениями привели к деградации экосистемы зал. Углогого, которая, на наш взгляд, еще не закончилась. Если не предпринимать практических мер по сокращению сброса канализационных отходов, то дальнейший этап деградации приведет к смене видового состава фитопланктона с диатомей на микроводоросли, способные к гетеротрофному виду питания (динофлагелляты и сине-зеленые).

### **Заключение**

Сезонные гидрохимические исследования зал. Углогого указывают на то, что воды залива эвтрофированы. Главным источником эвтрофикации стали канализационные стоки, которые поступают в реки Саперка, Песчанка и Грязнуха, а затем в залив. Эвтрофикация вод залива обеспечивает высокую интенсивность продукции и деструкции органического вещества. Недосыщенность вод по отношению к кислороду воздуха и пересыщенность по отношению к углекислому газу указывают на то, что деструкция органического вещества доминирует над его продукцией. Из-за строительства гидротехнических сооружений (дюкер, 1982 г., и низководный мост, 2012 г.) водообмен между водами открытой части Амурского залива и зал. Углогого уменьшился, снизив ассимиляционную емкость последнего. Несмотря на эпизодические исследования прошлых лет, следует отметить деградацию экосистемы зал. Углогого. Видимым проявлением этой деградации является исчезновение лугов морских трав, возникновение гипоксических явлений, залив стал источником углекислого газа для атмосферы. Дальнейшая деградация залива возможна в направлении смены видового состава фитопланктона.

### **Финансирование работы**

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, № 20-05-00381-а и программ фундаментальных научных исследований, темы АААА-А17-117030110042-2 и АААА-А17-117030110038-5.

### Соблюдение этических стандартов

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Информация о вкладе авторов

Ю.А. Барабанщиков, Г.Ю. Павлова, А.А. Рюмина, С.Г. Сагалаев, П.Ю. Семкин, П.П. Тищенко, О.А. Уланова, М.Г. Швецова, Е.М. Шкирникова, Е.Ю. Тибенко — сбор данных, анализ и интерпретация полученных результатов, подготовка статьи и окончательное утверждение версии для печати. П.Я. Тищенко — написание статьи, обсуждение полученных результатов, окончательное утверждение версии для печати.

### Список литературы

- Блиновская Я.Ю.** Ландшафтная характеристика и оптимизация природопользования в прибрежно-морской зоне залива Посьета : дис. ... канд. геогр. наук. — Владивосток : ТИГ ДВО РАН, 2001. — 225 с.
- Бычков А.С., Павлова Г.Ю., Кропотов В.А.** Карбонатная система // Химия морской воды и аутигенное минералообразование / под ред. В.И. Ильичева. — М. : Наука, 1989. — С. 49–111.
- Вехов В.Н.** Зостера морская (*Zostera marina* L.) Белого моря : моногр. — М. : МГУ, 1992. — 143 с.
- Лосев О.В.** Анализ источников загрязнения залива Угловой (залив Петра Великого) и факторов его загрязненности // Вестн. ДВО РАН. — 2019. — № 2. — С. 95–103. DOI: 10.25808/08697698.2019.204.2.011.
- Лосева Я.П., Гриванова С.М.** Очистка сточных вод г. Владивостока // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 6. — № 1685.
- Лысенко В.Н.** Продукция макробентоса сообщества *Zostera marina* в северо-западной части Японского моря : дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1985. — 187 с.
- Павлова Г.Ю.** Карбонатная система как индикатор биогеохимических процессов в океане : дис. ... канд. хим. наук. — Владивосток : ТОИ ДВО РАН, 2001. — 159 с.
- Павлова Г.Ю., Тищенко П.Я., Волкова Т.И. и др.** Интеркалибрация метода Бруевича для определения общей щелочности в морской воде // Океанол. — 2008. — Т. 48, № 3. — С. 477–483.
- Паймеева Л.Г.** Биология *Zostera marina* L. и *Zostera asiatica* Miki Приморья : дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток : ТИНРО, 1984. — 185 с.
- Петухов В.И., Петрова Е.А., Лосев О.В.** Загрязнение вод залива Углового тяжелыми металлами и нефтепродуктами в феврале 2010–2016 гг. // Вод. ресурсы. — 2019. — Т. 46, № 1. — С. 102–113. DOI: 10.31857/S0321-0596461102-113.
- Раков В.А.** Биологические основы культивирования тихоокеанской устрицы *Crassostrea gigas* (Thunberg) в заливе Петра Великого : дис. ... канд. биол. наук. — Владивосток : ТИНРО, 1984. — 187 с.
- Раков В.А.** Изменение активной реакции (рН) среды тихоокеанской устрицей // Изв. ТИНРО. — 1975. — Т. 98. — С. 239–243.
- Раков В.А.** Распространение и экология устричных рифов северной части Амурского залива // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. — М. : ГЕОС, 2008. — С. 278–291.
- Семилетов И.П.** О сезонной изменчивости содержания углеводородных газов и кислорода в заливе Угловом // Тр. ДВНИГМИ. — 1987. — Вып. 131. — С. 80–84.
- Стародубцева А.А.** Экология, физиология и продуктивность зостеры морской *Zostera marina* L. на Белом море : дис. ... канд. биол. наук. — Петрозаводск : ПетрГУ, 2011. — 180 с.
- Супранович Т.И., Якунин Л.П.** Гидрология залива Петра Великого : Тр. ДВНИГМИ. — Л. : Гидрометеиздат, 1976. — Вып. 22. — 198 с.
- Тищенко П.Я., Медведев Е.В., Барабанщиков Ю.А. и др.** Органический углерод и карбонатная система в донных отложениях мелководных бухт залива Петра Великого (Японское море) // Геохимия. — 2020. — Т. 65, № 6. — С. 583–598. DOI: 10.31857/S001675252005012X.
- Тищенко П.Я., Тищенко П.П., Звалинский В.И. и др.** Карбонатная система Амурского залива (Японское море) летом 2005 г. // Изв. ТИНРО. — 2006. — Т. 146. — С. 235–255.

