



[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-8)

EDN VTSXBC

УДК 551.46.06

© А. В. Зимин<sup>1,2\*</sup>, О. А. Атаджанова<sup>1</sup>, А. А. Коник<sup>1</sup>, О. Б. Тепнин<sup>1,3</sup>, 2025

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

<sup>3</sup>Камчатский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», 683000, Петропавловск-Камчатский, ул. Набережная, д. 18

\*zimin2@mail.ru

## Оценка точности глобальных океанических реанализов в воспроизведении температуры и солености вод Авачинского залива (Тихий океан)

Статья поступила в редакцию 24.03.2025, после доработки 10.07.2025, принята в печать 13.08.2025

### Аннотация

Цель работы — оценка точности воспроизведения вертикального распределения температуры и солености вод Авачинского залива (Тихий океан) в прибрежной части акватории по данным двух глобальных океанических продуктов реанализа: CMEMS GLORYS12v1 и GOFS3.1. В качестве независимых данных использовались результаты *in situ* измерений, выполненных по повторяющейся сетке станций в апреле 2019 и 2020 гг. Результаты показали, что оба продукта воспроизводят общие тенденции в изменении термохалинных характеристик, однако точность варьируется в зависимости от глубины и района. Средняя аномалия по температуре составила 0,6 °С для CMEMS GLORYS12v1 и 0,4 °С для GOFS3.1, а по солености — 0,3 ‰ и 0,4 ‰ соответственно. Наибольшие отклонения наблюдались на шельфовых станциях, где продукты реанализа не воспроизводили как средние значения, так и приповерхностный галоклин, что вероятно связано ограничениями разрешающей способности моделей и недостатком данных для точных расчетов. В глубоководной части залива оба продукта демонстрируют более высокую точность, хотя на отдельных станциях отмечаются неточности в воспроизведении характеристик и особенностей вертикальной структуры холодного промежуточного слоя и верхней границы теплого промежуточного слоя. В частности, GLORYS12v1 лучше воспроизводит распределение солености, тогда как GOFS3.1 более точно отражает структуру температуры. Однако оба продукта демонстрируют слабую точность в воспроизведении вертикальной структуры солености на шельфе, что указывает на необходимость более точного учета локальных процессов, таких как сток пресных вод и динамика прибрежных течений. В целом, для отслеживания состояния морских экосистем в глубоководных районах Авачинского залива, включая область каньона Северный, являющуюся эпицентром нереста восточнокамчатской популяции минтая, предпочтительным является использование данных по температуре и солености из продукта GOFS3.1.

**Ключевые слова:** температура, соленость, вертикальная структура вод, GOFS3.1, CMEMS GLORYS12v1, аномалия, функция расхождения, Авачинский залив, Тихий океан

© А. В. Зимин<sup>1,2\*</sup>, О. А. Атаджанова<sup>1</sup>, А. А. Коник<sup>1\*</sup>, О. Б. Тепнин<sup>1,3</sup>, 2025

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117997, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg 199034, Russia

<sup>3</sup>Kamchatka branch of “Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography” (“KamchatNIRO”), 18 Naberezhnaja Str., Petropavlovsk-Kamchatsky 683000, Russia

\*zimin2@mail.ru

Ссылка для цитирования: Зимин А.В., Атаджанова О.А., Коник А.А., Тепнин О.Б. Оценка точности глобальных океанических реанализов в воспроизведении температуры и солености вод Авачинского залива (Тихий океан) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 3. С. 101–113. EDN VTSXBC.

[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-8)

For citation: Zimin A.V., Atadzhanova O.A., Konik A.A., Tepnin O.B. Assessment of the Accuracy of Global Oceanic Reanalysis in Reproducing the Temperature and Salinity of the Waters of the Avacha Bay (the Pacific Ocean). *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(3):101–113. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-8)

## Assessment of the Accuracy of Global Oceanic Reanalysis in Reproducing the Temperature and Salinity of the Waters of the Avacha Bay (the Pacific Ocean)

Received 24.03.2025, Revised 10.07.2025, Accepted 13.08.2025

### Abstract

The objective of this study is to assess the accuracy of reproducing the vertical distribution of temperature and salinity in the waters of Avacha Bay (the Pacific Ocean) in the coastal area, based on data from two global ocean reanalysis products: CMEMS GLORYS12v1 and GOFS3.1. The results of *in situ* measurements performed on a repeating grid of stations in April 2019 and 2020 were used as independent data. The results showed that both products reproduce the general trends in thermohaline characteristics, but the accuracy varies depending on the depth and area. The average temperature anomaly was 0.6 °C for CMEMS GLORYS12v1 and 0.4 °C for GOFS3.1, and for salinity — 0.3 and 0.4, respectively. The largest deviations were observed at the shelf stations, where the reanalysis products failed to reproduce both the mean values and the near-surface halocline. This is likely due to limitations in the models' resolution and a lack of sufficient data for accurate calculations. In the deepwater part of the bay, both products demonstrate higher accuracy, although inaccuracies in reproducing the characteristics and features of the vertical structure of the cold intermediate layer and the upper boundary of the warm intermediate layer are noted at individual stations. In particular, GLORYS12v1 reproduces the salinity distribution better, whereas GOFS3.1 more accurately reflects the temperature structure. However, both products demonstrate poor accuracy in reproducing the vertical structure of salinity on the shelf, which indicates the need for more accurate accounting of local processes such as freshwater runoff and the dynamics of coastal currents. In general, it is preferable to use temperature and salinity data from the GOFS3.1 product to track the state of marine ecosystems in the deep-water areas of Avacha Bay, including the “Northern” canyon area, which is the epicenter of spawning of the East Kamchatka pollock population.

**Keywords:** temperature, salinity, vertical structure of waters, GOFS3.1, CMEMS GLORYS12v1, anomaly, divergence function, Avacha Bay, the Pacific Ocean

### 1. Введение

За последнее десятилетие разработаны многочисленные глобальные системы описания и прогнозирования состояния океана, основанные на гидродинамических моделях, дополненных методами ассимиляции данных. Они интегрируют наблюдательную информацию (спутниковые измерения, показания буев Argo, судовые наблюдения и др.) с численными расчетами, что особенно важно для оценки текущих условий, включая мезомасштабную динамику, и прогноза изменчивости характеристик вод. Среди таких систем можно выделить GOFS3.1 (Global Ocean Forecast System) [1], CMEMS GLORYS12v1 (Copernicus Marine Environment Monitoring Service GLOBAL OCEAN PHYSICS REANALYSIS) [2], GREP (Global Reanalysis Ensemble Product) [3], SODA3 (Simple Ocean Data Assimilation, Version 3) [4]. В отдельном порядке следует отметить систему оперативного анализа температуры поверхности моря и ледового покрова, которая интегрирует спутниковые данные высокого разрешения с наземными (*in situ*) измерениями GHR SST OSTIA (Group for High Resolution Sea Surface Temperature Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) [5]. Результаты работы этих и аналогичных систем, так называемые продукты (наборы пространственно-временных значений характеристик вод), обладают регулярной пространственной структурой и обновляются с постоянной периодичностью. Продукты океанических реанализов и прогнозов представляют собой поля температуры, солёности, течений, уровня моря, льда и других параметров. Их использование привело к прогрессу в изучении изменчивости океана, взаимодействия океана и атмосферы.

