

Особенности сезонной изменчивости гидрологического режима бухты Новик (остров Русский, залив Петра Великого, Японское море)

А. Ю. Лазарюк ^{1,✉}, Т. Р. Кильматов ^{2,3}, Е. Н. Марьина ¹,
Е. В. Кустова ¹

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия

² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

³ Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Россия

✉ lazaryuk@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 17.05.2021 г., после доработки – 04.06.2021 г.

Цель. Цель настоящей работы – исследование гидрологического режима бухты Новик (о. Русский, залив Петра Великого, Японское море).

Методы и результаты. В работе используются данные судовых и ледовых гидрологических наблюдений в бухте Новик и прилегающей части акватории Амурского залива, которые регулярно осуществлялись с 2013 по 2018 г. Профилирование водной толщи выполнено автономными CTD-зондами (более 1000 станций). Погодные условия в исследуемом районе анализируются по архиву срочных данных метеостанции Владивосток-гора (WMO_ID=31960). Представлены количественные оценки дрейфовых и градиентных течений в бухте Новик.

Выводы. Сезонные изменения термохалинной стратификации прибрежных вод залива Петра Великого определяются особенностями муссонного климата. На гидрологический режим бухты Новик оказывают дополнительное влияние ее изолированность и мелководность, а также рельеф острова. В период летнего муссона с апреля по август отмечается слабая динамика вод бухты из-за блокировки южных ветров сопками. Осенне-зимний муссон при доминирующих северных ветрах создает нагон вод в бухту и «запирает» ее воды, особенно в кутовой части. В зимний сезон ледяной покров в бухте формируется преимущественно во время холодных вторжений, вызванных Сибирским антициклоном. Рост льда приводит к охлаждению и осолонению слоя воды. В мелководной южной части бухты Новик, где образуется первый лед, водная толща уплотняется быстрее и вследствие градиента давления формируется поток, направленный по рельефу дна на север к выходу из бухты. Вынос высокосоленных вод в придонном слое за пределы бухты компенсируется встречным потоком более свежих вод Амурского залива, поступающих в ее верхний подледный слой. Период ледостава наиболее благоприятен для обновления вод. На эффективность процесса самоочистения бухты Новик оказывают дополнительное влияние тепловой поток от донных осадков и ледовая обстановка на прилегающих акваториях залива Петра Великого.

Ключевые слова: бухта Новик, Амурский залив, залив Петра Великого, гидрологический режим, циркуляция, CTD-данные, морской лед

Благодарности: авторы признательны д. б. н., проф. Н. К. Христофоровой за критический просмотр рукописи и ценные рекомендации. Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 121021700346-7 «Исследование основных процессов, определяющих состояние и изменчивость океанологических характеристик окраинных морей Азии и прилегающих районов Тихого и Индийского океанов».

Для цитирования: Особенности сезонной изменчивости гидрологического режима бухты Новик (остров Русский, залив Петра Великого, Японское море) / А. Ю. Лазарюк [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 6. С. 680–695. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-680-695

Seasonal Features of the Novik Bay Hydrological Regime (Rusky Island, Peter the Great Bay, Sea of Japan)

A. Yu. Lazaryuk ^{1,✉}, T. R. Kilmатов ^{2,3}, E. N. Marina ¹, E. V. Kustova ¹

¹ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

² Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

³ Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia

✉ lazaryuk@poi.dvo.ru

Purpose. The paper is aimed at studying the hydrological regime of the Novik Bay (Rusky Island, Peter the Great Bay, Sea of Japan).

Methods and Results. Regular ship and ice cover CTD observations (more 1000 water column profiling stations) carried out in the Novik and Amur bays in 2013–2018 were used. Weather conditions in the region under study were analyzed based on the data of the Vladivostok weather station archive (WMO_ID=31960). Quantitative estimates of the drift and gradient currents in the bay are represented.

Conclusions. Seasonal changes in the thermohaline stratification of the Peter the Great Bay coastal waters are conditioned by the monsoon climate features. The Novik Bay hydrological regime is additionally affected by its isolation and shallowness, as well as by the Rusky Island relief. Weak water dynamics in the bay is observed during the summer monsoon (April – August) that is a result of the south winds blocking by the hills. The autumn-winter monsoon (when the north winds dominate) induces the water surge to the bay that, in its turn, blocks its circulation. The winter Siberian cold anticyclone forms the ice cover in the bay, and just in such an ice-forming season the salinity increase in the bottom layer is observed. In the shallow southern part of the Novik Bay, the process of ice formation begins. The downwelling flow of salty heavy water directed to the north out of the bay along the bottom relief is compensated by the counter flow of fresh waters from the Amur Bay which inflow to the upper sub-ice layer. The freeze-up period is most favorable for water renewal. The efficiency of this process is additionally influenced by a heat flow from bottom sediments and by the ice conditions in the adjacent water areas of the Peter the Great Bay.

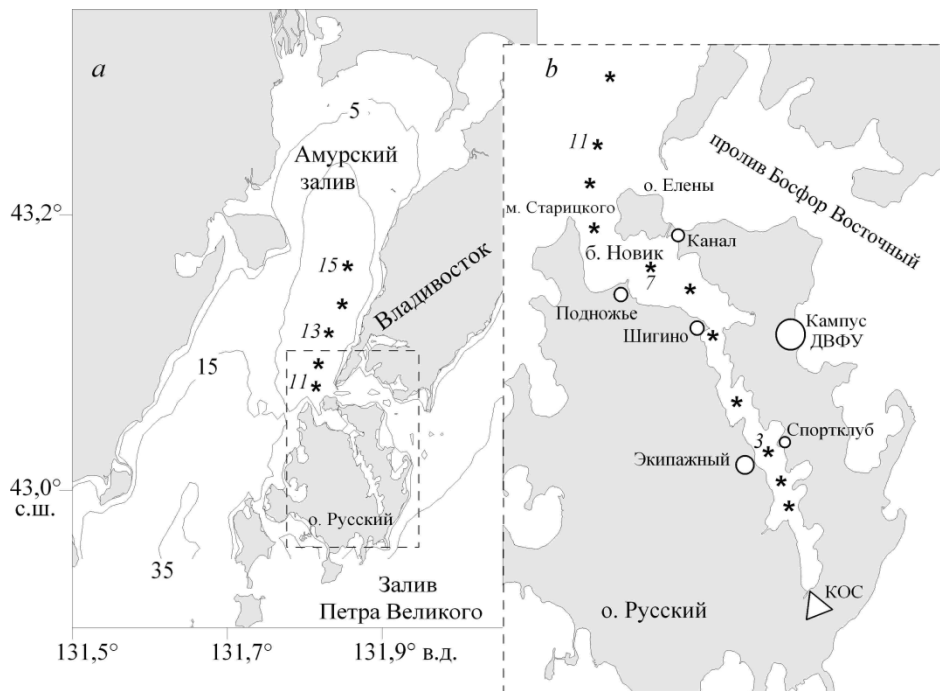
Keywords: Novik Bay, Amur Bay, Peter the Great Bay, hydrological regime, circulation, CTD data, sea ice cover

Acknowledgements: the authors are grateful to Dr. Sci. (biol.), Professor N. K. Khristoforova for her critical review of the manuscript and valuable recommendations. The work was carried out within the framework of the state budget theme No. 121021700346-7 “Investigation of the main processes determining state and variability of oceanological characteristics of the marginal seas of Asia and the adjacent regions of the Pacific and Indian Oceans”.