- Шкляревич Г.А.** Восстановление зарослей *Zostera marina* L. в Кандалакшском заливе Белого моря // Уч. зап. Петрозавод. гос. ун-та. — 2014. — № 4. — С. 13–18.
- Carpenter J.H.** The Chesapeake Bay Institute technique for the Winkler dissolved oxygen method // *Limnol. Oceanogr.* — 1965. — Vol. 10, Iss. 1. — P. 141–143.
- Duarte C.M., Kennedy H., Marba N., and Hendriks I.** Assessing the capacity of seagrass meadows for carbon burial: Current limitations and future strategies // *Ocean Coast. Man.* — 2013. — Vol. 83. — P. 32–38. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2011.09.001.
- Grasshoff K., Ehrhardt M., Kremling K. (eds)** *Methods of Seawater Analysis.* — Weinheim/Deerfield Beach, Florida : Verlag Chemie, 1983. — 419 p.
- Gustafsson C., Boström C.** Algal mats reduce eelgrass (*Zostera marina* L.) growth in mixed and monospecific meadows // *J. Exper. Mar. Bio. Ecol.* — 2014. — Vol. 461. — P. 85–92. DOI: 10.1016/j.jembe.2014.07.020.
- Howard J., Hoyt S., Isensee K. et al. (eds)** *Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses.* — Arlington, Virginia, USA : Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature, 2014. — 180 p.
- McRoy C.P.** Seagrass productivity: carbon uptake experiments in eelgrass, *Zostera marina* // *Aquaculture.* — 1974. — Vol. 4. — P. 131–137.
- Nellemann C., Corcoran E., Duarte C.M. et al. (eds)** *Blue Carbon. A Rapid Response Assessment.* — GRID-Arendal : United Nations Environment Programme, 2009.
- Ralph P.J., Tomasko D., Moore K., et al.** Human Impacts on Seagrasses: Eutrophication, Sedimentation and Contamination // *Seagrasses: Biology, ecology and conservation.* — Springer, Dordrecht, 2006. — P. 567–593. DOI: 10.1007/978-1-4020-2983-7\_24.
- Sarthou G., Timmermans K.R., Blain S., Tréguer P.** Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: a review // *J. Sea Res.* — 2005. — Vol. 53. — P. 25–42. DOI: 10.1016/j.seares.2004.01.007.
- Spokes L.J., Liss P.S.** Photochemically induced redox reactions in seawater, II. Nitrogen and iodine // *Mar. Chem.* — 1996. — Vol. 54, Iss. 1–2. — P. 1–10. DOI: 10.1016/0304-4203(96)00033-3.
- Thamdrup B., Dalsgaard T.** Production of  $N_2$  through anaerobic ammonium oxidation coupled to nitrate reduction in marine sediments // *Appl. Environ. Microbiol.* — 2002. — Vol. 68(3). — P. 1312–1318. DOI: 10.1128/AEM.68.3.1312-1318.2002.
- Zafiriou O.C., True M.B.** Nitrite photolysis in seawater by sunlight // *Mar. Chem.* — 1979a. — Vol. 8, Iss. 1. — P. 9–32. DOI: 10.1016/0304-4203(79)90029-X.
- Zafiriou O.C., True M.B.** Nitrate photolysis in seawater by sunlight // *Mar. Chem.* — 1979b. — Vol. 8, Iss. 1. — P. 33–42. DOI: 10.1016/0304-4203(79)90030-6.
- Zuo Y., Deng Y.** The near-UV absorption constants for nitrite ion in aqueous solution // *Chemosphere.* — 1998. — Vol. 36, Iss. 1. — P. 181–188. DOI: 10.1016/S0045-6535(97)10028-5.

