

Результаты экспедиционных исследований Онежского залива Белого моря в сентябре 2019 года

А. В. Толстикова^{1, ✉}, Н. Е. Галахина¹, Т. А. Белевич^{2, 3},
Н. В. Усов⁴, Р. Э. Здорвеннов¹

¹ Институт водных проблем Севера – ФГБУН ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук», Петрозаводск, Россия

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Научно-исследовательский институт физико-химической биологии им. А. Н. Белозерского, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴ Зоологический институт РАН, Санкт-Петербург, Россия

✉ alexeytolstikov@mail.ru

Поступила в редакцию 13.01.2023; одобрена после рецензирования 03.02.2023;
принята к публикации 26.04.2023.

Аннотация

Цель. Выявление характерных особенностей распределения гидрофизических и биогеохимических параметров морской среды в зависимости от фаз прилива в Онежском заливе Белого моря в сентябре – цель настоящей работы.

Методы и результаты. В рейсе НИС «Эколог» 6–11 сентября 2019 г. впервые проведены синхронные комплексные гидрологические и биогеохимические исследования в Онежском заливе в зависимости от фазы приливного цикла в сентябре. Работы выполнены стандартными методами по двум разрезам в Белом море (пролив Западная Соловецкая Салма и через Онежский залив с севера на юг). Определены содержание хлорофилла *a* и биогенных элементов, таксономический состав, численность и биомасса фитопланктона, включая его вертикальное распределение в пределах фотической зоны, а также качественный и количественный состав зоопланктона. Среди биогенных элементов в Онежском заливе преобладали органические формы азота (0,62–0,83 мг/л), содержание $P_{\text{мин}}$ и $P_{\text{орг}}$ было близким (в среднем 9 мкг/л), концентрация минеральных форм фосфора преобладала в придонных горизонтах на глубоководных станциях. В Западной Соловецкой Салме биомасса фитопланктона в полную и малую воду составила $6,75 \pm 1,18$ мг C/m^3 и $10,25 \pm 11,34$ мг C/m^3 , в Онежском заливе $8,07 \pm 2,43$ мг C/m^3 и $16,61 \pm 13,54$ мг C/m^3 соответственно. Фитопланктон был представлен диатомовыми, динофитовыми, криптофитовыми и диктиоховыми водорослями. В темное время суток обнаружено значительное повышение обилия всех массовых видов зоопланктона в южной части Онежского залива.

Выводы. Влияние фаз приливного цикла в исследуемом районе на пространственно-временную изменчивость характеристик морской среды проявлялось в изменении толщины слоя поверхностных аномалий температуры и солёности; положение Онежского фронтального раздела смещалось на 8–9 км; изменения концентрации нитритов, ионов аммония и хлорофилла *a* были статистически не значимы; изменения биомассы фитопланктона были статистически также не значимы; состав доминирующих видов фитопланктона не менялся; горизонтальное распределение зоопланктона соответствовало горизонтальному градиенту температуры воды: в южной части Онежского залива обилие бореальных видов на порядки выше, чем у границы с Бассейном.

Ключевые слова: Белое море, Онежский залив, комплексные исследования, биогенные элементы, хлорофилл *a*, фитопланктон, зоопланктон

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания по теме «Комплексные исследования Белого моря и водосбора в интересах развития Арктической зоны РФ» № 121021700122-7 и Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М. В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Авторы выражают благодарность участникам экспедиции Никишовой Е. П., к. г. н. Конику А. А., к. г. н. Свергунову Е. И. и членам экипажа НИС «Эколог».

Для цитирования: Результаты экспедиционных исследований Онежского залива Белого моря в сентябре 2019 года / А. В. Толстиков [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 4. С. 512–527. EDN LZQXOQ.

Original Article

Results of Expeditionary Studies of the Onezhskiy Bay in the White Sea in September, 2019

A. V. Tolstikov^{1,✉}, N. E. Galakhina¹, T. A. Belevich^{2,3}, N. V. Usov⁴,
R. E. Zdorovenov¹

¹ Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, Russia

² M. V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, Moscow, Russia

³ A. N. Belozersky Research Institute of Physico-Chemical Biology of the M. V. Lomonosov Moscow
State University, Moscow, Russia

⁴ Zoological Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
✉ alexeytolstikov@mail.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study consists in identifying the characteristic features of the distribution of hydrophysical and biogeochemical parameters of marine environment depending on the tide phases in the Onezhskiy Bay (the White Sea) in September.

Methods and Results. In the cruise of the R/V «Ekolog» (September 6–11, 2019), synchronous integrated hydrological and biogeochemical studies were for the first time performed in the Onezhskiy Bay depending on the phase of a tidal cycle in September. The standard methods applied for this purpose included two sections in the White Sea, namely along the Western Solovetskaya Salma Strait and through the Onezhskiy Bay from north to south. This permitted to determine the chlorophyll *a* and nutrients contents, the taxonomic composition, abundance and biomass of phytoplankton including its vertical distribution within the photic zone, as well as the qualitative and quantitative composition of zooplankton. Organic forms of nitrogen (0.62–0.83 mg/l) prevailed among the nutrients in the Onezhskiy Bay, the contents of P_{\min} and P_{org} were close (on average 9 µg/l), the concentration of phosphorus mineral forms was predominant in the water bottom layer at the deep-sea stations. In the Western Solovetskaya Salma, the phytoplankton biomass average values during high and low water were $6.75 \pm 1.18 \text{ mg C/m}^3$ and $10.25 \pm 11.34 \text{ mg C/m}^3$, and in the Onezhskiy Bay – $8.07 \pm 2.43 \text{ mg C/m}^3$ and $16.61 \pm 13.54 \text{ mg C/m}^3$, respectively. Phytoplankton was represented by diatoms, dinophytes, cryptophytes and dictyochas. In the southern part of the Onezhskiy Bay, a significant increase in the abundance of all common zooplankton species was found at night.

Conclusions. In the area under study, the impact of the tidal cycle phases on spatial and temporal variability of the marine environment characteristics was manifested in a change in the thickness of the layer of temperature and salinity surface anomalies; position of the Onezhskiy frontal section shifted by 8–9 km; the changes in the nitrites, ammonium ions and chlorophyll *a* concentrations, and also in the phytoplankton biomass were statistically insignificant; the composition of dominant phytoplankton species did not change; the horizontal distribution of zooplankton, primarily its warm-forms, corresponded to the water temperature horizontal gradient: in the southern part of the Onezhskiy Bay, the abundance of boreal species is by orders of magnitude higher than that near the boundary with the basin.

Keywords: White Sea, Onezhskiy Bay, comprehensive research, nutrients, chlorophyll *a*, phytoplankton, zooplankton

Acknowledgements: the study was carried out within the state assignment "Comprehensive research of the White Sea and the watershed in the interests of the development of the Arctic zone of the Russian Federation" No. 121021700122-7 and the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of the M. V. Lomonosov Moscow State University "The future of the planet and global environmental changes". The authors are grateful to the expedition members Nikishova E. P., Ph.D. (Geogr.) Konik A. A. and Ph.D. (Geogr.) Svergun E. I., as well as the crew of the R/V "Ecolog".

For citation: Tolstikov, A.V., Galakhina, N.E., Belevich, T.A., Usov, N.V. and Zdorovenov, R.E., 2023. Results of Expeditionary Studies of the Onezhskiy Bay in the White Sea in September, 2019. *Physical Oceanography*, 30(4), pp. 468-483.