Продукты находят применение не только в фундаментальных исследованиях [6–9], но и в различных прикладных областях. Например, они используются для прогнозирования распространения звука, что важно для гидроакустических изысканий и подводной навигации [10]. Также информация применяется для анализа переноса морского мусора [11], помогая решать экологические проблемы (антропогенное загрязнение, перенос водами микропластика и т. п.), при мониторинге распространения радиоактивных материалов, что особенно актуально после аварий на атомных объектах [12].

В сфере изучения рыбных ресурсов такая информация имеет особую ценность. Регулярные по пространству и времени массивы данных позволяют анализировать связь между распределением биоресурсов и океанографическими условиями, такими как температура, солёность и наличие питательных веществ [13–15]. Это помогает изучать выживание, рост и миграцию промысловых видов, что важно для управления запасами и прогнозирования их состояния [16]. Особенно ценны они для оценки изменчивости параметров водной среды в труднодоступных районах, включая большую часть шельфовой зоны дальневосточных морей России. Регулярные данные о среде востребованы для организации рыбохозяйственных мероприятий, таких как выпуск молоди в устьях рек у острова Сахалин [17] или определение сроков нереста минтая

у побережья Камчатки [18, 19]. В частности, информация о температуре воды помогает прогнозировать изменения сроков и интенсивности нереста, выживаемость молоди, что критически важно для корректных оценок его запаса и последующего устойчивого управления промыслом.

Однако получение качественных и точных данных в прибрежной зоне сопряжено с трудностями, к которым можно отнести многофакторность и высокую динамичность океанологических процессов, недостаточную точность данных по батиметрии дна, а также ряд ограничений работы модельных решений и спутниковых алгоритмов. При этом для акватории вблизи Камчатского полуострова, являющейся одним из продуктивных районов дальневосточного рыбопромыслового бассейна, регулярные данные о термохалинных характеристиках с особым акцентом на особенностях их вертикальной структуры, а также о динамике вод крайне востребованы [19–21]. Однако вопрос о качестве и точности таких данных в прибрежной зоне на сегодняшний момент остается открытым. Так, работа [22] показала, что у побережья Авачинского залива для продукта GHRSSST OSTIA, предоставляющего информацию о температуре поверхности воды, наблюдаются значительные расхождения с натурными измерениями, как по горизонтальному распределению, так и по абсолютным значениям. В то же время данные продукта GLORYS12v1 по температуре и солености для шельфа южных Курильских островов демонстрируют хорошее соответствие данным измерений [16], что говорит о потенциальной возможности его использования для схожего района восточной части Тихого океана.

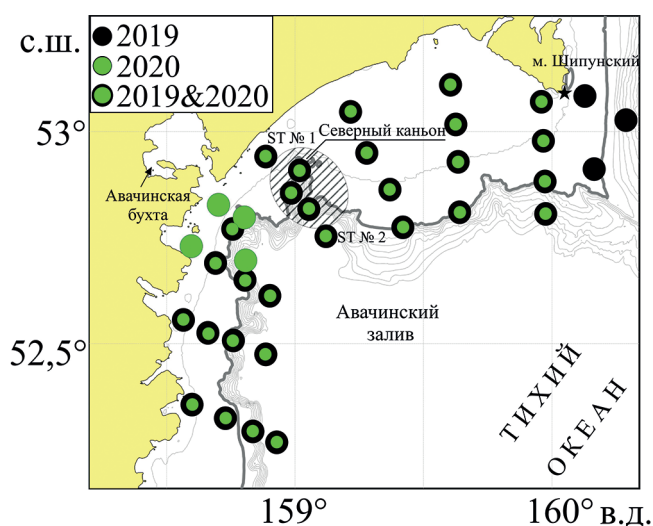
Целью данного исследования является количественное сравнение результатов независимых *in situ* измерений с данными из глобальных океанологических баз для выбора информационного продукта, наиболее достоверно описывающего изменчивость вертикальных профилей температуры и солености на прибрежной акватории Авачинского залива.

## 2. Данные и методы

В качестве эталонных значений для сравнения выступили результаты контактных измерений температуры и солености, выполнявшиеся 14–16 апреля 2019 г. и 20–21 апреля 2020 г. в рамках ежегодных ихтиопланктонных съемок, выполнявшихся специалистами Камчатского филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («КамчатНИРО») в Авачинском заливе Тихого океана. Полигонная съемка в 2019 и 2020 гг. велась на станциях в шельфовой зоне, континентальном склоне и в глубоководной акватории (рис. 1). В каждый из рассматриваемых годов выполнялось по 32 гидрологические станции, однако в 2019 г. несколько станций выполнялись у Авачинской губы, а в 2020 — только у м. Шипунский. В течение обоих лет измерения охватывали как нерестовую зону на шельфовом шельфе, так и глубоководный эпицентр нереста. Для детального описания особенностей вертикальной структуры вод в этих районах были выбраны две станции: станция № 1 — ближайшая мелководная станция к эпицентру нереста, и станция № 2 — ближайшая глубоководная станция к эпицентру.

**Рис. 1.** Батиметрическая карта Авачинского залива: черные точки положения станций *in situ* измерений за период с 14 по 16 апреля 2019 г.; зеленые точки — с 20 по 21 апреля 2020 г.; штрих-областью обозначена зона эпицентра нереста минтая по [18]; ST № 1 — станция в шельфовой зоне; ST № 2 — в глубоководной части. Серыми изобатами обозначены глубины от 100 до 1000 м с интервалом 100 м

**Fig. 1.** Bathymetric map of the Avacha Bay: black dots of *in situ* measurement stations for the period from April 14 to April 16, 2019; green dots from April 20 to April 21, 2020; the barcode area indicates the epicenter of pollock spawning in [18]; ST № 1 is a station in the shelf zone; ST № 2 is in the deep part. Gray isobaths indicate depths from 100 to 1000 m with an interval of 100 m



Методика измерений заключалась в проведении вертикального профилирования толщи вод посредством зондирующего гидрологического комплекса ASTD102 RINKO-Profiler (JFE Advantech Co., Ltd., Япония). Гидрологические работы выполнялись от поверхности до максимально возможного горизонта с заданной дискретностью по глубине, равной 1 м.