For citation: Lazaryuk, A.Yu, Kilmатов, T.R., Marina, E.N. and Kustova, E.V., 2021. Seasonal Features of the Novik Bay Hydrological Regime (Rusky Island, Peter the Great Bay, Sea of Japan). *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(6), pp. 632-646. doi:10.22449/1573-160X-2021-6-632-646

Введение. Интенсивное развитие городской инфраструктуры Владивостока привело к активизации освоения островной территории о. Русского и увеличению антропогенной нагрузки на прилегающие акватории залива Петра Великого. Экологическая проблема особенно актуальна для входящих в состав Амурского залива закрытых бухт, из которых расположением и рельефом выделяется б. Новик. Ее акватория глубоко, на 12 км, вдается в остров Русский и по форме напоминает узкий фьорд шириной около 1 км со средними глубинами 10–12 м

(рис. 1). В бухте, закрытой практически со всех сторон сопками, отсутствует интенсивное волнение, что благоприятствовало ее эксплуатации военно-морским флотом в течение длительного времени. Особый статус этой территории прекратился в 1993 г., с этого момента появилась возможность проведения научных исследований в бухте Новик.



Р и с. 1. Район работ: Амурский залив, бухта Новик (выделенная прямоугольная область) (a); укрупненное изображение выделенной области (b). Цифрами со звездочками показано расположение выполненных в 2013–2018 гг. судовых гидрологических станций на осевом разрезе *NA* в Амурском заливе и в бухте Новик, треугольником – положение канализационных очистных сооружений (КОС) кампуса ДВФУ; изобаты проведены для 5, 15 и 35 м

F i g. 1. Region under study: Amur Bay, Novik Bay (the marked rectangular area) (a); the enlarged image of the marked area (b). Numbers with asterisks indicate location of the ship hydrological stations at the axial section *NA* in the Amur and Novik bays (2013–2018), triangle – location of the sewage treatment plants (STP) of the FEFU campus; isobaths are for 5, 15 and 35 m

К числу первых исследований можно отнести оценку экологического состояния акватории и выяснение условий разведения беспозвоночных в бухте [1–4]. В химико-экологических обследованиях отмечалась сезонная изменчивость концентрации растворенного кислорода: дефицит летом и рост его содержания в период осенне-зимнего муссона, когда усиливается ветер северных направлений. Зимой подо льдом устанавливаются приемлемые для гидробионтов гидрхимические условия [3].

Важным фактором, влияющим на экологическое состояние бухты Новик, является сезонная гипоксия в прилегающих водах северной части Амурского залива и проливе Босфор Восточный [5, 6], которой, очевидно, объясняется отмеченное в работе [3] весенне-летнее ухудшение кислородных показателей во

входной части бухты. Сложность термогидродинамического режима этого района залива Петра Великого, снабжающего б. Новик свежими водами, обсуждалась подробно в ряде работ [7–12]. В целом надо отметить, что обновление вод в заливе Петра Великого наиболее интенсивно происходит в период осенне-зимнего муссона благодаря выхолаживанию и подъему глубинных вод Японского моря [11]. Вклад приливов в процессы циркуляции вод исследуемого района [9] на фоне муссонных ветров незначителен.

В связи с этим важно было уточнить и понять причины и особенности сезонной изменчивости гидрологических характеристик как непосредственно в бухте, так и в прилегающих водах, что и явилось целью настоящей работы.

Район работ, материалы и методы. Натурные наблюдения в б. Новик и прилегающей акватории Амурского залива осуществлялись регулярно с января 2013 г. по март 2018 г. и эпизодически (на отдельных станциях) в феврале 2019 и 2020 гг. Всего выполнено более 1000 гидрологических станций. В летний период работы выполнялись с бортов НИС «Атлас» и «Малахит», в зимний период – со льда. Распределение станций по сезонам неравномерное, 80 % приходится на работы с ледяного покрова. Расположение судовых станций на продольном осевом разрезе бухта Новик – Амурский залив (разрезе *NA*) представлено на рис. 1.

Зимой наблюдения на станциях разреза *NA* производились только в б. Новик (выполнению работ со льда в Амурском заливе препятствовали сплошные поля торосов и регулярные проходы судов). Зимние гидрологические съемки в б. Новик, помимо измерений на станциях осевого разреза, включали до 30 дополнительных точек наблюдений, в том числе расположенных на 2–4 поперечных разрезах (Спортклуб – пос. Экипажный, пос. Канал – пос. Подножье и др.). С ноября 2016 г. по март 2018 г. в б. Новик осуществлялся непрерывный цикл еженедельных наблюдений, при отсутствии судового обеспечения использовались причальные стенки пос. Канал (глубина 6 м) и спортклуба о. Русского (глубина 4 м).

Гидрологические параметры измерялись автономными *CTD*-зондами: *XR-620* (*Richard Branker Research Ltd.*, Канада), *ASTD102* (*JFE Advantech Co. Ltd.*, Япония) и *SBE 19plus* (*Sea-Bird Electronics, Inc.*, США). Поверка приборов осуществлялась на лабораторной установке ФГУП «ТИНРО-Центр», регулярно проводились эксперименты по интеркалибровке *CTD*-зондов в натуральных условиях. Первичная обработка данных *CTD*-зондирований выполнена с применением оригинальных программных продуктов *. Сформированный за период наблюдений массив однородных данных содержит профили температуры и солёности с разрешением по глубине 0,5 м, а их величины определены с точностью не хуже $\pm 0,003$ °C, $\pm 0,005$ *psu* (англ. *practical salinity unit* – «единица практической солёности») и $\pm 0,05$ м соответственно. В зимний период гидрологические работы включали также замеры толщины ледяного покрова с помощью мерной линейки (точность $\pm 0,5$ см).

* Лазарюк А. Ю., Кошелева А. В. Коррекция данных глубоководных гидрологических наблюдений *CTD*-зондов («*CTD-data_Processing*») [Электронный ресурс]. Электрон. дан. и прогр. Владивосток : ТОИ ДВО РАН, 2014. № гос. регистрации RU2014619779.

Координаты гидрологических станций определялись по навигатору *Garmin eTrex*. Погодные условия анализировались по архиву метеоданных WMO_ID=31960 **, который содержит непрерывные ряды срочных (восемь раз в сутки) наблюдений на метеостанции Владивосток-гора начиная с февраля 2005 г.