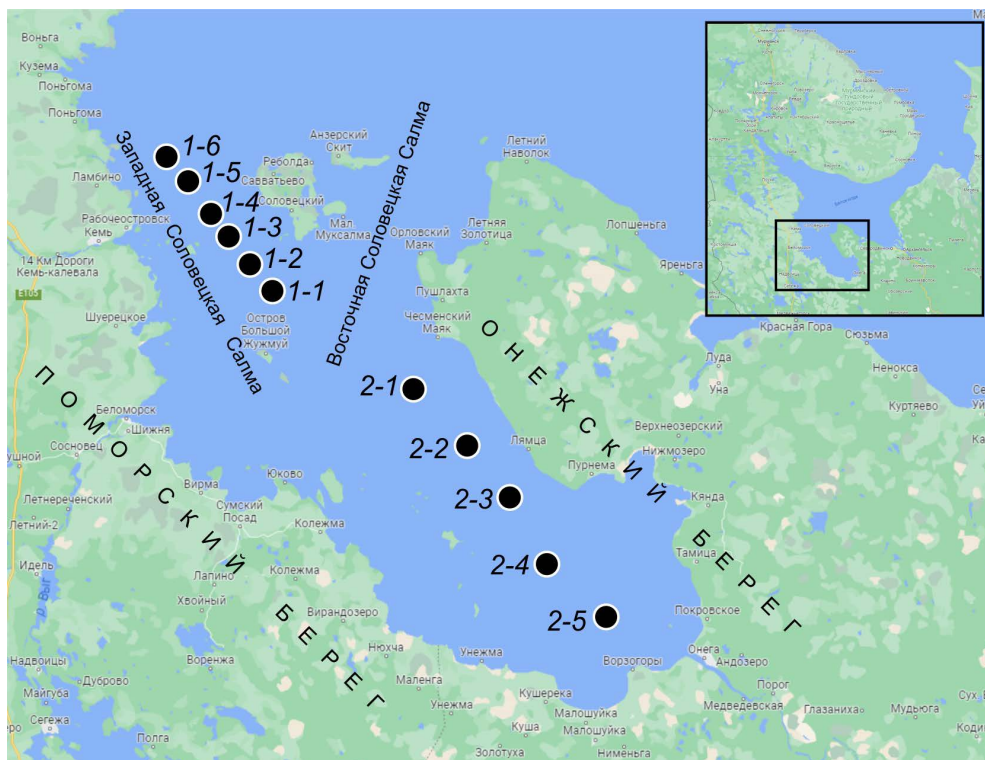
Введение

При изучении закономерностей и прогнозирования физических, химических и биологических процессов Белого моря на основе данных наблюдений и моделирования, а также оценки трансформации экосистем под влиянием климатических и антропогенных изменений важную роль играют регулярные сезонные комплексные исследования. Экспедиции на Белое море проводятся Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН совместно с несколькими организациями (ИО РАН, МГУ им. М. В. Ломоносова, ЗИН РАН и др.) около двух десятилетий. Эти работы ориентированы в первую очередь на получение информации о распределении гидрологических параметров, а также функционировании морских экосистем и влиянии на них абиотических и антропогенных факторов. Выполнение этой задачи включает проведение регулярных сезонных исследований в одном из районов Белого моря. В течение многих лет как наиболее логистически удобный в теплый период года изучается Онежский залив Белого моря. Однако в прошлые годы в этом районе полевые работы лишь иногда проходили осенью, как, например, в 2002 г. [1], когда в экспедиции принимала участие часть авторов настоящей работы. Тогда цель исследования заключалась в изучении взвеси и большая часть станций была сосредоточена в устьевых областях рек. В 2017 г. осуществлялись лишь гидрофизические работы с помощью *CTD*-зондов и определялись концентрации хлорофилла *a* [2]. В 2019 г. комплексные экспедиционные исследования открытой части Онежского залива в сентябре были проведены впервые. Цель этой работы заключалась в выявлении характерных особенностей распределения гидрофизических и биогеохимических параметров морской среды в зависимости от фаз прилива в Онежском заливе Белого моря в сентябре.

Онежский залив – мелководный район Белого моря (мельче только Мезенский залив) с глубинами на большей его части менее 40 м, подверженный вертикальному перемешиванию во все сезоны года благодаря морфометрическим особенностям и приливной динамике [3]. Стратификация вод выражена в северной части Онежского залива летом, в проливах Западная и Восточная Соловецкие Салмы (рис. 1).

На севере, в районе Соловецких о-вов, расположена фронтальная зона [4], препятствующая свободному водообмену Онежского залива с Бассейном (глубоководный район моря, расположенный севернее Соловецких о-вов). В южной части залива находится фронтальная зона, существующая за счет стока

р. Онега, третьей по объему стока реки на водосборе Белого моря после Северной Двины и Мезени. Примерно полгода большая часть Онежского залива покрыта льдом, преимущественно это дрейфующий торосящийся лед, однако припай занимает значительное пространство.



Р и с. 1. Расположение станций в Западной Соловецкой Салме (разрез 1 – ст. 1-1 – 1-6) и Онежском заливе (разрез 2 – ст. 2-1 – 2-5). На врезке показан район исследования в Белом море
F i g. 1. Location of stations in the Western Solovetskaya Salma (section 1 – stations 1-1 – 1-6) and the Oнежskiy Bay (section 2 – stations 2-1 – 2-5). The inset shows the area under study in the White Sea

Морфометрические особенности юго-восточного побережья Онежского залива способствуют активному удержанию вещества в течение нескольких месяцев (так называемая своеобразная «гидродинамическая ловушка») [5]. Здесь небольшие глубины (меньше 20 м), много островов. Поморский берег более изрезан по сравнению с Онежским берегом, вдоль которого действует мощное стоковое течение, направленное на север.

Материалы и методы

Комплексные исследования на двух разрезах, в проливе Западная Соловецкая Салма (разрез 1) и в Онежском заливе с севера на юг (разрез 2) (рис. 1), были выполнены 6–11 сентября 2019 г. в рейсе НИС «Эколог». Проведены синхронные измерения гидрологических характеристик (температура, соленость); определены биогеохимические параметры (содержание хлорофилла *a* (Хл),

биогенных элементов – минеральных и органических форм азота и фосфора), концентрация кислорода; изучен таксономический состав, численность и биомасса фитопланктона (ФП), включая вертикальное распределение в пределах фотической зоны, а также таксономический состав и численность зоопланктона.

Гидрофизические измерения выполнялись с использованием зондов *CTD90M Sea&Sun Technology* (Германия), *CTD RBRconcerto* (Канада), *CTD CastAway* (США), при помощи которых на всех станциях были получены профили вертикального распределения температуры, солености, мутности, Хл, на большей части станций – содержание растворенного кислорода.

Гидрохимические исследования были выполнены на отдельных станциях (1-1, 1-4, 1-6, 2-1, 2-3, 2-5), пробы воды на которых отбирали отдельно в фазу прилива и в фазу отлива из поверхностного и придонного горизонтов. Определение ионов аммония¹, нитритов² и минерального фосфора (Р_{мин})³ осуществлялось непосредственно в лаборатории НИС, тогда как анализы нитратов⁴, общего азота (N_{общ})⁵ и общего фосфора (Р_{общ})⁶ проводили после экспедиции в стационарной лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН.