Для сравнения с судовыми наблюдениями были выбраны два продукта реанализа. Первый — CMEMS GLORYS12v1<sup>1</sup>, разработанный службой Copernicus Marine Environment Monitoring (Евросоюз). Он включает суточные данные по температуре, солёности, течениям, уровню моря и льду с глобальным охватом в разрешении 1/12° для 50 горизонтов [23]. Модельная основа — NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean). Атмосферный форсинг океанской модели задается атмосферным реанализом ERA-Interim (ECMWF). В процессе создания продукта данные спутниковой альтиметрии, температура поверхности моря, концентрация морского льда и профильные измерения температуры и солёности ассимилируются с использованием фильтра Калмана [24]. Второй — GOF3.1<sup>2</sup>, созданный в Center for Ocean-Atmospheric Prediction Studies Университета штата Флорида (США). В качестве основы данного продукта использовалась модель HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model). В GOF3.1 применяется система ассимиляции данных NCODA (Navy Coupled Ocean Data Assimilation), которая интегрирует большое количество различных наблюдательных данных (спутниковые, буи, корабельные измерения). В указанной версии он содержит 3-часовые гидрофизические поля (температуры, солёности, течений, льда) с глобальным охватом с пространственным горизонтальным разрешением 0,08° долготы × 0,04° широты и вертикальным — 41 горизонт [25]. Для сопоставления использовались значения температуры и солёности в узлах сетки продуктов, ближайших к местам проведения гидрологических станций за дни выполнения контактных измерений. Выполнялся расчёт матрицы расстояний в км от каждой точки *in situ* до каждого центра узла географической сетки реанализа. Из нее выбиралось значение. При этом расстояние до центра узла не превышало 4 км. Затем значения температуры/солёности в точке *in situ* сравнивались с соответствующими значениями в выбранном узле. Значения в узле использовались за дату, к которым относились данные в *in situ* точке. Данные GOF3.1 усреднялись до суточных для единообразия сравнения с CMEMS GLORYS12v1. Стоит отметить, что используемые для сравнения *in situ* данные (результаты CTD измерений) не входят в банк данных, используемых в ассимиляции реанализов GOF3.1 и GLORYS12v1, что делает их независимым эталоном для рассматриваемых продуктов.

Методика сопоставления заключалась в статистическом сравнении разных наборов данных ( $X$ ) с *in situ* ( $I$ ) наблюдениями по вертикали для каждой станции. Для количественного сравнения данные *in situ* профилей приводились к вертикальному шагу каждого из продуктов. Для сравнения использовались ряды данных по станциям от 18 до 32 значений в профиле. Последний горизонт профиля принимался у пары для сравнения по меньшему значению длины ряда. Для каждого профиля температуры и солёности проводился расчёт средневзвешенных значений, дисперсии [26]. На их основе рассчитывались аномалия  $An$  (1) и функция расхождения  $F_{\text{расх}}$  (2).

$$An = \frac{\sum_{j=1}^N |I_j - X_j|}{N}, \quad (1)$$

$$F_{\text{расх}} = \left| \frac{M_I - M_X}{\sqrt{D_I}} \right|, \quad (2)$$

где  $N$  — длина ряда значений в профиле,  $M_I$  и  $D_I$  — средневзвешенное значение и дисперсия *in situ* измерений в профиле  $I$  до предельной глубины, обеспеченной данными соответственно,  $M_X$  — средневзвешенное значение характеристик продукта реанализа в профиле  $X$ ,  $j$  — порядковый номер гидрологической станции. Дополнительно выполнялся анализ данных по глубинам. Результаты были разделены на область шельфа (до глубины 200 м) и глубоководную (более 200 м).

Оценка точности воспроизводства профилей выполнялась по классификации, предложенной в [27], где для функции расхождения используют следующие диапазоны:  $0 \leq F_{\text{расх}} < 1$  (хорошо),  $1 \leq F_{\text{расх}} < 2$  (удовлетворительно) и  $2 \leq F_{\text{расх}}$  (плохо).

### 3. Гидрологические условия на акватории по данным наблюдений

Наличие значительной межгодовой изменчивости характеристик вод на исследуемой акватории иллюстрируется данными, представленными на рис. 2. Так, в разные годы температура воды на приповерхностных горизонтах имела преимущественно положительные значения, при этом наблюдались существен-

<sup>1</sup> Copernicus Marine Data Store | Copernicus Marine Service URL: <https://data.marine.copernicus.eu> (дата обращения: 12.12.2024)

<sup>2</sup> HYCOM URL: ... <https://www.hycom.org> (дата обращения: 18.11.2024)

ные межгодовые различия в средних оценках. В 2019 г. она варьировалась от  $-0,3$  до  $1,7$  °C (рис. 2, а), а в 2020 г. — от  $0,7$  до  $2,6$  °C (рис. 2, б). В целом температура понижалась от берега в сторону открытой части залива, за исключением языка относительно холодных вод, который приближался к берегу в районе Северного каньона. Еще одной характерной особенностью акватории является пятно теплых вод у выхода из Авачинской бухты. Особенностью 2020 г. по сравнению с 2019-м была обширная область теплых вод в северной части залива около мыса Шипунский.

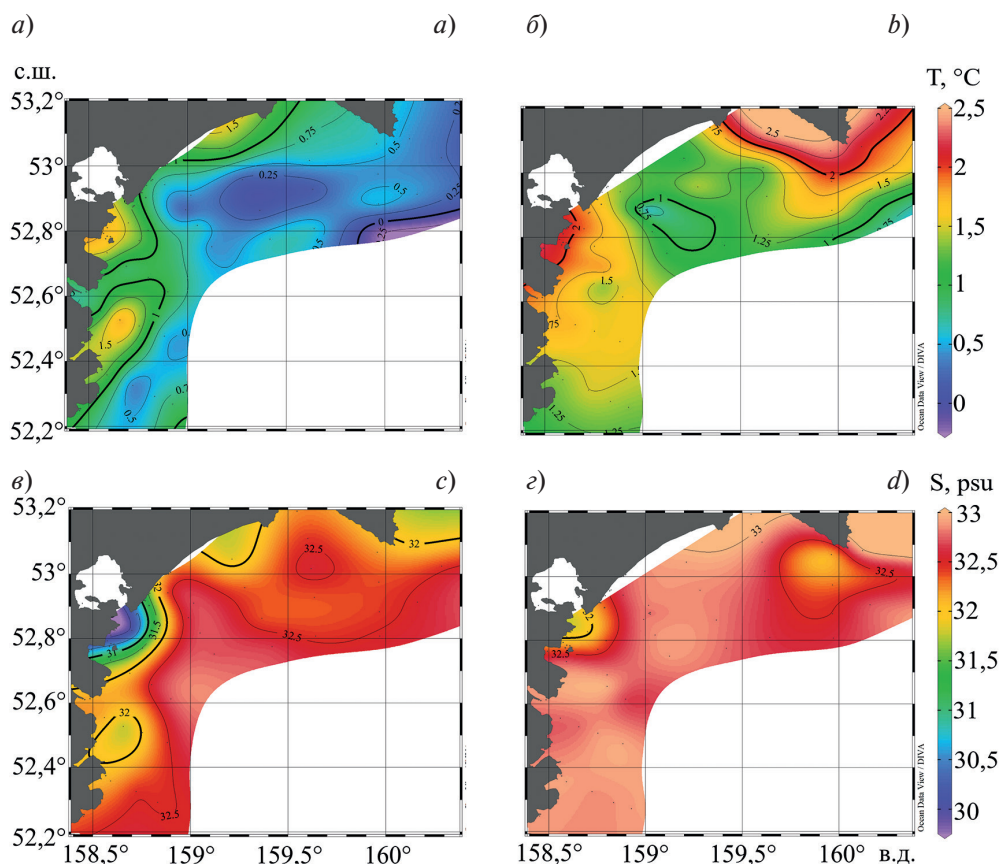


Рис. 2. Распределение температуры в 2019 (а), 2020 (б) и солёности в 2019 (в), 2020 (г) годах по *in situ* наблюдениям на глубине 2 м