Результаты и их обсуждение. Для Японского моря и его прибрежных районов, включая залив Петра Великого, характерен муссонный климат: весной и летом – морской влажный воздух при южных ветрах, осенью и зимой – сухой континентальный воздух при ветрах северных направлений. Повторяемости направления ветра, рассчитанные по рядам срочных наблюдений на метеостанции Владивосток-гора с января 2011 г. по декабрь 2020 г. (рис. 2, *a, b*), характеризуются двумя узкими секторами доминирующих направлений. Ветер С-СЗ румбов преобладал с октября (44 %) по март (51 %) с максимальной долей в январе (80 %), а Ю-ЮВ – с апреля (43 %) по август (58 %) при 70%-ной повторяемости в июле. Усредненные значения модуля средней скорости ветра по выделенным направлениям, С-СЗ и Ю-ЮВ, находились в равных пределах: от 6,0 м/с в марте и июне до 6,7 м/с в январе и апреле.

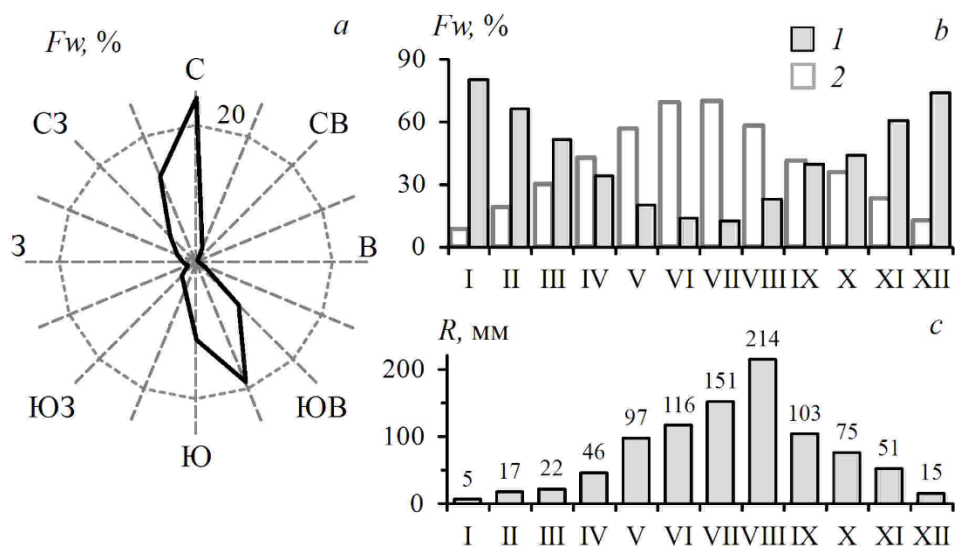


Рис. 2. Повторяемости направлений ветра F_w (*a*), установленные по срочным наблюдениям; средние ежемесячные сумма F_w по секторам С-СЗ (1), Ю-ЮВ (2) (*b*) и объем выпавших осадков R (*c*) по данным архива WMO_ID=31960 за 2011–2020 гг. **

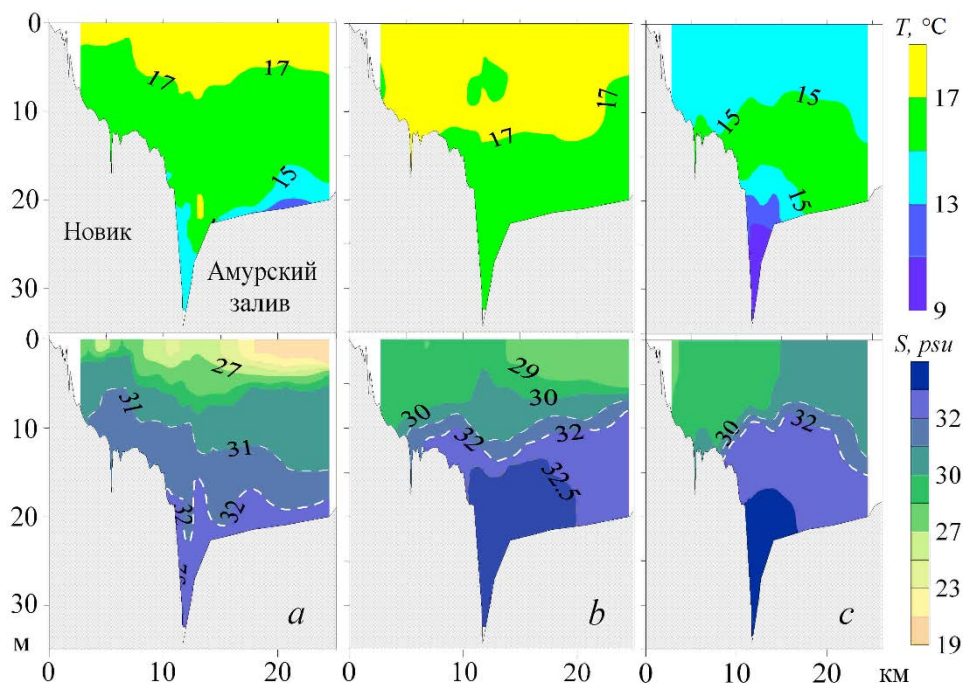
Fig. 2. Frequencies of the wind directions (F_w) (*a*) derived from standard observations; monthly averages of wind direction F_w for the N-NW (1), S-SE (2) sectors (*b*) and monthly averages of total precipitation R (*c*) based on the weather data archive, WMO_ID=31960 (2011–2020) **

** Архив погоды г. Владивосток [Электронный ресурс] : сайт. Владивосток, 2021. URL: https://гп5.ru/Архив_погоды_во_Владивостоке (дата обращения: 20.10.2021).

За указанный десятилетний период среднегодовое количество выпавших осадков составило 912 мм/год, причем на летние три месяца приходится более половины этой величины – 481 мм (рис. 2, *c*). Основным источником осадков являются тропические циклоны, выход которых на южные районы Приморья происходит в июле – августе.

Однако даже при обильных осадках наблюдается незначительное опреснение поверхностного слоя б. Новик, прежде всего из-за малой площади водосбора (отношение площади зеркала водной поверхности бухты к территории водосбора 1:4). В этот период в северной части бухты отмечается поступление вод с пониженной соленостью из Амурского залива, имеющего больший водосбор (1:40 по данным работы [5]). В летний сезон поверхностный слой (0–5 м) вод примыкающей к заливу северной, входной, части бухты характеризуется большей опресненностью по отношению к южной, кутовой (граница раздела между выделенными частями – пос. Шигино, см. рис. 1, *b*). В среднем перепад солености между северной и южной частями бухты в теплый период года достигает 1,5 *psu*. Величина может возрастать в два-три раза при обильных осадках в случаях выхода тропических циклонов на южные районы Приморья.