Для оценки видового состава и параметров обилия фитопланктона, а также определения содержания Хл и биогенных элементов пробы воды отбирали 5-литровым батометром Нискина. Отбор 46 проб для определения Хл был выполнен на 6 станциях. Для определения качественного состава и количественных характеристик ФП были отобраны 138 проб с трех или четырех горизонтов (поверхностный, над и под пикноклином, придонный) на тех же станциях. Концентрацию Хл определяли флуориметрически в ацетоновом экстракте до и после подкисления водным 1N раствором HCl [6], используя флуориметр *Trilogy Turner Designs* (США). Пробы воды объемом 0,5–1 л осаждали на фильтры GF/F фирмы *Whatman* под вакуумом при разряжении 0,3 атм. После фильтрации фильтры высушивали при комнатной температуре в течение одного – двух часов, замораживали и хранили в жидком азоте для последующего определения в лабораторных условиях. Экстрагирование проводили 90%-ным водным раствором ацетона в течение суток. Для исследования ФП пробы воды

¹ РД 52.24.383-2018. Массовая концентрация аммонийного азота в водах. Методика измерений фотометрическим методом в виде индофенолового синего. Введ. 2018-02-04. Ростов н/Д, 2018. 47 с.

² РД 52.24.518-2008. Массовая концентрация нитритов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с сульфаниламидом и N-(1-нафтил) этилендиамина дигидрохлоридом. Введ. 2008-01-02. Ростов н/Д, 2008. 30 с.

³ РД 52.24.382-2006. Массовая концентрация фосфатов и полифосфатов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом. Введ. 2006-27-03. Ростов н/Д, 2006. 28 с.

⁴ РД 52.24.523-2009. Массовая концентрация нитратов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с сульфаниламидом и N-(1-нафтил) этилендиамина дигидрохлоридом после восстановления в кадмиевом редукторе. Введ. 2009-01-12. Ростов н/Д, 2009. 34 с.

⁵ РД 52.24.532-2016. Массовая концентрация общего азота в водах. Методика измерений спектрофотометрическим методом с минерализацией проб в терморекторе. Введ. 2017-10-07. Ростов н/Д, 2016. 34 с.

⁶ РД 52.24.387-2006. Массовая концентрация фосфора общего в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом после окисления персульфатом калия. Введ. 2006-01-04. Ростов н/Д, 2006. 27 с.

(объемом 1 л) концентрировали методом обратной фильтрации ⁷ в камере, оснащенной ядерным мембранным фильтром (разработан Объединенным институтом ядерных исследований, г. Дубна) с диаметром пор 2 мкм. Концентрированные пробы фиксировали раствором Люголя и просчитывали под световым микроскопом Микромед 3 в камере Ножотта объемом 0,05 мл при увеличении $40 \times 10 \times 0,65$. Линейные размеры клеток измеряли окуляр-микрометром. Идентификацию проводили до возможного наиболее низкого таксономического ранга, используя современные определители морского фитопланктона ⁸. Объем клеток рассчитывали, исходя из объема соответствующих стереометрических фигур [7]. Клеточное содержание углерода рассчитывали по объемам клеток с использованием аллометрических зависимостей и учетом систематической принадлежности водорослей [8]. Данные зондирования были использованы для определения глубины эвфотической зоны (*Zeu*) (1% ФАР). На станциях, на которых не проводились зондирования, *Zeu* восстанавливали по региональной эмпирической зависимости значений коэффициента диффузного ослабления нисходящей облученности (*Kd*) от глубины видимости диска Секки [9].

Пробы зоопланктона отбирали на станциях 1-6, 1-1, 2-3 и 2-5 в разные фазы приливного цикла (малая и полная вода) с использованием сети Джели с диаметром входного отверстия 37 см и ячейей фильтрующего сита 100 мкм, фиксировали формалином (2–4%) и обрабатывали счетным методом. Объем пробы доводили до 200 мл, брали из нее 3 аликвоты по 1 мл, в которых подсчитывали массовые формы (> 5–10 экз. на аликвоту), затем во всей пробе считали менее многочисленных животных.

Результаты и обсуждение

В период измерений температура верхнего 10-метрового слоя воды составила 9°C на самой мористой станции 1-6, 10,5°C – на ст. 1-1, 3–14°C – на ст. 2-3 и 2-5 (самая южная станция разреза 2). Разность между поверхностной и придонной температурой составила ~ 3°C на разрезе 1 и 2,5°C – на разрезе 2. Поэтому распределение температуры с некоторым допущением характеризует ситуацию во всей толще воды. Эти данные качественно хорошо согласуются со значениями, полученными нами в сентябре 2017 г. [2], а именно: температура колебалась в диапазоне 4,5–11,5°C, соленость – в диапазоне 24–25,5 в зависимости от расположения станции. Наиболее холодные участки поверхностного слоя отмечены в северной части Онежского залива, наиболее теплые – в центральной и южной частях. Вертикальное распределение температуры в центральной части залива отличалось относительной гомотермией. В северной части Западной Соловецкой Салмы температура с глубиной понижалась, а в вершине Онежского залива теплые воды у поверхности были «накрыты» слоем холодных вод.

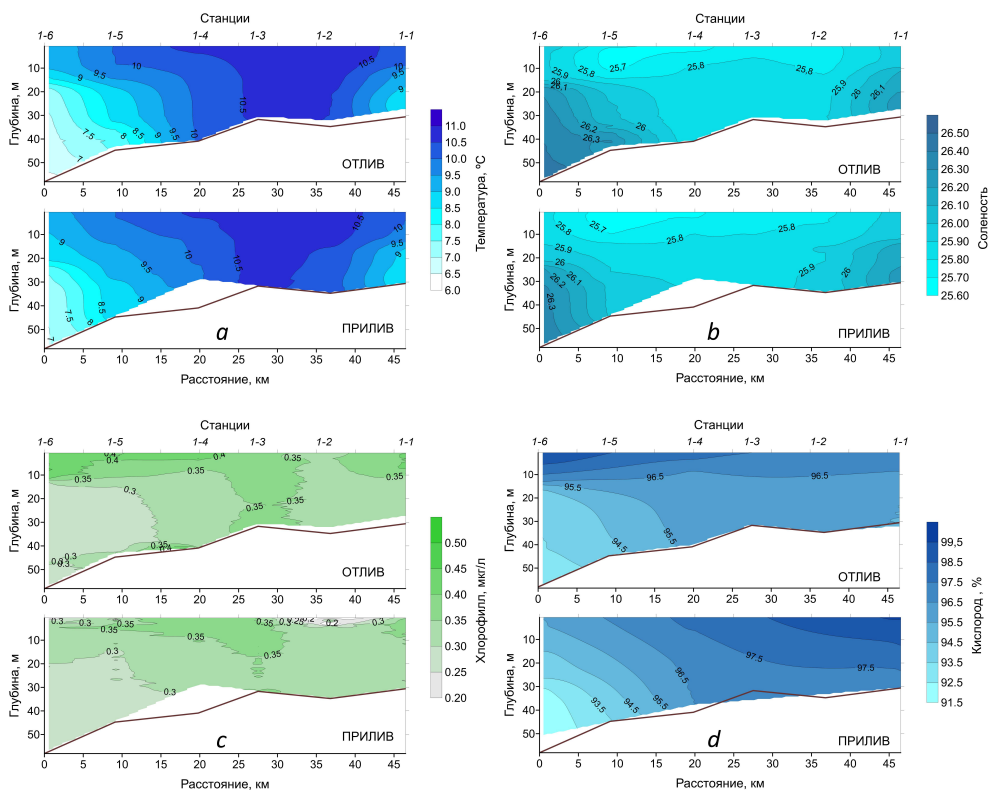
⁷ Радченко И. Г., Капков В. И., Федоров В. Д. Практическое руководство по сбору и анализу проб морского фитопланктона. Москва : Мордвинцев, 2010. 60 с.