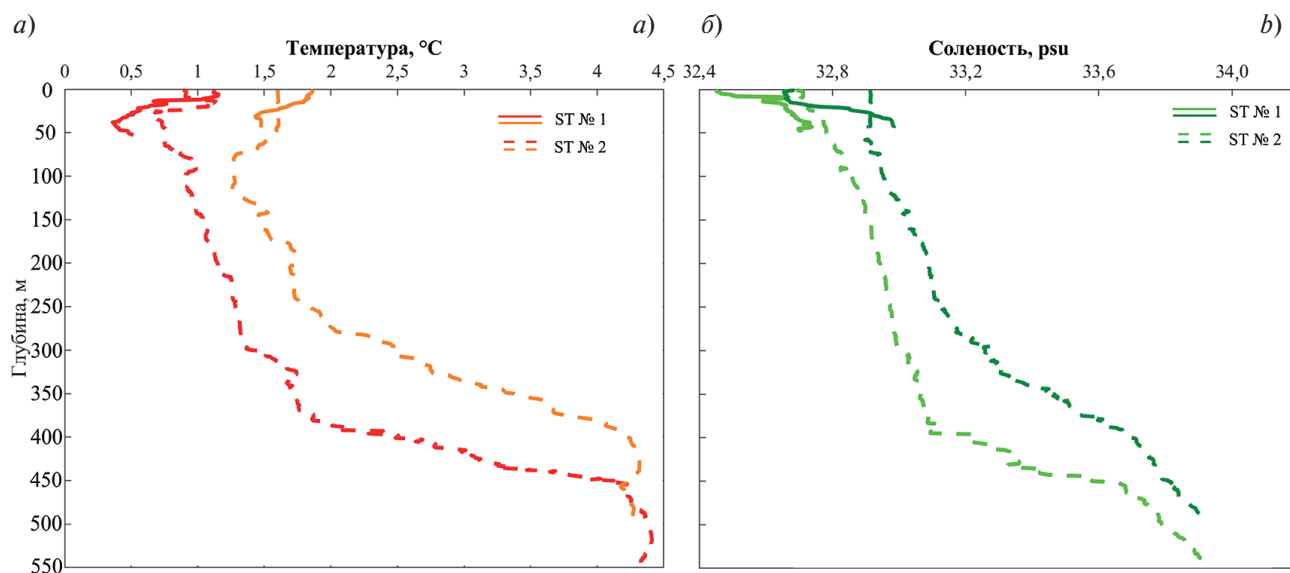
Fig. 2. Distribution of temperature in 2019 (a), 2020 (b) and salinity in 2019 (c), 2020 (d) based on *in situ* observations at a depth of 2 m

Основной особенностью распределения солёности в приповерхностном слое в оба года было присутствие фронтальной зоны у выхода из Авачинской бухты при достаточно небольшой ее изменчивости по остальной акватории. В 2019 г. солёность колебалась от  $29,9$  до  $32,9$  ‰ (рис. 2, в), а в 2020 г. — от  $31,7$  до  $33,1$  ‰ (рис. 2, г). В оба года наиболее низкие значения солёности фиксировались у выхода из Авачинской бухты, что, очевидно, связано с выносом вод из бухты. В 2019 г. на удалении от берега изменчивость солёности была незначительной, при этом более высокие значения солёности соответствовали глубоководной части залива. В 2020 г. наблюдался заток относительно солёных вод на шельф в районе мыса Шипунский.

Следует отметить, что в оба года неоднородная пространственная структура гидрологических полей наиболее ярко проявлялась в шельфовой зоне. В то же время в глубоководной части залива, удаленной от берега, эта неоднородность была выражена значительно слабее.

Особенности вертикального распределения температуры и солёности рассмотрим на примере данных, полученных на станциях № 1 и № 2, расположенных в шельфовой и глубоководной частях акватории (рис. 1). Они представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что вертикальная структура вод на шельфе и в глубоководном районе имеет существенные различия. На мелководье формируется двухслойная структура: тонкий верхний слой, характеризующийся повышенной температурой и пониженной солёностью, под которым располагаются более холодные



**Рис. 3.** Вертикальная изменчивость температуры (а) за 2019 г. (красная сплошная и пунктирная линии) и 2020 г. (оранжевая сплошная и пунктирная линии) и солёности (б) за 2019 г. (светло-зеленая сплошная и пунктирная линии) и 2020 г. (темно-зеленая сплошная и пунктирная линии). Сплошная линия на обоих рисунках показывает профили на станции на шельфе (№ 1), пунктирная — в глубоководном районе (№ 2)

**Fig. 3.** Vertical variability of temperature (a) for 2019 (red solid and dotted lines) and 2020 (orange solid and dotted lines) and salinity (b) for 2019 (light green solid and dotted lines) and 2020 (dark green solid and dotted lines). The solid line in both figures shows the profiles at the station on the shelf (No. 1), the dotted line — in the deepwater area (No. 2)

и соленые воды. В глубоководном районе слой прогретых и распресненных вод более мощный, чем у берега, однако величина понижения солёности здесь меньше, чем на шельфовых станциях. Под этим слоем до глубины 250–350 м залегают относительно холодные воды, соответствующие холодному промежуточному слою (ХПС). Абсолютный минимум температур наблюдался на глубинах 30–120 м, при этом глубина его залегания значительно варьируется от года к году. Ниже, до глубины 400–450 м, температура и солёность довольно быстро увеличиваются. На больших глубинах температура становится стабильно высокой (более 4 °C), а солёность продолжает плавно увеличиваться, хотя скорость ее роста ниже, чем в вышележащем слое. Эта область соответствует теплomu промежуточному слою (ТПС).