Представленное на рис. 3, *a* распределение термохалинных параметров на разрезе *NA*, полученное 8 сентября 2016 г., иллюстрирует эффект, вызванный паводком на реках Раздольной и Амбе, сформированным тайфуном «Лайонрок» (суммарное количество выпавших осадков в предшествующий период, с 30 августа по 1 сентября, превысило 120 мм **).



Р и с. 3. Температура (T) и соленость (S) на осевом разрезе *NA*, измеренные зондом *XR-620* 8 сентября (*a*), 29 сентября (*b*) и 11 октября (*c*) 2016 г.

Fig. 3. Temperature (T) and salinity (S) at the axial section *NA* measured by the *XR-620* probe on September, 8 (*a*), September, 29 (*b*) and October, 11 (*c*), 2016

Из последующих серий наблюдений, выполненных на осевом разрезе *NA* в 2016 г. (рис. 3, *b*, *c*), следует, что в начале осенне-зимнего муссона поверхностный опресненный слой в Амурском заливе, сформированный речным паводком, исчезает и соленость в северной части бухты Новик повышается, принимая значения солености вод прилегающей акватории залива. В то же время соленость вод ктовой части бухты, наоборот, понижается. Так, согласно представленным данным, за период с 8 сентября по 11 октября 2016 г. интегральная величина солености в слое 0–10 м в б. Новик понизилась на 0,5 *psu* от 30 до 29,5 *psu*, а в Амурском заливе повысилась от 28 до 30,5 *psu*.

Таким образом, по приведенной динамике солености легко представить картину влияния северного муссона на исследуемую часть акватории залива Петра Великого. Одновременно в Амурском заливе наблюдаются стгонные эффекты [8, 10], влияние апвеллинга [11], которые способствуют охлаждению и осолонению вод залива. В это же время ветры северных направлений в бухте Новик формируют нагоны и блокируют воды в ее южной части. В результате перечисленных процессов меняется знак пространственного градиента солености в б. Новик. С октября и до середины декабря (до установления ледяного покрова) соленость вод северной части бухты выше, чем южной, на 1–0,5 *psu*.

Прямых измерений скорости течения в бухте не производили, поэтому проведем количественные оценки масштабов циркуляции ее вод вследствие ветрового нагона в период северных ветров (октябрь – декабрь). Отметим, что горизонтальные масштабы бухты малы и число Россби, отражающее отношение сил инерции к силе Кориолиса, много больше единицы. Следовательно, геострофический баланс играет второстепенную роль [13]. Ниже проведены оценки в среднем, поскольку сложность береговой черты, а также множество взаимодействующих факторов не позволяют на современном уровне построить адекватную математическую модель детальной циркуляции вод бухты с учетом взаимодействия с окружающей акваторией.

В качестве системы координат примем вертикальную плоскость по разрезу *NA*, ось *z* направлена по вертикали, ось *l* – вдоль разреза к выходу из бухты с генеральным направлением на север. Горизонтальная скорость *v* соответствует скорости вдоль оси *l*.

Оценку ветрового нагона для рассматриваемой акватории получим на основании классических приближений [13]. Подставим в уравнение горизонтального баланса сил инерции и ветрового напряжения трения $\frac{\partial p}{\partial l} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} = 0$ вместо давления *p* выражение для *p*, выведенное из уравнения гидростатики $dp = -\rho g dz$, тогда формула для оценки угла наклона водной поверхности вследствие ветрового нагона примет следующий вид: $tg\alpha = \frac{\delta z}{\delta l} \approx \frac{\tau}{\rho g H}$. Далее, учитывая формулу касательного напряжения ветра на морской поверхности $\tau = C_d \cdot \rho_a \cdot W^2$, получаем итоговое выражение

$$tg\alpha \approx C_d \cdot \frac{\rho_a}{\rho} \cdot \frac{W^2}{gH}, \quad (1)$$

где C_d – коэффициент сопротивления морской поверхности; ρ_a и ρ – плотность воздуха и воды; W – скорость приводного ветра на стандартной высоте 10 м; g – ускорение свободного падения; H – характерная глубина бухты.

Для исследуемого периода осенне-зимнего муссона (октябрь – декабрь) ряды срочных наблюдений 2011–2020 гг. ** показали в 90 % случаев среднюю скорость ветра северных направлений менее 11 м/с. В этом динамическом диапазоне ($W < 11$ м/с) коэффициент сопротивления $C_d \approx 1,24 \cdot 10^{-3}$ [14] и при характерной величине слоя воды $H \sim 10$ м тангенс угла наклона поверхности (1) в б. Новик составит около 10^{-6} . Это дает превышение уровня в бухте $\delta H = L \cdot \text{tg } \alpha \approx 10^{-2}$ м на характерном масштабе ее протяженности $L \sim 10$ км. Таким образом, в период осенне-зимнего муссона в отсутствие ледяного покрова ветровой нагон вод в б. Новик приблизительно равен 1 см / 10 км.

Согласно выводам, представленным в работах [13, 15], до 10 % доступной потенциальной энергии может переходить в кинетическую и оценки скорости течения вследствие рассмотренного фактора соответствуют рассчитанным по выражению $v^2/L \approx 0,1 g \cdot \text{tg } \alpha$. Отсюда при ветровом нагоне в бухте получаем оценку горизонтальной скорости $v \sim 10^{-2} - 10^{-1}$ м/с.

На рис. 4 представлен годовой ход термохалинных характеристик, который составлен для поверхностного слоя 0–5 м по данным CTD-зондирований 2016–2018 гг., выполненных в северной части бухты: с причальной стенки пос. Канал (глубина 6 м) и на ст. 7 (глубина 14 м) осевого разреза *NA* (см. рис. 1, *b*). Как можно видеть, сезонные колебания температуры и солёности между собой находятся в противофазе: рост температуры сопровождается уменьшением солёности и наоборот. Максимум температуры (24–25 °С) приходится на конец лета. Ее наибольший рост, до 8 °С/мес., зафиксирован в апреле – мае, а в октябре – ноябре наблюдается столь же стремительное падение до температуры замерзания. Минимум температуры (–1,84 °С) на ст. 7 был зарегистрирован в верхнем подледном слое между горизонтами 1–5 м 27 января 2015 г. (при усредненных значениях солёности $\approx 34,28$ *psu*).