⁸ Horner R. A. Marine Phytoplankton. Selected Microphytoplankton Species from the North Sea Around Helgoland and Sylt, Kleine Senckenberg-Reihe 49, M. Hoppenrath, M. Elbrachter, G. Drebes, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany (2009), 264 pp., ISBN: 978-3-510-61392-2 // Harmful Algae. 2010. Vol. 9, iss. 2. P. 240–241. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2009.09.004>

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 39 № 4 2023 517

Максимальная соленость в 2019 г. зарегистрирована на ст. 1-1 и 1-6 (~ 26 на поверхности). Минимальные значения наблюдались на ст. 2-3 (22 в отлив и 24 в прилив). На ст. 2-5 соленость на поверхности была 25 в прилив и в отлив. Между поверхностью и дном различия не превышали 0,5 на разрезе 1, на ст. 2-3 градиент солености составил 1 в прилив и 3 в отлив. На ст. 2-5 наблюдалась полная гомогенность водной толщи.

Согласно многолетним данным [3], в начале сентября температура поверхностного слоя в Онежском заливе составляет ~ 7°C, соленость – 26. В это время года, как правило, вода в центральной части залива хорошо перемешана в силу воздействия динамики, в Соловецких Салмах (проливы с востока и запада от Соловецких о-вов) наблюдается стратификация вод, наиболее хорошо выраженная на границе с Бассейном (рис. 2).



Р и с. 2. Распределение температуры (a), солености (b), хлорофилла a (c) и кислорода (d) в фазу прилива и отлива на разрезе 1

F i g. 2. Distribution of temperature (a), salinity (b), chlorophyll a (c) and oxygen (d) during the phase of high and low tide along section 1

На разрезе 2 (рис. 3) в Онежском заливе ярко выраженная неоднородность температуры воды, вероятно, связана с Онежской фронтальной зоной, на что указывает разница в температурах между ст. 2-1 и 2-2, составляющая 2°C.

Распределение температуры на разрезе также подвержено сильной приливной изменчивости: на ст. 2-2 температурная аномалия простирается до горизонта 20 м в прилив, а в отлив глубина ее проникновения уменьшается до

5 м. Аналогичная картина наблюдается и в поле солёности, что может служить доказательством проявления наблюдаемых неоднородностей в связи с влиянием гидрологической фронтальной зоны.

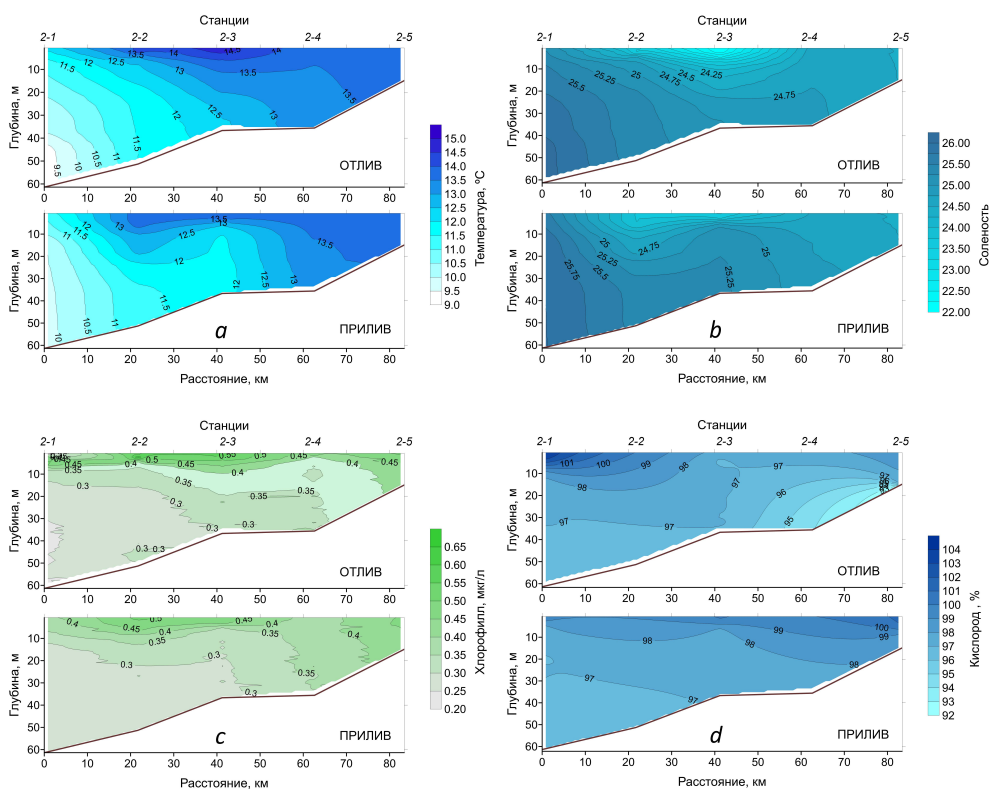


Рис. 3. Распределение температуры (a), солёности (b), хлорофилла *a* (c) и кислорода (d) в фазу прилива и отлива на разрезе 2
Fig. 3. Distribution of temperature (a), salinity (b), chlorophyll *a* (c) and oxygen (d) during the phase of high and low tide along section 2

В сентябре 2017 г. [2] в южной части Онежского залива выделялись распресненные (до 22) поверхностные воды в виде ограниченной в пространстве прослойки толщиной 5–10 м. Под влиянием приливно-отливных течений происходило значительное (8–9 км) изменение положения Онежского фронтального раздела. Стоит отметить, что динамика концентрации хлорофилла *a* совпадала с динамикой солёности.

Содержание биогенных элементов (БЭ) на обоих разрезах было близким (табл. 1). В распределении форм азота преобладала органическая, концентрация $N_{\text{орг}}$ изменялась в диапазоне 0,62–0,83 мг N/л. Наблюдалось 2-3-кратное увеличение концентрации нитратов от поверхности ко дну на глубоководной ст. 1-6.