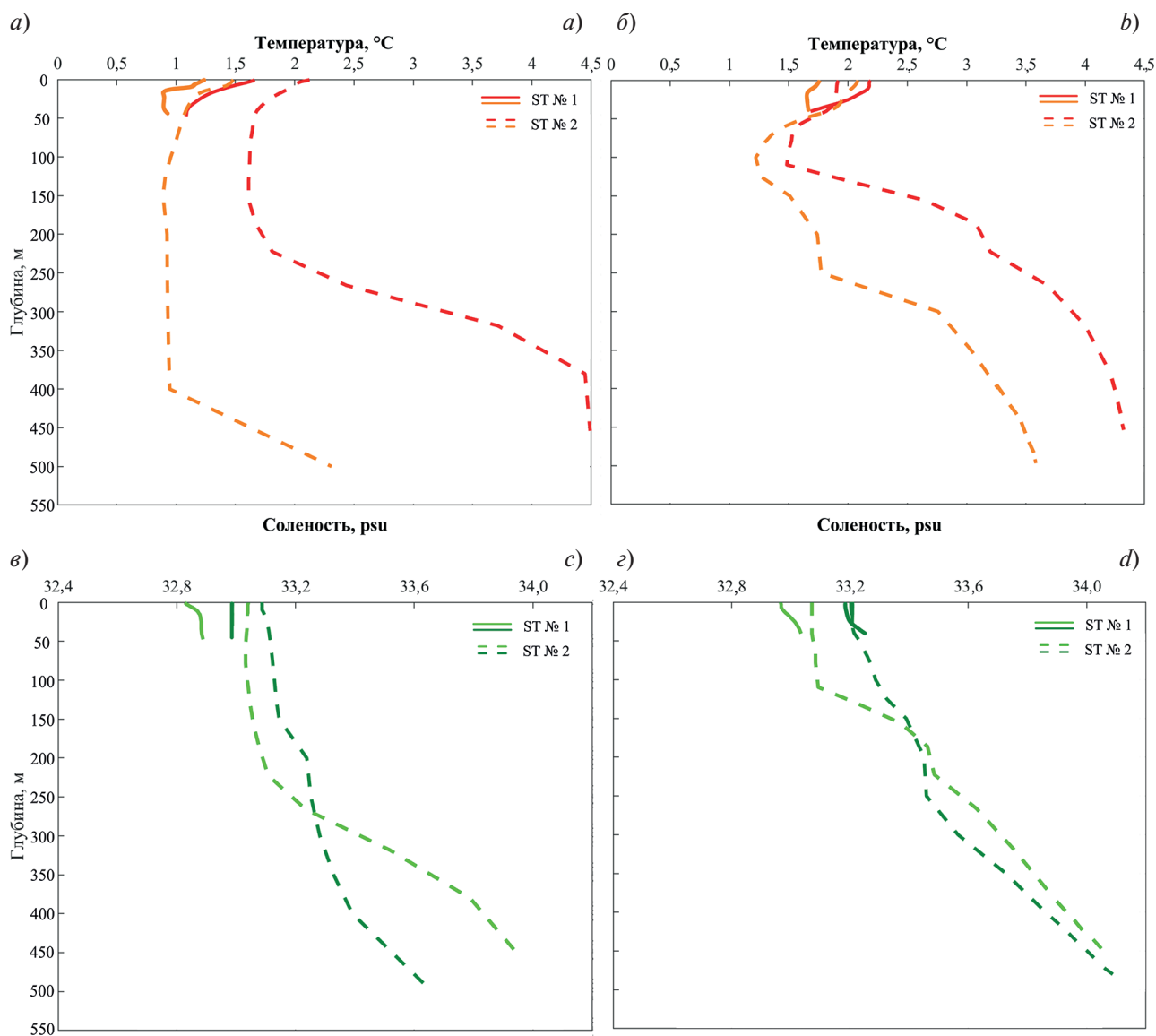
Характеристики стратификации вод, особенно в глубоководной части, демонстрируют значительную межгодовую изменчивость как по абсолютным значениям температуры и солёности, так и по особенностям самой вертикальной структуры. В 2019 г. мощность ХПС, сформированного в зимний период, достигала около 350 м, а температура в его ядре составляла менее 0,7 °C. При этом на мелководье нижняя граница ХПС располагалась выше, чем в глубоководной части. В 2020 г. вертикальные профили температуры и солёности показали менее выраженное вертикальное развитие ХПС с температурой в его ядре менее 1,5 °C. Кроме того, глубина залегания основного термоклина и галоклина в области границы ХПС и ТПС также существенно варьировалась между годами.

#### 4. Сравнение судовых наблюдений с данными из глобальных баз

Качественную оценку воспроизведения вертикальной структуры вод по данным глобальных океанических реанализов можно провести, сравнив рис. 3 и 4. GLORYS12v1 и GOF3.1 отражают общие тенденции изменений характеристик вод, полученные по данным измерений. Продукты воспроизводят наличие у берега более теплых и распресненных вод в верхнем слое, а в глубоководной части слои ХПС и ТПС (рис. 4). GLORYS12v1 и GOF3.1 также отражают тенденции межгодовой изменчивости структуры вод.

Однако оба продукта не воспроизводят приповерхностный галоклин на прибрежных станциях. На глубоководных станциях также отмечаются проблемы с воспроизведением вертикальной протяженности ХПС и ТПС. Продукт GLORYS12v1 на 0,5 °C завышает температуру в ХПС и примерно на 150 м его вертикальное развитие. GOF3.1 не очень хорошо воспроизводит границу между ХПС и ТПС, вследствие чего верхняя

граница ТПС заглубляется более чем на 100 м по сравнению с данными измерений. В холодный год (2019) продукты не воспроизводят прижатое к поверхности холодное ядро ХПС, а в тёплый год (2020) глубина залегания ТПС завышается. Кроме того, во всех продуктах профиль солёности оказывается более сглаженным, чем в данных судовых наблюдений. Также стоит отметить, что GLORYS12v1 и GOFS3.1 не воспроизводят глубоководный галоклин.