## References

- Blinovskaya, Y.Yu.,** Landscape characteristics and optimization of nature management in the coastal-marine zone of Posyet Bay, *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*, Vladivostok: Tikhookean. Inst. Geogr. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2001.
- Bychkov, A.S., Pavlova, G.Yu., and Kropotov, V.A.,** Carbonate system, in *Khimiya morskoy vody i autigennoye mineraloobrazovaniye* (Chemistry of sea water and authigenic mineral formation), V.I. Ilyichev, ed., Moscow: Nauka, 1989, pp. 49–111.
- Vekhov, V.N.,** *Zostera morskaya (Zostera marina L.) Belogo morya (Sea zostera (Zostera marina L.) of the White Sea)*, Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1992.
- Losev, O.V.,** Analysis of pollution sources of the Uglovoy Bay (Peter the Great Bay) and its pollution factors, *Vestn. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2019, no. 2, pp. 95–103, doi 10.25808/08697698.2019.204.2.011
- Loseva, Ya.P. and Grivanova, S.M.,** Sewage treatment of the city of Vladivostok, Modern problems of science and education, 2014, no. 6, no. 1685.
- Lysenko, V.N.,** Macroenthos production of the *Zostera marina* community in the northwestern part of the Sea of Japan, *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Vladivostok: Dal'nevost. Nauchn. Tsentr, Akad. Nauk SSSR, 1985.
- Pavlova, G.Yu.,** The carbonate system as an indicator of biogeochemical processes in the ocean, *Cand. Sci. (Chem.) Dissertation*, Vladivostok: Tikhookean. Okeanolog. Inst. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2001.

**Pavlova, G.Yu., Tishchenko, P.Ya., Volkova, T.I., Dickson, A., and Wallmann, K.,** Intercalibration of Bruevich's method to determine the total alkalinity in seawater, *Oceanology*, 2008, vol. 48, no. 3, pp. 438–443.

**Paymeeva, L.G.,** Biology of *Zostera marina* L. and *Zostera asiatica* Miki of Primorye, *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Vladivostok: Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr., 1984.

**Petukhov, V.I., Losev, O.V., and Petrova, E.A.,** Water pollution by heavy metals and oil products in Uglovoi Bay in February 2010–2016, *Water Resources*, 2019, vol. 46, no. 1, pp. 103–111, doi 10.31857/S0321-0596461102-113

**Rakov, V.A.,** Biological bases of cultivation of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg) in Peter the Great Bay, *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Vladivostok: Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr., 1984.

**Rakov, V.A.,** Effects of the Pacific oyster on the change of pH of the water, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1975, vol. 98, pp. 239–243.

**Rakov, V.A.,** Distribution and ecology of oyster reefs in the northern part of the Amur Bay, 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. 278–291.

**Semiletov, I.P.,** Seasonal variability of the content of hydrocarbon gases and oxygen in the Uglovoe Bay, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, 1987, vol. 131, pp. 80–84.

**Starodubtseva, A.A.,** Ecology, physiology and productivity of *Zostera marina* L. on the White Sea, *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*, Petrozavodsk: Petrozavodsk. Gos. Univ., 2011.

**Supranovich, T.I. and Yakunin, L.P.,** Hydrology of Peter the Great Bay, *Tr. Dal'nevost. Nauchno-Issled. Gidrometeorol. Inst.*, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976, no. 22.

**Tishchenko, P.Ya., Medvedev, E.V., Barabanshchikov, Yu.A., Pavlova, G.Yu., Sagalaev, S.G., Tishchenko, P.P., Shvetsova, M.G., Shkirknikova, E.M., Ulanova, O.A., Tibenko E.Yu., and Orekhova, N.A.,** Organic carbon and carbonate system in bottom sediments of shallow bays of Peter the Great Bay (Sea of Japan), *Geochem. Int.*, 2020, vol. 65, no. 6, pp. 583–598, doi 10.31857/S001675252005012X

**Tishchenko, P.Ya., Tishchenko, P.P., Zvalinsky, V.I., Shkirknikova, E.M., Chichkin, R.V., and Lobanov, V.B.,** Carbonate system of the Amur Bay (Japan Sea) in summer 2005, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2006, vol. 146, pp. 235–255.