Данная закономерность, как правило, характерна для весенне-летнего периода. Концентрация нитритов и ионов аммония была низкая и практически не отличалась в разные фазы приливного цикла. Содержание общего фосфора

на обоих разрезах изменялось в пределах 14–29 мкг/л, его максимальная концентрация наблюдалась на ст. 2-5 (29 мкг/л), что обусловлено влиянием р. Онега, и в поверхностном слое на ст. 1-1 в фазу отлива (28 мкг/л). Соотношение минеральной и органической форм фосфора было в основном 1:1, за исключением преобладания его минеральных форм в придонном слое воды на глубоководных станциях 1-6 и 2-1 в фазу прилива и органических форм – на поверхности на ст. 1-6 и 1-1, а также у дна на ст. 2-5 в фазу отлива.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Концентрация биогенных элементов в Онежском заливе в сентябре 2019 года
Nutrients concentrations in the Onezhskiy Bay in September, 2019

Номер разреза / Section number	NH ₄ ⁺	NO ₂	NO ₃	N _{орг} / N _{орг}	N _{общ} / N _{total}	P _{мин} / P _{мин}	P _{орг} / P _{орг}
Разрез 1 / Section 1	<u>0,009 (0,002)</u> 0,005-0,011	<u>0,002 (0,0004)</u> 0,002-0,003	<u>0,03 (0,02)</u> <0,01-0,08	<u>0,72 (0,06)</u> 0,62-0,83	<u>0,75 (0,06)</u> 0,69-0,86	<u>9 (2)</u> 5-12	<u>9 (4)</u> 5-19
Разрез 2 / Section 2	<u>0,008 (0,002)</u> 0,005-0,011	<u>0,001 (0,0005)</u> <0,001-0,002	<u>0,02 (0,01)</u> <0,01-0,03	<u>0,71 (0,06)</u> 0,62-0,81	<u>0,73 (0,05)</u> 0,66-0,84	<u>10 (2)</u> 6-11	<u>9 (3)</u> 6-18

П р и м е ч а н и е. В числителе указаны средние значения и стандартное отклонение (в скобках), в знаменателе – пределы колебаний; P_{мин} и P_{орг} – в мкг/л, остальные параметры – в мг N/л.

N o t e. The numerator indicates the average values and the standard deviation (in parentheses), the denominator – the fluctuation limits; P_{min} and P_{org} – in µg/l, the other parameters – in mg N/l.

Концентрация биогенных элементов в Онежском заливе
в сентябре 2019 года

Концентрация хлорофилла *a* на поверхностном горизонте Онежского залива изменялась в диапазоне 0,35–0,83 мг/м³. Его среднее содержание в фазу прилива и отлива составило 0,52 ± 0,18 и 0,55 ± 0,15 мг/м³ соответственно и статистически достоверно не различалось (рис. 4). Среднее содержание Хл в фотическом слое в полную и малую воду составило соответственно: на разрезе 1 0,51 ± 0,17 и 0,49 ± 0,04 мг/м³, на разрезе 2 – 0,55 ± 0,13 и 0,58 ± 0,13 мг/м³. В Западной Соловецкой Салме (разрез 1) наибольшие значения Хл были отмечены на поверхностном горизонте как в фазу прилива, так и в фазу отлива. Исключение составила ст. 1-1, где максимальная концентрация Хл (0,46 мг/м³) была выявлена на горизонте 5 м в фазу отлива. В юго-восточной части Онежского залива (разрез 2) наибольшее значение Хл (0,83 мг/м³) отмечено в поверхностном слое на ст. 2-5 в фазу отлива.

В 2017 г. [2] содержание хлорофилла *a* в сентябре колебалось от 0,34 мг/м³ на поверхности до 0,26 мг/м³ в придонном горизонте Онежского залива. Максимальные значения Хл (> 0,5 мг/м³) наблюдались в районе Онежской фронтальной зоны, образованной стоком р. Онега. Эти значения несколько ниже по сравнению с данными 2019 г., но и сроки проведения отличаются почти на две недели: в 2017 г. – с 18 сентября, в 2019 г. – с 6 сентября.

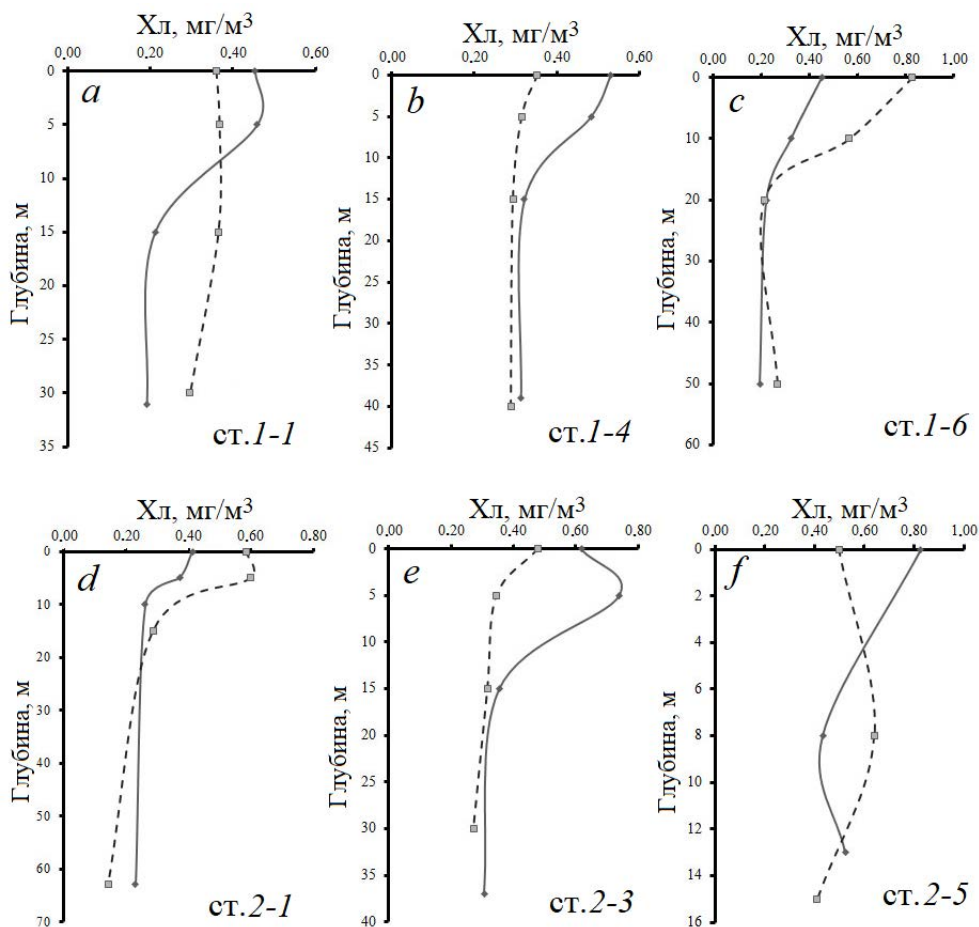


Рис. 4. Вертикальное распределение хлорофилла *a* на станциях разреза 1 (*a – c*) и разреза 2 (*d – f*) Онежского залива Белого моря (сплошные линии – во время отлива, штриховые – во время прилива)

Fig. 4. Vertical distribution of chlorophyll *a* at the stations of section 1 (*a – c*) and section 2 (*d – f*) in the Onegzhskiy Bay of the White Sea (solid lines – during low tide, dashed lines – during high tide)

Основные изменения концентрации БЭ в фотическом слое связаны с различной интенсивностью продукционно-деструкционных процессов в зависимости от сезона: минимальное содержание минеральных форм азота и фосфора наблюдается в весенне-летний период, тогда как осенью происходит их накопление. В сентябре 2019 г. поверхностный слой воды был еще достаточно прогрет (рис. 2, *a*), в результате чего там преобладали продукционные процессы (что подтверждается данными по содержанию БЭ и Хл), но они были меньшей интенсивности по сравнению с летним периодом. Для сравнения: летом 2007–2011 гг. концентрация минеральных форм БЭ была ниже, чем в сентябре 2019 г., и в среднем содержание NO_3^- составило 0,01 мг N/л, $P_{\text{мин}}$ – 5 мкг/л [10]. В придонном слое на глубоководных станциях преобладали деструкционные процессы, сопровождающиеся накоплением минеральных форм БЭ.