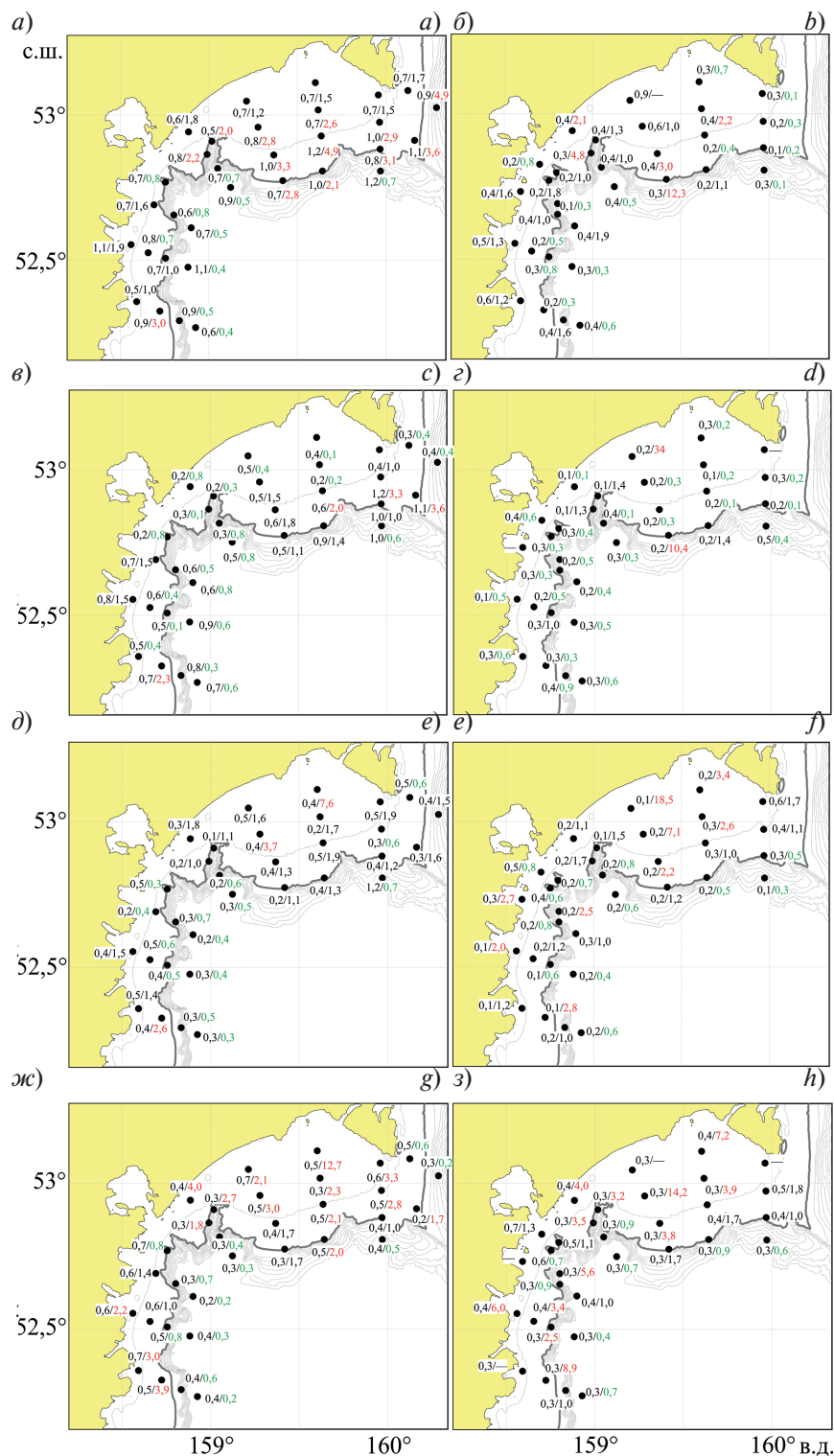


**Рис. 4.** Вертикальная изменчивость температуры за 2019 г. (а) и за 2020 г. (б) GLORYS12v1 (красные линии) и HYCOM (оранжевые линии) и солёности за 2019 г. (в) и за 2020 г. (г) GLORYS12v1 (светло-зеленые линии) и HYCOM (темно-зеленые линии)

**Fig. 4.** Vertical variability of temperature for 2019 (a) and 2020 (b) GLORYS12v1 (red lines) and HYCOM (orange lines) and salinity for 2019 (c) and 2020 (d) GLORYS12v1 (light green lines) and HYCOM (dark green lines)

Результаты количественной оценки точности для обоих продуктов на всех станциях представлены на рис. 5. Видно, что качество воспроизведения профилей температуры и солёности значительно варьируется по годам.

Данные GLORYS12v1 воспроизводят температуру в 2019 г. со средней аномалией 0,8 °C (рис. 5, а), а в 2020 г. — 0,3 °C (рис. 5, б). При этом в оба года максимальные отклонения наблюдаются на шельфовых станциях, хотя значительные аномалии (до 1,2 °C) отмечаются и в глубоководной части залива в районе м. Шипунский. Продукт GOFS3.1 воспроизводит температуру в 2019 г. со средней аномалией 0,6 °C (рис. 5, в), а в 2020 г. — 0,2 °C (рис. 5, г), что говорит о схожей природе ошибок. Этот вывод подтверждает и географическое совпадение максимумов аномалий GOFS3.1 и GLORYS12v1.



**Рис. 5.** Карты распределения аномалии и функции расхождения ( $An/F$ ) между модельными данными и *in situ* измерениями по температуре: *in situ* и GLORYS12v1 за 2019 г. (а) и 2020 г. (б), *in situ* и HYCOM за 2019 г. (в) и 2020 г. (г), по солености: *in situ* и GLORYS12v1 за 2019 г. (д) и 2020 г. (е), *in situ* и HYCOM за 2019 г. (ж) и 2020 г. (з). Цвета F: зеленый — «хорошее» значение, черный — «удовлетворительное», красный — «плохое». Прочерки — станции без данных глубже 50 м. Серыми изобатами показаны глубины 100–1000 м (шаг 100 м), жирной линией — изобата 200 м

**Fig. 5.** Maps of anomalies and cost function ( $An/F$ ) between model data and *in situ* measurements for temperature: *in situ* and GLORYS12v1 in 2019 (a) and 2020 (b), *in situ* and HYCOM in 2019 (c) and 2020 (d), for salinity: *in situ* and GLORYS12v1 in 2019 (e) and 2020 (e), *in situ* and HYCOM in 2019 (g) and 2020 (h). Colors F: green — “good” value, black — “satisfactory”, red — “bad”. Dashes are stations with no data deeper than 50 m. The gray isobaths show depths of 100–1000 m (100 m pitch), the bold line shows an isobath of 200 m

Функция расхождения по температуре в целом не превышает 2 для большинства станций у обоих продуктов, за исключением 2019 г. для GLORYS12v1. В этот год большинство станций с «плохой» функцией расхождения было зафиксировано на северном расширенном участке шельфа в районе м. Шипунский. Для других рассмотренных случаев станции со значительной функцией расхождения по температуре наблюдаются преимущественно на шельфе.

Данные GLORYS12v1 на рассматриваемой акватории воспроизводят солёность в 2019 г. со средней по вертикали аномалией 0,4 ‰ (рис. 5, *д*), а в 2020 г. — 0,2 ‰ (рис. 5, *е*). В оба года максимальные отклонения наблюдаются на шельфовых станциях (до 0,5 ‰), причем максимум аномалий сохраняется на станции у выхода из Авачинской бухты. Это, вероятно, связано с недоучетом влияния стока пресных вод из бухты. Наиболее значительная аномалия отмечается в 2019 г. в глубоководной части залива в районе м. Шипунский.

Продукт GOFS3.1 воспроизводит солёность в 2019 и 2020 гг. со средней аномалией 0,4 ‰ (рис. 5, *ж*, *з*). Максимальные аномалии между GOFS3.1 и данными измерений (до 0,7 ‰) в оба года наблюдаются на станции у выхода из Авачинской бухты. Другие столь же значимые ошибки также отмечаются на шельфовых станциях.