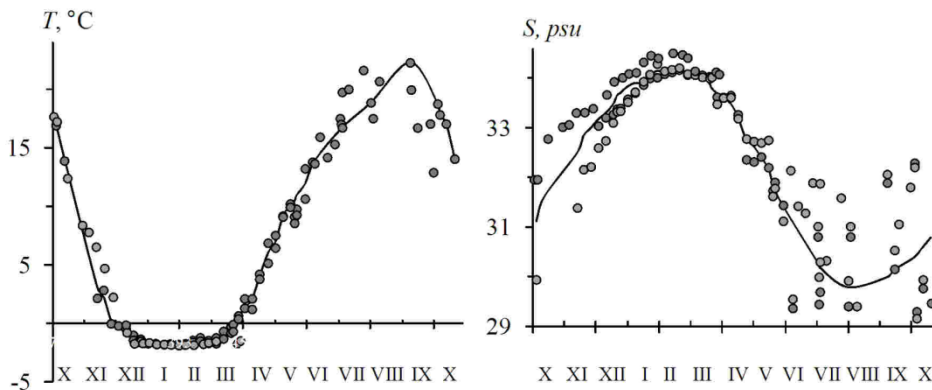


Рис. 4. Годовой ход температуры (*T*) и солёности (*S*) в поверхностном слое (0–5 м) б. Новик по CTD-данным, измеренным в 2016–2018 гг. на станциях в районе пос. Канал (о. Русский)
Fig. 4. Annual variations of temperature (*T*) and salinity (*S*) in the surface layer (0–5 m) of the Novik Bay based on the CTD-data obtained at the stations in the vicinity of the Kanal village (Russky Island) in 2016–2018

В теплый период года, с июня по сентябрь, показатели солёности поверхностного слоя на станциях в районе пос. Канал варьировали в диапазоне от 29

до 32 *psu*. Столь резкие изменения этого параметра вызваны не локальными осадками, как можно было предполагать, а прежде всего разнонаправленными динамическими процессами, индуцированными циркуляцией вод в Амурском заливе. В последующие осенние месяцы из-за активизации зимнего муссона изменения солёности в б. Новик характеризуются стабильным ростом этого параметра благодаря поступлению через пролив Босфор Восточный холодных солёных вод из Уссурийского залива. *CTD*-зондирования, выполненные с причала пос. Канал 6 декабря 2017 г., показали при температуре $-0,73$ °C наибольший уровень солёности, зарегистрированный в поверхностном слое б. Новик в отсутствие ледяного покрова, – 33,66 *psu*.

Погоду в Приморье с октября по март определяет Сибирский антициклон. В зависимости от изменения положения и масштаба этой барической аномалии усиливается либо ослабевает адвекция континентального холода в прибрежные районы Японского моря. В частности, во время холодных вторжений, вызванных смещением Сибирского максимума на юг, приземная температура на побережье резко падает до -20 °C и менее [16]. По данным метеостанции Владивосток-гора за 2010-е гг., средняя за зимний сезон температура воздуха – около -10 °C. За период натуральных гидрологических наблюдений 2013–2020 гг. наиболее холодной выдалась зима 2012/13 г. ($-12,9$ °C), а относительно тёплой ($-7,2$ °C) – зима 2018/19 г.

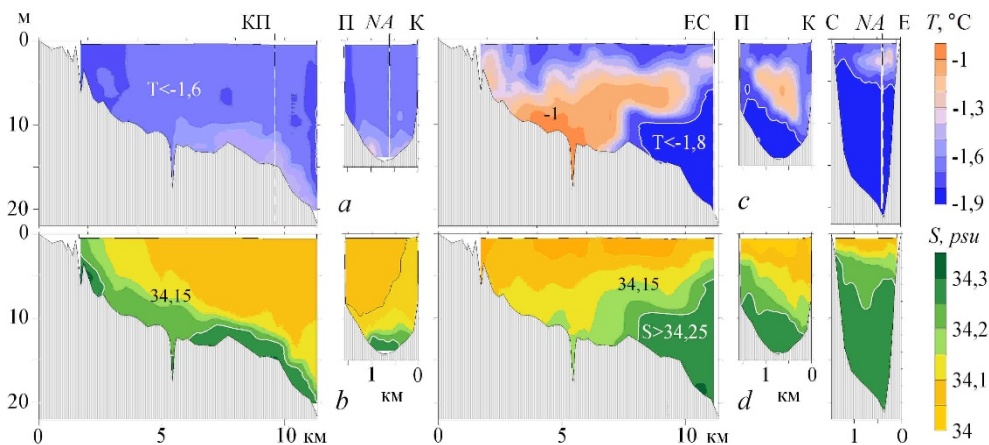
Соответственно, в течение зимнего сезона гидрологический режим б. Новик напрямую определяют процессы, связанные с теплообменом и ледообразованием. Как правило, в конце ноября при температурах воздуха ниже -5 °C в кутовой части бухты, когда температура воды при солёности не менее 32,5 *psu* опускается до $-1,8$ °C, формируется ледяной покров. Через месяц при благоприятных погодных условиях вся поверхность акватории б. Новик покрывается тонким слоем льда (до 20 см).

На стадии интенсивного роста льда (вначале до 2–3 см/сут) из-за особенностей процесса замерзания солёных вод выделяется/вытесняется тяжёлый холодный рассол. В этот период интегральная солёность льда (определяемая по растопленному фрагменту керна льда) составляет в среднем 8–10 *psu* [17]. Приток холодного рассола в подледный слой воды увеличивает в нем содержание солей и способствует понижению температуры.

В то же время ледяной покров сокращает поток тепла из подледного слоя в атмосферу, и на мелководных участках наблюдается рост температуры воды благодаря теплообмену с донными осадками. Донный ил аккумулирует тепло в течение тёплого периода года (с апреля по сентябрь) и возвращает его в вышележащий слой воды по мере охлаждения. Например, в Амурском заливе при глубине дна 7 м максимум теплового потока от донных осадков, до 12 Вт/м², наблюдается в декабре, а в последующие зимние месяцы поступление тепла в придонный слой линейно снижается [7]. Соответственно в мелководной бухте Новик интенсивный теплообмен с донными осадками тормозит процесс ледообразования. Так, рост льда в ее кутовой части в начале сезона (декабрь) наблюдался при среднесуточной температуре воздуха менее -5 °C, а к окончанию сезона (февраль) при благоприятных гидрологических условиях в бухте этот предел повышался до -2 °C [17].

Как правило, к середине февраля активность Сибирского антициклона понижается, уменьшается приток холодного воздуха в прибрежные районы и рост льда заметно сокращается (менее 2 см за неделю). В зависимости от накопленного за сезон количества поступившего холода ($\Sigma(-T_a)$ – так называемой суммы градусо-дней мороза, где T_a – среднесуточная температура воздуха) усредненные значения толщины ледяного покрова бухты, измеренные в конце февраля, находились в пределах от 27 см ($\Sigma(-T_a) \approx 648$ °С·сут, 2019 г.) до 66,5 см ($\Sigma(-T_a) \approx 1163$ °С·сут, 2013 г.), а соленость подледного слоя достигала сезонного максимума 34,6 *psu* (2018 г.).

Холодный рассол, поступающий в воду на стадии роста льда, частично накапливается в придонном слое. Особенно ярко это проявляется в поле солености (рис 5, *b*). Важно отметить, что более интенсивное охлаждение бухты начинается с мелководной кутовой части, где образуется первый лед. Поэтому в южной части формируются более соленые и, соответственно, более плотные воды, которые вследствие гидростатического давления начинают двигаться по рельефу дна к выходу из бухты. При этом придонный градиентный поток, смещаясь на север, прижимается к восточному берегу бухты, а встречный, компенсационный, в верхнем подледном слое – к западному (рис 5, *a, b*).