Фитопланктон в сентябре 2019 г. был представлен 84 таксонами эукариотических водорослей. Наибольшим видовым богатством характеризовались диатомовые (39 таксонов) и динофитовые водоросли (32 таксона). Кроме того, присутствовали эвгленовые, зеленые, криптофитовые, диктиофитовые, хризофитовые водоросли с числом таксонов в каждой из групп, не превышающим трех. Отмечена также *Ebria tripartita* – водоросль неясного таксономического положения. Цианопрокариоты, которые были встречены только на ст. 2-1 ниже фотической зоны, представлены одним родом – *Oscillatoria spp.* Помимо этого некоторые мелкоклеточные формы (3–8 мкм) не удалось идентифицировать даже до самого высокого ранга, они были объединены в группу мелких не идентифицированных видов (нв) водорослей.

На обоих разрезах – в Западной Соловецкой Салме (разрез 1) и Онежском заливе (разрез 2) – пробы отбирались в полную и малую воду с целью оценки воздействия приливной динамики на обилие фитопланктона. Глубина фотического слоя (1% ФАР) на разрезах колебалась в интервале 3–10 м. Биомасса была относительно невысокой и существенно изменялась на разных станциях в пределах одного разреза (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Table 2

Средние значения биомассы ФП (БФП, мг С/м³) и концентрации хлорофилла *a* (Хл, мг/м³) в фотическом слое, вклад в суммарную биомассу доминирующих видов и групп водорослей (цифры в скобках, %) в полную и малую воду
Average values of PP biomass (PPB, mg C/m³) and chlorophyll *a* concentration (Chl, mg/m³) in the photic zone, the contribution of dominating species and algae groups to the total biomass (numbers in parentheses, %) during high and low water

Номер станции / Station number	БФП / PPB	Хл / Chl	Доминирующие виды и группы / Dominating species and groups	БФП / PPB		Хл / Chl		Доминирующие виды и группы / Dominating species and groups
				Полная вода / High water		Малая вода / Low water		
Западная Соловецкая Салма / Western Solovetskaya Salma								
1-1	7,72	0,42	<i>Thalassiosira spp.</i> 1 (32)	1,04	0,46	<i>Thalassiosira spp.</i> 1 (37)		
1-4	7,11	0,40	<i>Heterocapsa rotundata</i> (12) <i>Thalassiosira spp.</i> 1 (14)	6,37	0,53	<i>Heterocapsa rotundata</i> (14) <i>Thalassiosira spp.</i> 1 (13)		
1-6	5,44	0,70	нв * (20) / ns * (20)	23,02	0,49	<i>Thalassiosira nordenskioldii</i> (26)		
Онежский залив / Onezhskiy Bay								
2-1	9,67	0,66	<i>Thalassiosira spp.</i> 1 (20)	31,97	0,43	<i>Chaetoceros curvisetus</i> (22)		
2-3	5,27	0,41	нв (17) / ns (17)	11,43	0,68	<i>Gymnodinium spp.</i> (20)		
2-5	9,27	0,57	криптофитовые (22) / cryptophytes (22)	6,42	0,63	криптофитовые (24) / cryptophytes (24)		

* нв – не идентифицированные виды мелких жгутиковых.

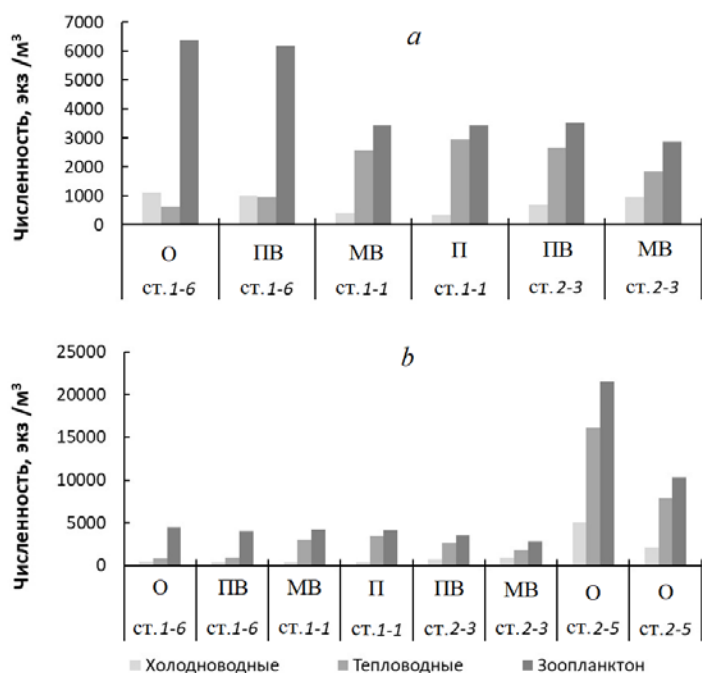
* ns – non-identified species small flagellates.

В Западной Соловецкой Салме в фотическом слое средние значения биомассы ФП в полную и малую воду составили $6,75 \pm 1,18$ и $10,25 \pm 11,34$ мгС/м³, в Онежском заливе $8,07 \pm 2,43$ и $16,61 \pm 13,54$ мгС/м³ соответственно. На обоих разрезах биомасса ФП в малую воду была выше, чем в полную (рис. 4), однако

различия были статистически не достоверны ($p > 0,05$). В составе сообществ по биомассе доминировали диатомовые и динофитовые водоросли. Основной вклад вносили диатомеи родов *Thalassiosira* (*T. nordenskioldii*, *Thalassiosira spp.*), 13–37% суммарной биомассы ФП, и *Chaetoceros* (22%), а также динофлагелляты, представленные в основном *Heterocapsa rotundata* (до 14%) и *Gymnodinium spp.* (до 20%).

Комплекс доминирующих видов в целом не менялся при разных фазах приливного цикла. Исключение составила самая южная станция разреза 2 (ст. 2-5), находящаяся под влиянием стока р. Онеги, где в состав доминирующих групп вошли относительно крупные (> 10 мкм) криптофитовые водоросли. Их вклад в суммарную биомассу колебался в диапазоне 13–31% на разных горизонтах.

Мезозоопланктон был представлен 16 таксонами уровня вида и рода и 7 таксонами более высокого уровня (в основном это личинки донных беспозвоночных). Веслоногие ракообразные доминировали в мезозоопланктоне на всех станциях как по обилию, так и по числу видов. Суммарная численность зоопланктона достигала наибольших значений (21500 экз/м³) на ст. 2-5 (рис. 5), расположенной наиболее близко к вершине залива.