В большинстве станций на шельфе функция расхождения по солёности превышает 2 и является «плохой» для обоих продуктов, за исключением 2019 г. для GLORYS12v1. В этот год было зафиксировано небольшое число станций с «плохой» функцией расхождения, которые были отмечены на северном расширенном участке шельфа в районе м. Шипунский. В целом географическое распределение функции расхождения для солёности указывает на слабую ее воспроизводимость продуктом GOFS3.1, особенно на шельфе.

По результатам анализа карт аномалий и функций расхождения, основанных на оценках точности, исследуемую акваторию можно разделить на две области: прибрежный шельф и глубоководную зону склона. Для упрощения описания обобщенные статистические данные по оценке точности обоих продуктов, а также средних оценок характеристик и изменчивости термохалинных профилей для указанных областей представлены в таблице. Обобщение показывает, что оба продукта достаточно хорошо воспроизводят профили температуры и солёности в глубоководной части акватории. При этом GOFS3.1 в целом лучше воспроизводит структуру поля температуры, а GLORYS12v1 — солёности. Однако оба продукта демонстрируют слабую воспроизводимость вертикальной структуры солёности на шельфе рассматриваемого региона. Вероятно, это связано с тем, что шельфовая зона отличается высокой неоднородностью гидрофизических параметров из-за влияния берегового стока и выноса талых вод из Авачинского залива, и значимости атмосферных воздействий. Это создает резкие градиенты солёности, особенно приповерхностный галоклин, трудно моделируемый при ограниченном разрешении глобальных моделей и недостаточной обеспеченностью данными.

Таблица

Table

Результаты сравнительного анализа значений температуры и солёности для продуктов GOFS3.1/CMEMS GLORYS12v1 с данными наблюдений усреднённые по рассматриваемой акватории за два года

The results of a comparative analysis of temperature and salinity values for HYCOM/CMEMS GLORYS12v1 products with observational data

| Продукт    | Диапазон глубин | Температура        |                |                  |             | Солёность   |         |           |             |
|------------|-----------------|--------------------|----------------|------------------|-------------|-------------|---------|-----------|-------------|
|            |                 | $T_{cp}, ^\circ C$ | $An, ^\circ C$ | $Di, ^\circ C^2$ | $F$         | $S_{cp}, ‰$ | $An, ‰$ | $Di, ‰^2$ | $F$         |
| GOFS3.1    | 0–200           | 0,62               | 0,42           | 0,10             | 1,15        | 32,76       | 0,44    | 0,03      | 3,42        |
|            | > 200           | 1,67               | 0,42           | 1,07             | <b>0,64</b> | 33,18       | 0,36    | 0,14      | <b>0,99</b> |
| GLORYS12v1 | 0–200           | 0,62               | 0,57           | 0,11             | 2,00        | 32,75       | 0,33    | 0,03      | 2,39        |
|            | > 200           | 1,55               | 0,55           | 0,88             | 1,16        | 33,14       | 0,25    | 0,15      | <b>0,74</b> |

Примечание: Жирным показаны значения функции расхождения, соответствующие диапазону «хорошо», а курсивом — «плохо».

Note: The values of the discrepancy function corresponding to the range “good” are shown in bold, and “bad” are shown in italics.

## 5. Заключение

В работе представлено количественное и качественное сравнение данных по температуре и солёности изоткрытых океанографических баз с результатами *in situ* измерений, выполненных на акватории Авачинского

залива в весенний период. Для сравнения с данными наблюдений были выбраны два глобальных океанологических продукта: CMEMS GLORYS12v1 и GOF3.1. Значения температуры и солёности из этих продуктов использовались для точек, ближайших к местам проведения судовых измерений, за дни их выполнения.

Анализ данных за апрель 2019 и 2020 гг. показал, что оба продукта воспроизводят локальные особенности термохалинных характеристик, но с различной степенью точности. Средняя аномалия по температуре для GLORYS12v1 составляет 0,6 °C, а для GOF3.1—0,4 °C. По солёности средние аномалии составляют 0,3 ‰ для GLORYS12v1 и 0,4 ‰ для GOF3.1. Наибольшие отклонения температуры и солёности наблюдаются на шельфовых станциях. Продукты не воспроизводят как средние значения по вертикали, так и приповерхностный галоклин на прибрежных станциях, что указывает на необходимость более точного учета локальных факторов, таких как береговой сток и вынос пресных вод, которые оказывают значительное влияние на термохалинную структуру в прибрежной зоне.

Оба продукта, GLORYS12v1 и GOF3.1, демонстрируют достаточно высокую точность в воспроизведении профилей температуры и солёности в глубоководной части Авачинского залива. Однако на отдельных станциях наблюдаются существенные различия в воспроизведении характеристик ХПС. И на большей части глубоководных станций в распределении солёности по данным продуктов отмечается сглаженность вертикальных профилей по сравнению с данными наблюдений, что приводит к высоким значениям при оценке функции расхождения. При этом за пределами шельфа в целом GOF3.1 лучше воспроизводит вертикальную структуру термохалинных полей, тогда как GLORYS12v1 более точно отражает распределение солёности.

Проведенная оценка точности показала, что при описании изменчивости гидрологических условий на шельфе Авачинского залива в весенний период еще рано полностью полагаться на данные глобальных океанографических баз, несмотря на их полный охват акватории и регулярность обновления. В то же время для областей склона шельфа, включая район глубоководных каньонов, предпочтительнее использовать данные из продукта GOF3.1, которые дают наиболее приемлемое совпадение с данными наблюдений в разные по своим условиям годы. Однако важно учитывать, что использование данных из глобальных продуктов в каждом конкретном случае требует их тщательной верификации с учетом локальных условий и особенностей региона.

### Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 23–17–00174, <https://rscf.ru/project/23-17-00174/>

### Funding

The study was funded by the Russian Science Foundation grant No. 23-17-00174, <https://rscf.ru/project/23-17-00174/>

### Литература

1. Metzger E.J., Smedstad O.M., Thoppil P.G., et al. US Navy Operational Global Ocean and Arctic Ice Prediction Systems // Oceanography. 2014. Vol. 27. P. 32–43. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2014.66>
2. Lellouche J., Greiner E., Bourdalle-Badié R., et al. The Copernicus global 1/12° oceanic and Sea ice GLORYS12 reanalysis // Frontiers Earth Science. 2021. Vol. 9. EDN: TTQRHU. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.698876>
3. Masina S., Storto A., Ferry N., et al. An ensemble of eddy-permitting global ocean reanalyses from the MyOcean project // Climate Dynamics. 2017. Vol. 49. P. 813–841. EDN: YFVVJA. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2728-5>
4. Carton J., Chepurin G., Chen L. SODA3: a new ocean climate reanalysis // Journal of Climate. 2018. Vol. 31, N. 17. P. 6967–6983. EDN: KCHGMJ. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0149.1>
5. Donlon C.J. et al. The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 116. P. 140–158. EDN: PGZNAF. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.017>
6. Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Никольский Н.В. Пространственная структура и внутригодовая изменчивость фронта моря Уэдделла по данным реанализа NOAA OISST // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 4. С. 89–102. EDN: DPKFY. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-4-89-102>
7. Калавиччи К.А., Башмачников И.Л. Особенности взаимодействия в системе океан–атмосфера в Баренцевом море по данным реанализов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 2. С. 175–187. EDN: XDMRVQ. <https://doi.org/10.31857/S0002351521020061>