Р и с. 5. Температура (*a, c*) и соленость (*b, d*), измеренные зондом ASTD102 со льда б. Новик на осевом разрезе *NA* и поперечных разрезах пос. Канал – пос. Подножье (КП) и о. Елены – м. Старицкого (ЕС) 01 февраля (*a, b*) и 23 февраля (*c, d*) 2017 г.

Fig. 5. Temperature (*a, c*) and salinity (*b, d*) measured by the ASTD102 probe from the ice surface in the Novik Bay at the axial section *NA* and at the cross-sections Kanal vil. – Podnozh'e vil. (KP) and the Elena Island – the Staritsky Cape (ES) on February, 1 (*a, b*) and February, 23 (*c, d*), 2017

По мере движения плотных вод на север температура в придонном слое повышается на 0,1–0,3 °С (рис 5, *a*) благодаря теплу, поступающему от донных осадков. В результате на стадии роста льда на большинстве станций разреза *NA* в б. Новик наблюдается характерная двухслойная термохалинная структура: холодный, но менее соленый верхний слой и придонный, относительно теплый и более соленый. Для вод Амурского залива также характерна подобная подледная двухслойная стратификация, но с большими термохалинными градиентами [8].

На стадиях стабилизации (отсутствие дальнейшего роста толщины льда) и разрушения ледяного покрова рассол не образуется, но тепло от осадков продолжает поступать в придонный слой, и конвективные процессы постепенно разрушают двухслойную структуру вод [8]. В марте интегральные показатели термохалинных параметров вод бухты Новик демонстрируют тренды противоположной направленности: рост температуры и падение солености (см. рис. 4).

Натурные данные, полученные на стадии формирования ледяного покрова б. Новик, позволяют сделать количественную оценку возможной скорости течения, порождаемого градиентом давления. Для градиентного течения уравнение движения имеет вид [13] $v \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \approx \frac{\delta \rho}{\rho} \cdot \frac{gH}{L}$ и искомая верхняя оценка его скорости соответствует выражению

$$v = \sqrt{g \cdot H \cdot \frac{\delta \rho}{\rho}}, \quad (2)$$

где $\delta \rho = \rho_L - \rho_0$ – характерная горизонтальная разность плотностей слоев воды в вершине бухты, ρ_0 , и на ее входе, ρ_L . В частности, по данным гидрологической съемки в б. Новик 01 февраля 2017 г. (рис 5, *a, b*), эта разность составила $\delta \rho \approx -0,10 \text{ кг/м}^3$ на 10 км, а оценочная скорость градиентного потока $v \sim 10^{-1} \text{ м/с}$.

Отметим, что рассмотренный градиентный механизм выноса воды из бухты действует практически постоянно в течение периода ледостава. Также отметим, что динамические оценки течений, продуцированных ветровым нагоном (формула (1)) и перепадом плотностей (формула (2)), имеют один порядок.

Период стабильно низких отрицательных температур воды длится не менее двух месяцев (см. рис. 4). Таким образом, более продолжительный ледостав благоприятно действует на процесс самоочищения бухты. В то же время запирающий эффект вызванного северными ветрами нагона ослабевает, когда работа касательного напряжения ветра блокируется ледяной поверхностью. Поэтому более поздние сроки начала ледостава (например, вследствие климатических трендов) ухудшают экологическую обстановку в бухте Новик по причине ослабления циркуляции ее вод.

На временном интервале, включающем окончание зимы и начало весны, обновление вод б. Новик также зависит от особенностей гидрологического режима прилегающих акваторий: Амурского залива и пролива Босфор Восточный. Как правило, в феврале эти акватории начинают освобождаться от ледяного покрова [18]. В то же время температурный атмосферный фон продолжает оставаться отрицательным и освободившийся ото льда поверхностный слой воды уплотняется. Уплотнение происходит вследствие не только охлаждения, но и осолонения, поскольку доминирующий северный ветер способствует выносу начальных форм льда в открытую часть залива Петра Великого. При проникновении более плотных вод Амурского залива либо пролива Босфор Восточный в покрытую льдом б. Новик возможно блокирование придонного градиентного потока и, соответственно, торможение циркуляции ее вод.

В течение периода регулярных наблюдений, 2013–2018 гг., эффект блокирования вод бухты Новик регистрировался дважды – в 2014 и 2017 гг. Ежене-

дельные гидрологические съемки зимы 2016/17 г. позволили выявить некоторые его особенности. В начале зимы формирование ледяного покрова в бухте тормозили относительно теплые погодные условия (средняя температура воздуха в декабре 2016 г. $T_a \approx -7,7$ °С), и воды ее северной части сохраняли повышенную плотность: $\rho_L > \rho_0$. Интенсивный рост льда (еженедельно по 6 см) с 17 см (28 декабря) до 40,5 см (25 января), вызванный холодными вторжениями, $T_a \geq -16,5$ °С, изменил знак плотностного градиента между частями бухты и способствовал формированию придонного потока высокосоленых вод, направленного на север.

В кутовой части бухты (станции 1–3 разреза *NA*) уплотнение воды холодным рассолом продолжалось до 25 января ($\rho_0 \approx 1027,61$ кг/м³), когда достигли экстремумов разность плотностей ($\delta\rho \approx -0,25$ кг/м³) и соответствующая оценка скорости градиентного потока (2) ($v \sim 15$ см/с). Однако уже через неделю величина плотностного градиента уменьшилась в 2,5 раза вследствие появления более холодных ($-1,82$ °С) плотных ($\rho_L \approx 1027,51$ кг/м³) вод в прилегающем районе Амурского залива (рис. 5, *a, b*).