Р и с. 5. Распределение и динамика численности основных экологических группировок, суммарной численности зоопланктона в Онежском заливе в слое 0–20 м (а) и в слое 0–10 м (б) (на ст. 2-3 слой воды 0–30 м). Обозначения: О – отлив, ПВ – полная вода, МВ – малая вода, П – прилив

F i g. 5. Distribution and dynamics of the abundance of basic ecological groups and total abundance of zooplankton in the Onegzhskiy Bay in the 0–20 m layer (a) and in the 0–10 m layer (b) (at stations 2-3, the water layer is 0–30 m). Designations: LT – low tide, HW – high water, LW – low water and HT – high tide

Слой 0–10 м рассмотрен для сравнения со ст. 2-5 в куту залива, где пробы отбирали в слое 0–11 м. На этой станции в массе присутствовали бореальные виды и *Pseudocalanus spp.* Весь мезозоопланктон можно разделить на две экологические группы по отношению к температуре – холодноводную и тепловодную [11]. Принадлежность конкретного вида к той или иной группировке поможет объяснить его распределение в заливе и динамику численности. В холодноводную группу входят арктические виды *Calanus glacialis* и *Metridia longa*, бореально-арктические *Pseudocalanus spp.*, *Triconia borealis* и *Parasagitta elegans*. Тепловодные организмы представлены бореальными копеподами *Temora longicornis*, *Centropages hamatus*, *Acartia longiremis*, кладоцерами *Evadne nordmanni*, *Podon leuckarti* и *Pleopis polyphaemoides*, аппендикуляриями *Fritillaria borealis*, а также космополитом *Microsetella norvegica* (*Copepoda*). Высокая численность холодноводных организмов отмечена как на границе с Бассейном, так и в южной части разреза 2 (ст. 2-5), причем здесь из холодноводных животных встречались только виды рода *Pseudocalanus* (97–100% численности группировки). Тепловодные виды наиболее многочисленны на ст. 2-5 (16000 экз/м³, или 75% зоопланктона), их меньше всего на мористой ст. 1-6 (840 экз/м³ в слое 0–10 м). Такое распределение группировок согласуется с горизонтальным распределением температуры воды.

На рис. 6 и 7 показано распределение холодноводных и тепловодных форм зоопланктона в зависимости от фазы приливного цикла.

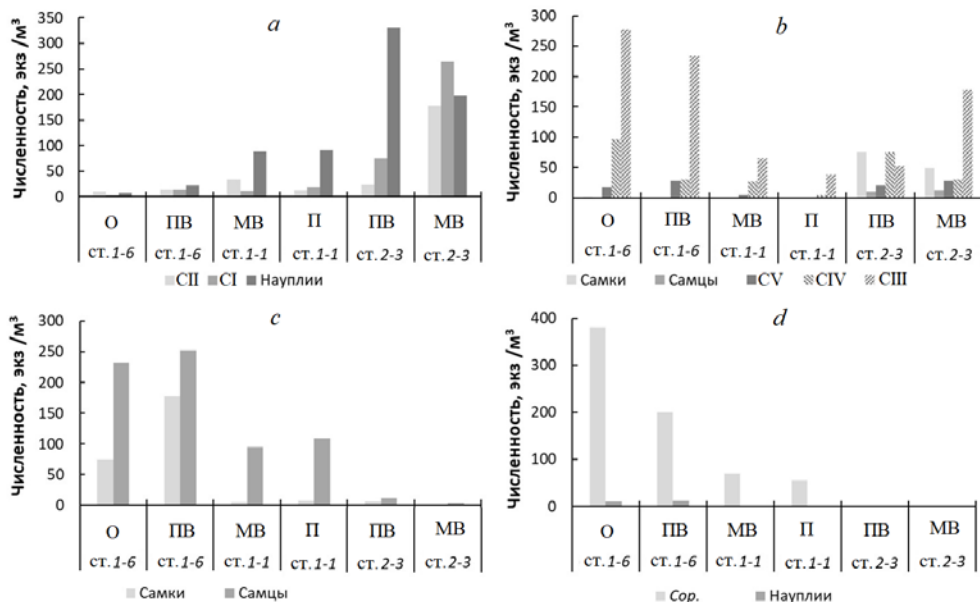
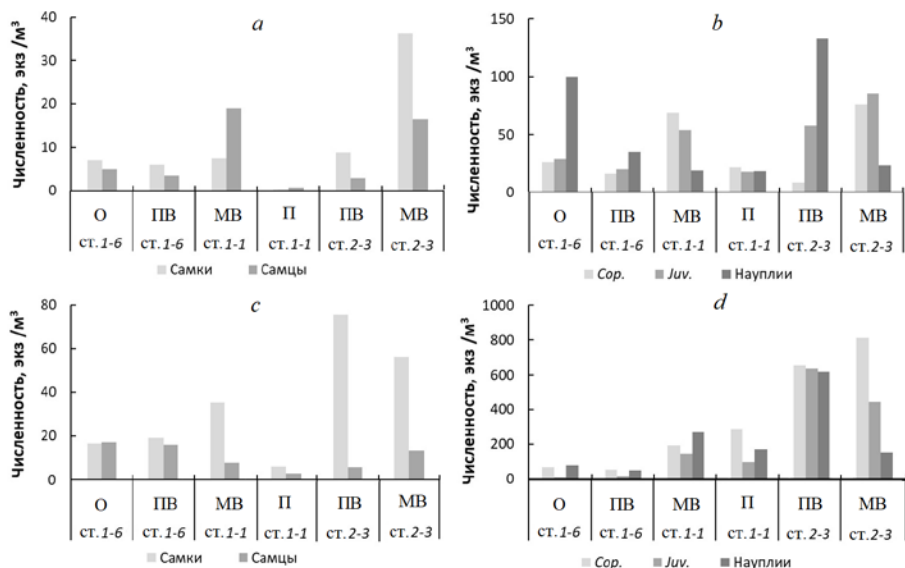


Рис. 6. Распределение и динамика холодноводных видов в Онежском заливе в слое 0–20 м: *a, b* – *Pseudocalanus spp.*; *c, d* – *Triconia borealis*; *Cop.* – старшие копепоидитные стадии (CIV-CV) *Triconia*. Остальные обозначения – на рис. 5

Fig. 6. Distribution and dynamics of cold-water species in the Onegzhskiy Bay in the 0–20 m layer: *a, b* – *Pseudocalanus spp.*; *c, d* – *Triconia borealis*; *Cop.* – older copepodite stages (CIV-CV) of *Triconia*. See other designations on Fig. 5



Р и с. 7. Распределение и динамика тепловодных видов в Онежском заливе в слое 0–20 м: *a, b* – *Temora longicornis*; *c, d* – *Acartia*; *Juv.* – младшие копеподитные стадии (CI–CIII) *Acartia*. Остальные обозначения – на рис. 5 и 6

F i g. 7. Distribution and dynamics of warm-water species in the Onegzhskiy Bay in the 0–20 m layer: *a, b* – *Temora longicornis*; *c, d* – *Acartia*; *Juv.* – junior copepodite stages (CI–CIII) of *Acartia*. The rest of the designations are in Fig. 5 and 6

Распределение *Pseudocalanus spp.* зависит от стадии развития: науплии и CI–CII тяготеют к вершине залива, CIII, CIV и CV многочисленны на самой мористой (на выходе из Западной Соловецкой Салмы) и наиболее южных станциях, самцы и самки в наибольших количествах встречаются ближе к устью р. Онега (самки до 150 экз/м³, самцы – до 12 экз/м³). *Triconia borealis* – бореально-арктический вид, в Белом море является мезопелагическим [12], в течение года придерживается промежуточных и придонных слоев водной толщи. Ожидаемо, этого вида больше всего в открытой части залива, а на юге *T. borealis* практически отсутствовал (на ст. 2–3 отмечены единичные особи, на ст. 2–5 его не было совсем). *Acartia spp.* (*A. longiremis* и *A. bifilosa*) и *Temora longicornis* – типичные бореальные теплолюбивые виды, развиваются из покоящихся яиц в теплое время года [13, 14]. Распределение этих видов соответствует их температурным предпочтениям – они тяготеют к южной части залива, на ст. 2–5 этих видов больше всего (4–6 тыс. экз/м³ после заката солнца, в светлое время суток ~ 2 тыс. экз/м³). В распределении *T. longicornis* закономерности проследить трудно вследствие значительного варьирования численности на разных станциях в разные фазы приливного цикла. Эврибионт *Oithona similis* демонстрировал закономерности лишь в горизонтальном распределении: максимальная численность этого вида была отмечена в самой мористой точке, она уменьшалась по направлению к вершине залива.