**Shklyarevich, G.A.,** Ecoverry of *Zostera marina* L. thickets in Kandalaksha Bay, White Sea, *Uch. Zap. Petrozavod. Gos. Univ.*, 1972, vol. 60, pp. 27–35.

**Carpenter, J.H.,** The Chesapeake Bay Institute technique for the Winkler dissolved oxygen method, *Limnol. Oceanogr.*, 1965, vol. 10, no. 1, pp. 141–143.

**Duarte, C.M., Kennedy, H., Marba, N., and Hendriks I.,** Assessing the capacity of seagrass meadows for carbon burial: Current limitations and future strategies, *Ocean Coast. Man.*, 2013, vol. 83, pp. 32–38, doi 10.1016/j.ocecoaman.2011.09.001

**Grasshoff, K., Ehrhardt, M., and Kremling, K. (eds),** *Methods of Seawater Analysis*, Weinheim/Deerfield Beach, Florida: Verlag Chemie, 1983.

**Gustafsson, C. and Boström, C.,** Algal mats reduce eelgrass (*Zostera marina* L.) growth in mixed and monospecific meadows, *J. Exper. Mar. Bio. Ecol.*, 2014, vol. 461, pp. 85–92, doi 10.1016/j.jembe.2014.07.020

**Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., and Pidgeon, E. (eds),** *Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses*, Arlington, Virginia, USA: Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature, 2014.

**McRoy, C.P.,** Seagrass productivity: carbon uptake experiments in eelgrass, *Zostera marina*, *Aquaculture*, 1974, vol. 4, pp. 131–137.

**Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C.M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L., and Grimsditch, G. (eds),** *Blue Carbon. A Rapid Response Assessment*, GRID-Arendal: United Nations Environment Programme, 2009.

**Ralph, P.J., Tomasko, D., Moore, K., Seddon, S., and Macinnis-Ng, C.M.,** Human Impacts on Seagrasses: Eutrophication, Sedimentation, and Contamination, in *Seagrasses: biology, ecology and conservation*, Springer, Dordrecht, 2007, doi 10.1007/978-1-4020-2983-7\_24

**Sarthou, G., Timmermans, K., Blain, S., and Tréguer, P.,** Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: A review, *Journal of Sea Research*, 2005, vol. 53, pp. 25–42, doi 10.1016/j.seares.2004.01.007

**Spokes, L.J. and Liss, P.S.**, Photochemically induced redox reactions in seawater, II. Nitrogen and iodine, *Mar. Chem.*, 1996, vol. 54, nos 1–2, pp. 1–10, doi 10.1016/0304-4203(96)00033-3

**Thamdrup, B. and Dalsgaard, T.**, Production of  $N_2$  through anaerobic ammonium oxidation coupled to nitrate reduction in marine sediments, *Appl. Environ. Microbiol.*, 2002, vol. 68, no. 3, pp. 1312–1318, doi 10.1128/AEM.68.3.1312-1318.2002

**Zafiriou, O.C. and True, M.B.**, Nitrite photolysis in seawater by sunlight, *Mar. Chem.*, 1979, vol. 8, no. 1, pp. 9–32, doi 10.1016/0304-4203(79)90029-X

**Zafiriou, O.C. and True, M.B.**, Nitrate photolysis in seawater by sunlight, *Mar. Chem.*, 1979, vol. 8, no. 1, pp. 33–42, doi 10.1016/0304-4203(79)90030-6

**Zuo, Y. and Deng, Y.**, The near-UV absorption constants for nitrite ion in aqueous solution, *Chemosphere*, 1998, vol. 36, no. 1, pp. 181–188, doi 10.1016/S0045-6535(97)10028-5

**Lotsiya severo-zapadnogo berega Yaponskogo morya. Ot reki Tumannaya do mysa Belkina** (Northwestern Sea of Japan Coast Pilot. From the Tumen River to Cape Belkin), St. Petersburg: Gl. Upr. Navig. Okeanogr. Minist. Oborony, 1996, no. 1401.

*Поступила в редакцию 10.12.2020 г.*

*После доработки 27.01.2021 г.*

*Принята к публикации 26.02.2021 г.*