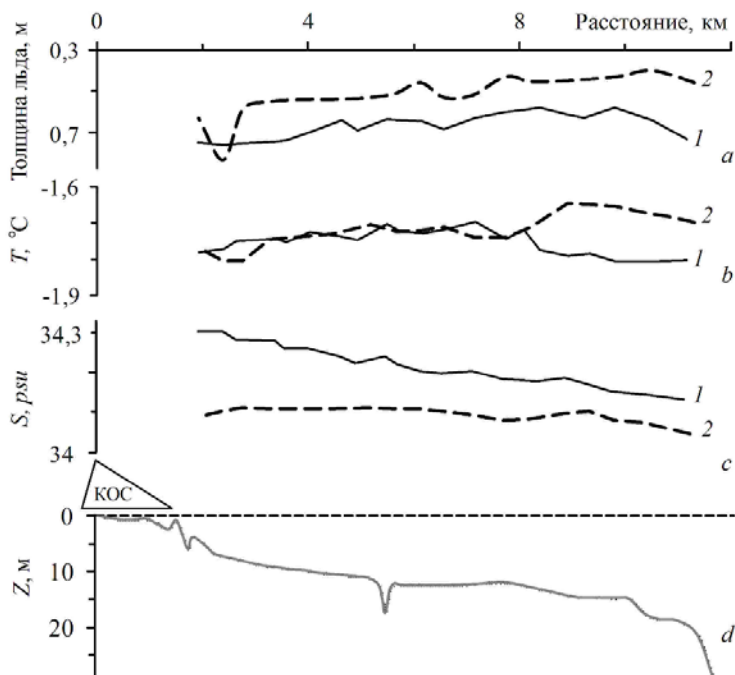
Ослабление подледной динамики затормозило адвекцию тепла, поступающего в придонный слой из донных осадков, и отрицательно повлияло на процесс ледообразования, сократив втрое скорость нарастания льда. Его средняя толщина за неделю увеличилась всего на 2 см до 42,6 см (1 февраля), несмотря на стабильно отрицательную приземную температуру воздуха, $-12,5 \leq T_a \leq -4,7$ °С. В течение следующей недели (первой недели февраля) атмосферный фон также оставался отрицательным, $-9,9 \leq T_a \leq -1,7$ °С, тем не менее рост льда в бухте Новик прекратился, а интегральная температура в подледных слоях ее южной части увеличилась с $-1,67$ до $-1,53$ °С. Соответственно плотность подледного слоя на станциях в начале осевого разреза *NA* понизилась до $\rho_0 \approx 1027,56$ кг/м³ (8 февраля).

В это же время воды Амурского залива продолжали уплотняться ($\rho_L \approx 1027,54$ кг/м³) и градиентный поток, направленный из бухты, был почти остановлен. Дальнейшее охлаждение ($-1,85$ °С) и осолонение (34,29 *psu*) толщи вод залива сформировали в придонном слое бухты реверсивный градиентный поток. Его продвижение на юг способствовало частичному возврату относительно теплых (до $-1,2$ °С) высокосоленых (34,20 *psu*) донных вод в южную часть бухты.

Согласно данным съемки от 23 февраля (рис. 5, *c, d*), проникшие в бухту плотные воды залива, заполнив почти всю ее северную часть на горизонтах ниже 2–7 м, заблокировали воды южной части. В результате пространственный градиент плотности поменял знак и достиг максимума: $\delta\rho \approx 0,20$ кг/м³ на 10 км. Повышение температуры в заблокированных слоях до -1 °С и сопутствующая конвекция запустили процесс разрушения ледяного покрова. Этот процесс в пределах акватории бухты Новик протекал неравномерно, в частности на разрезе *NA* средняя толщина льда на участке 3,5–7 км уменьшилась на 3 см, с 40 до 36,8 см, а на участке 7–11 км на 1,5 см. Сокращению толщины ледяного покрова в северной части бухты с 42,6 до 41,1 см способствовали относительно теплые, до $-1,2$ °С, воды, поступающие в подледный слой из заблокированной южной части (рис. 5, *c*). Здесь необходимо отметить, что процесс таяния льда происходил несмотря на относительно низкий атмосферный температурный

фон февраля 2017 г., $T_a \approx -7,1$ °С (при вариациях среднесуточных значений от -12 до $+2$ °С) **.

Таким образом, в период ледостава интенсивность циркуляции вод бухты Новик и эффективность ее водообмена с прилегающим Амурским заливом напрямую зависят от величины и знака градиента плотности воды между ее южной и северной частями.



Р и с. 6. Толщина льда (*a*), температура (*b*) и соленость (*c*), усредненные в подледном слое от нижней кромки льда до дна, а также рельеф дна (*d*) на осевом разрезе *NA* в б. Новик по данным ледовых съемок 23 февраля 2013 г. (*1*) и 24 февраля 2016 г. (*2*). Треугольником с надписью «КОС» отмечена локализация сброса сточных вод очистными сооружениями кампуса ДВФУ

Fig. 6. Ice thickness (*a*), temperature (*b*) and salinity (*c*) averaged over the total water column under the ice lower edge; bottom topography (*d*) at the axial section *NA* in the Novik Bay based on the data of the ice surveys on February 23, 2013 (*1*) and February 24, 2016 (*2*). Triangle with inscription “STP” denotes location of the sewage treatment plants of the FEFU campus

Результаты многолетних наблюдений показали также возросшее влияние антропогенного воздействия, помимо естественных факторов, определяющих гидрологический режим бухты Новик. Эффект напрямую связан с канализационными очистными сооружениями кампуса ДВФУ, которые начиная с осени 2013 г. осуществляют сброс сточных вод в кутовую часть бухты Новик до 10^3 м³/сут [4]. Поступление пресных вод от дополнительного источника нарушает естественную циркуляцию вод бухты. Зимой при наличии ледяного покрова регулярный приток пресных вод значительно понижает соленость в тонком подледном слое. В результате на периферии зоны проникновения этих вод

ускоряется рост льда. Так, согласно данным ледовых съемок, которые выполнялись в бухте Новик ежегодно в конце февраля, в отсутствие дополнительного источника пресных вод (зима 2013 г.) толщина льда в кутовой части превышала средний уровень по осевому разрезу всего на 10–12 %. А после запуска очистных сооружений эти различия достигали 40 % и более (рис. 6, а). Кроме того, замерзание пресных либо опресненных/солончатых вод, в отличие от соленых, происходит при повышенных температурах и рассол выделяется в гораздо меньшем количестве. Эти процессы не способствуют росту солености, плотности в южной части бухты (рис. 6, с) и в зимний период тормозят водообмен с прилегающим Амурским заливом, понижая эффективность ее самоочищения.

Заключение. Таким образом, полученные на основе измерений и количественных оценок результаты позволяют прийти к следующим выводам:

1. Изменения термohалинных характеристик поверхностного слоя (0–5 м) б. Новик имеют характерную сезонную цикличность: температура положительна с апреля по ноябрь (максимум 25 °С в конце августа) и отрицательна с середины ноября по март (минимум –1,84 °С в январе) при среднегодовом значении около 8,5 °С. Соленость характеризуется минимумом летом (29 *psu* в августе), и максимумом зимой (34,6 *psu* в феврале). Зимнее повышение солености связано с поступлением рассола в период ледостава.

2. Особенность бухты – малая тепловая инерция (из-за малого объема) по отношению к прилегающему Амурскому заливу – приводит к более быстрому охлаждению и нагреванию вод, вследствие чего создаются условия для градиентных течений, особенно в зимний период при формировании ледяного покрова.

3. Расположение и форма бухты Новик острова Русского затрудняют ее водообмен с прилегающим Амурским заливом в течение почти всего года. От южных ветров летнего муссона бухта закрыта горами, препятствующими сгонному течению. Северные ветры зимнего муссона вызывают нагон воды из Амурского залива и блокируют дальнюю кутовую часть бухты, где наблюдается застой вод. Количественные оценки, соответствующие характерному для исследуемого района диапазону скорости ветра северных направлений 4–11 м/с, показали высоту нагона в бухте не более 1 см / 10 км, а скорости дрейфовых течений до 10 см/с.