Заклучение

1. Впервые проведены в начале осеннего периода комплексные экспедиционные исследования открытой части Онежского залива Белого моря в целях вы-

явления особенностей распределения гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик в условиях интенсивных приливных движений и водообмена через фронтальные зоны южной и северной частей залива.

2. Из биогенных элементов в воде Онежского залива преобладали органические формы азота. Содержание $R_{\text{мин}}$ и $R_{\text{орг}}$ было близким, за исключением преобладания его минеральных форм в придонном слое на глубоководных станциях, что свидетельствует о протекании деструкционных процессов, характерных для осеннего периода. Исключение составляют также органические формы фосфора на поверхности некоторых станций в результате протекания продукционных процессов, что подтверждается данными по содержанию хлорофилла *a*.

3. Фитопланктон Онежского залива был представлен диатомовыми, динофитовыми, криптофитовыми и диктиоховыми водорослями. Наибольшим видовым богатством характеризовались динофитовые и диатомовые водоросли. В проливе Западная Соловецкая Салма преобладали водоросли рода *Thalassiosira* и *Heterocapsa rotundata*. В юго-восточной части Онежского залива доминировали *Chaetoceros curvisetus* и *Thalassiosira spp.*

4. Горизонтальное распределение зоопланктона, в первую очередь тепловодного, соответствовало горизонтальному градиенту температуры воды: в южной части Онежского залива обилие бореальных видов на порядки выше, чем у границы с Бассейном. Из холодноводных видов только *Triconia borealis* соответствует градиенту температуры, тогда как распределение *Pseudocalanus spp.* различается на разных стадиях, что связано с возрастным изменением температурных предпочтений. Суточные миграции зоопланктона выявлены на ст. 2-5: в темное время суток обнаружено значительное повышение обилия всех массовых видов, что соответствует закономерности, характерной и для других морей высоких широт.

5. Выявлено, что влияние фаз приливного цикла в исследуемом районе на пространственно-временную изменчивость характеристик морской среды проявлялось следующим образом:

- толщина слоя поверхностных аномалий температуры и солёности во фронтальной зоне южной части залива изменялась в пределах 0–15 м;
- изменение солёности в распресненных областях составляло ~ 2;
- положение Онежского фронтального раздела смещалось на 8–9 км;
- соотношение минеральной и органической форм фосфора в определенных местах отклонялось от среднего по району (1:1);
- изменения концентрации нитритов, ионов аммония и хлорофилла *a* были статистически незначимы;
- изменения биомассы фитопланктона были также статистически незначимы;
- состав доминирующих видов фитопланктона не менялся;
- *Temora longicornis* демонстрировала значительное изменение численности на разных станциях и в разные фазы приливного цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система Белого моря. Т. 3. Рассеянный осадочный материал гидросферы, микробные процессы и загрязнения. М. : Научный мир, 2013. 690 с.
2. Исследование особенностей динамики фронтальных разделов и фронтальных зон под действием полусуточного приливного цикла в Белом море / Р. Э. Здоровеннов [и др.] // Тезисы доклада на конференции «Итоги экспедиционных исследований на научных судах ФАНО России», Москва, 21–22 февраля 2018 года. Севастополь, 2018. С. 78–83.

3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря СССР». Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л. : Гидрометеоздат, 1991. 240 с.
4. *Зимин А. В.* Субприливные процессы и явления в Белом море. М. : Геос, 2018. 220 с.
5. *Chernov I., Tolstikov A., Iakovlev N.* Modelling of tracer transport in the White Sea // Environment. Technology. Resources : proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference. Rezekne, Latvia, 2017. Vol. 1. P. 54–58. doi:10.17770/etr2017vol1.2594
6. *Arar E. J., Collins G. B.* Method 445.0: *In vitro* Determination of Chlorophyll *a* and Pheophytin *a* in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence. Revision 1.2. Cincinnati, OH : United States Environmental Protection Agency, 1997. 22 p.
7. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae / H. Hillebrand [et al.] // Journal of Phycology. 1999. Vol. 35, iss. 2. P. 403–424. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.1999.3520403.x>
8. *Menden-Deuer S., Lessard E. J.* Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton // Limnology and Oceanography. 2000. Vol. 45, iss 3. P. 569–579. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.3.0569>
9. Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: Development and skill assessment of regional algorithms / A. B. Demidov [et al.] // Journal of Sea Research. 2017. Vol. 125. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2017.05.004>
10. *Кравченко И. Ю.* Биогенные элементы и органическое вещество в воде прибрежной части Белого моря // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. С. 274–276.
11. *Зубаха М. А., Усов Н. В.* Температурные оптимумы массовых видов зоопланктона Белого моря // Биология моря. 2004. Т. 30, № 5. С. 347–351.
12. *Прыгункова Р. В.* Некоторые особенности сезонного развития зоопланктона губы Чупа Белого моря // Сезонные явления в жизни Белого и Баренцева морей. Л. : Наука, 1974. С. 4–55. (Исследование фауны морей; т. 13(21)).
13. *Перцова Н. М.* К экологии бореальных копепод *Centropages hamatus* Lilljeborg и *Temora longicornis* Muller в Белом море и в пределах ареала // Биологические ресурсы Белого моря : Труды Беломорской биологической станции МГУ. 1990. Вып. 7. С. 80–92.
14. *Прудковский А. А.* Жизненный цикл *Acartia bifilosa* (Copepoda, Calanoida) в Белом море (губа Чернореченская, Кандалакшский залив) // Труды Беломорской биологической станции имени Н. А. Перцова. М. : Изд-во Моск. ун-та, 2003. Т. 9. С. 164–168.

Об авторах:

Толстиков Алексей Владимирович, руководитель лаборатории географии и гидрологии, ИВПС КарНЦ РАН (185030, Россия, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7690-3404**, **Scopus Author ID: 10639972700**, **ResearcherID: J-4579-2018**, alexeytolstikov@mail.ru

Галахина Наталия Евгеньевна, старший научный сотрудник, лаборатория гидрохимии и гидрогеологии, ИВПС КарНЦ РАН (185030, Россия, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50), кандидат химических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4435-6095**, kulakovanata@mail.ru

Белевич Татьяна Алексеевна, ведущий научный сотрудник, МГУ (119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0003-1082-900X**, **Scopus Author ID: 16686334900**, **ResearcherID: T-1008-2017**, 3438083@list.ru

Усов Николай Викторович, старший научный сотрудник, Зоологический институт РАН (199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 1), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0001-5093-5603**, **Scopus Author ID: 7005293293**, nikolay.usov@gmail.com

Здоровеннов Роман Эдуардович, старший научный сотрудник, лаборатория гидрофизики, ИВПС КарНЦ РАН (185030, Россия, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-1695-4872**, **Scopus Author ID: 8847365600**, **ResearcherID: L-8294-2013**, romga74@gmail.com