4. Зимой ледяной покров в бухте формируется преимущественно во время холодных вторжений, вызванных Сибирским антициклоном. В период ледостава вода в бухте Новик, как правило, холоднее и солонее, чем в прилегающих водах Амурского залива, вследствие мелководности, близости берега и выделяющегося рассола. В результате благодаря пространственному плотностному градиенту формируется поток высокосоленых вод в придонном слое, направленный на север к выходу из бухты. Этот поток способствует процессу самоочищения акватории, что подтверждается данными химико-экологических исследований. Количественные оценки скорости градиентного потока, выполненные с учетом данных *CTD*-зондирований, не превышали 15 см/с при экстремальной разности плотностей $\delta\rho \approx -0,25 \text{ кг/м}^3$.

5. Наиболее благоприятным для обновления вод бухты Новик является период ледостава. При его сокращении либо изменении знака плотностного градиента, например по причине проникновения в северную часть бухты более плотных вод Амурского залива, снижается эффективность самоочищения исследуемой акватории. На процесс самоочищения также отрицательно влияет опреснение вод южной части бухты канализационными очистными сооружениями кампуса ДВФУ.

Выполненное исследование подтверждает важность ограничения антропогенной нагрузки на бухту Новик из-за слабой естественной способности к самоочищению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексное исследование среды и донной биоты бухты Новик (о. Русский, Японское море) после многолетнего антропогенного пресса / Ю. Э. Брегман [и др.] // Известия ТИНРО. 1998. Т. 124, ч. 1. С. 320–343.
2. *Бойченко Т. В.* Микробиологическая оценка качества поверхностных вод бухты Новик (залив Петра Великого, Японское море) // Actualscience. 2017. Т. 3, № 3. С. 25–27.
3. Химико-экологическое состояние вод бухты Новик (остров Русский, зал. Петра Великого, Японское море) / Н. К. Христофорова [и др.] // Известия ТИНРО. 2016. Т. 186. С. 135–144. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-186-135-144>
4. *Раков В. А.* Состояние экосистемы бухты Новик (залив Петра Великого) в условиях загрязнения // Океанография залива Петра Великого и прилегающей части Японского моря : тезисы докладов Третьей научной конференции, 26–28 апреля 2017 г., Владивосток. Владивосток : ТОИ ДВО РАН, 2017. С. 31. URL: http://pgb-2017.poi.dvo.ru/PGB2017_Abstracts.pdf (дата обращения: 12.11.2021).
5. Summertime in situ monitoring of oxygen depletion in Amursky Bay (Japan/East Sea) / P. Tishchenko [et al.] // Continental Shelf Research. 2016. Vol. 118. P. 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.02.014>
6. *Григорьева Н. И.* Исследование гипоксии в проливе Босфор Восточный (залив Петра Великого, Японское море) // Метеорология и гидрология. 2017. № 11. С. 43–50.
7. *Буров Б. А., Лазарюк А. Ю., Лобанов В. Б.* Исследование теплового потока на границе вода – донные осадки в Амурском заливе Японского моря в зимний период // Океанология. 2014. Т. 54, № 6. С. 744–753. doi:10.7868/S0030157414060021
8. *Лазарюк А. Ю., Лобанов В. Б., Пономарёв В. И.* Эволюция термохалинной структуры вод Амурского залива в холодный сезон // Вестник ДВО РАН. 2013. № 6. С. 59–70.
9. Колебания поверхности Амурского залива в зимний период / А. Ю. Лазарюк [и др.] // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2018. № 4(37). С. 53–62. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2008659>
10. *Данченков М. А., Фельдман К. Л., Файман П. А.* Температура и соленость вод залива Петра Великого // Гидрометеорология и экология Дальнего Востока. Владивосток : Дальнаука, 2003. С. 10–25. (Труды ДВНИГМИ ; тематический выпуск № 4). URL: <http://ferhri.org/library/2017-07-31-01-30-41/176-tematicheskij-vypusk-4-2003-g.html> (дата обращения: 12.11.2021).
11. *Кильматов Т. Р., Лазарюк А. Ю.* Рециркуляция вод залива Петра Великого Японского моря вследствие осеннего муссона // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2020. № 2(43). С. 106–115. <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-11>
12. Влияние ветровых условий на изменчивость апвеллинга у побережья Приморья (северо-западная часть Японского моря) / И. А. Жабин [и др.] // Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 58–67.
13. Физика океана. Том 2. Гидродинамика океана / Отв. ред. В. М. Каменкович, А. С. Монин. М. : Наука, 1978. 455 с.

14. *Large W. G., Pond S.* Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds // *Journal of Physical Oceanography*. 1981. Vol. 11, iss. 3. P. 324–336. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<0324:OOMFMI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<0324:OOMFMI>2.0.CO;2)
15. *Краус Е. Б.* Взаимодействие атмосферы и океана. Ленинград : Гидрометиздат, 1976. 295 с.
16. *Пичугин М. К., Пономарев В. И.* Изменчивость потоков явного и скрытого тепла в северо-западной части Японского моря в холодный период года // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2013. № 6. С. 22–29.
17. Вертикальное распределение рассола и объемная структура тонкого однолетнего льда Амурского залива по данным методов ядерного магнитного резонанса и магнитно-резонансной томографии / Н. А. Мельниченко [и др.] // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 5. С. 859–869. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574595859-869>
18. *Якунин Л. П.* Атлас основных параметров ледяного покрова Японского моря. Владивосток : Издательский дом ДВФУ, 2012. 83 с.

Об авторах:

Лазарюк Александр Юрьевич, старший научный сотрудник, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН (690001, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат технических наук, **SPIN: 1930-2370**, **ORCID ID: 0000-0003-4231-9653**, **ResearcherID: AАН-2203-2019**, **Scopus Author ID: 6507304837**, lazaryuk@poi.dvo.ru

Кильматов Талгат Рустемович, профессор, Дальневосточный федеральный университет (690091, Россия, Владивосток, ул. Суханова, д. 8), МГУ им. адм. Невельского (690003, Россия, Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50а), доктор физико-математических наук, **SPIN: 5972-7911**, **ORCID ID: 0000-0002-0574-1452**, **Scopus Author ID: 6506876958**, kilmatov.tr@dvfu.ru

Марьина Евгения Николаевна, ведущий инженер, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН (690001, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), **SPIN: 5161-2427**, **ORCID: 0000-0003-3513-2145**, **ResearcherID: ААО-1169-2020**, maryina@poi.dvo.ru

Кустова Елена Владимировна, старший инженер, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН (690001, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), **SPIN: 1581-9711**, **ORCID ID: 0000-0001-9202-4613**, **ResearcherID: ААН-2316-2019**, kustova_e@poi.dvo.ru