8. *Udalov A., Budyansky M., Prants S., Didov A.* Census and properties of mesoscale eddies in the Kuril Basin of the Okhotsk Sea // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2024. Vol. 212. 104374. EDN PGLWWT. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2024.104374>
9. *Шевченко Г.В., Цхай Ж.Р., Ложкин Д.М.* Пространственно-временная изменчивость температуры поверхности Берингова моря по данным реанализа ERA5, основанных на спутниковой информации // Исследование Земли из космоса. 2024. № 1. С. 52–64. EDN GMSLES. <https://doi.org/10.31857/S0205961424010059>
10. *Lam F.-P.A., Haley Jr.P.J., Janmaat J., et al.* At-Sea Real-Time Coupled Four-Dimensional Oceanographic and Acoustic Forecasts During Battlespace Preparation 2007 // Journal of Marine Systems. 2009. Vol. 78. P. S306–S320. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.01.029>
11. *Potemra J. T.* Numerical Modeling with Application to Tracking Marine Debris // Marine Pollution Bulletin. 2012. Vol. 65. P. 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.06.026>
12. *Prants S.V., Budyansky M.V., Ulesky M. Yu.* Lagrangian study of surface transport in the Kuroshio Extension area based on simulation of propagation of Fukushima-derived radionuclides // Nonlinear Processes in Geophysics. 2014. Vol. 21, No. 1. P. 279–289. EDN SKOBHT. <https://doi.org/10.5194/npg-21-279-2014>
13. *Козуб П.К., Белоненко Т.В.* Зависимость формирования промысловых скоплений сайры от океанологических условий в Южно-Курильском районе по спутниковым данным // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2017. № 49. С. 82–88. EDN NPRZYP
14. *Новиков Ю.В., Антоненко Д.В., Никитин А.А.* Влияние океанологических условий на положение районов промысла пелагических рыб в тихоокеанских водах Курильских островов в холодном 2017 г. и тёплом 2018 г // Труды ВНИРО. 2020. Т. 180. С. 99–115. EDN FQZAQT. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2020-180-99-115>
15. *Будянский М.В., Кулик В.В., Кивва К.К. и др.* Лагранжев анализ тихоокеанских вод в Охотском море на основе спутниковых данных в приложении к промыслу минтая // Исследование Земли из космоса. 2022. № 5. С. 47–59. EDN HFUIDZ. <https://doi.org/10.31857/S0205961422050050>
16. *Будянский М.В., Лебедева М.А. Белоненко Т.А. и др.* Анализ океанологических условий в местах промысла японской скумбрии по спутниковым и модельным данным в Южно-Курильском проливе в 2020–2022 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 2. С. 286–299. EDN TTBUXJ. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-2-286-299>
17. *Ложкин Д.М., Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В.* Спутниковый мониторинг температурных условий в районах устьев нерестовых рек южной части о. Сахалин // Исследование Земли из космоса. 2018. № 5. С. 15–22. EDN YYDURN. <https://doi.org/10.31857/S020596140003232-6>
18. *Буслов А.В., Тепнин О.Б., Дубина А.Ю.* Особенности экологии нереста и эмбриогенеза восточнокамчатского минтая // Известия ТИНРО. 2004. Т. 138. С. 282–298. EDN HPMOYN
19. *Варкентин А. И., Саушкина Д.Я.* О некоторых вопросах воспроизводства минтая в тихоокеанских водах, прилегающих к Камчатке и северным Курильским островам в 2013–2022 гг. // Труды ВНИРО. 2022. Т. 189. С. 105–119. EDN HQAYWV. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-189-105-119>
20. *Тепнин О.Б.* Изменчивость гидрологических условий в местах нереста восточнокамчатского минтая (*Gadus chalcogrammus*) в 2012–2022 гг. // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2022a. № 66. С. 79–93. EDN WPQKWL. <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2022.66.79-93>
21. *Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А., и др.* Внутрисуточная изменчивость вертикальной структуры вод и распределения икры минтая в глубоководных каньонах Авачинского залива: натурный эксперимент в период нереста // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 77–89. EDN OZPOOW. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-6)
22. *Тепнин О.Б., Сошин А.В.* О применимости спутниковых данных высокого разрешения для анализа изменчивости температурных условий на предустьевом участке акватории Камчатского залива // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2022b. Т. 2, № 64. С. 85–96. EDN MSNEKO. <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2022.64.85-96>
23. Quality information document for Global Ocean Reanalysis Product GLOBAL REANALYSIS PHY001030. URL: <http://resources.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-030.pdf> (дата обращения: 27.01.2022).
24. *Poli P., Healy S.B., Dee D.P.* Assimilation of Global Positioning System radio occultation data in the ECMWF ERA-Interim reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2010. Vol. 136, N653. P. 1972–1990. EDN OKONYT. <https://doi.org/10.1002/qj.722>
25. *Cummings J.A., Smedstad O.M.* Variational Data Assimilation for the Global Ocean. Data Assimilation for Atmospheric // Oceanic and Hydrologic Applications. 2013. Vol. II, chapter 13. P. 303–343. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35088-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35088-7_13)
26. *Гордеева С.М., Шевчук О.И.* Руководство по статистической обработке глобальных архивов информации (на примере альтиметрических данных). СПб.: РГГМУ, 2013. 44 с. EDN UOKUTN

27. Eilola K., Markus Meier H.E., Almroth E. On the dynamics of oxygen, phosphorus and cyanobacteria in the Baltic Sea; A model study // *Journal of Marine Systems*. 2009. Vol. 75 (1–2). P. 163–184. EDN LWZFDD.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.08.009>

## References

1. Metzger EJ, Smedstad OM, Thoppil PG, et al. US Navy Operational Global Ocean and Arctic Ice Prediction Systems. *Oceanography*. 2014;27:32–43. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2014.66>
2. Lellouche J, Greiner E, Bourdalle-Badié R, et al. The Copernicus global 1/12° oceanic and Sea ice GLORYS12 reanalysis. *Frontiers Earth Science*. 2021;9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.698876>
3. Masina S, Storto A, Ferry N, et al. An ensemble of eddy-permitting global ocean reanalyses from the MyOcean project. *Climate Dynamics*. 2017;49:813–841. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2728-5>
4. Carton J, Chepurin G, Chen L. SODA3: a new ocean climate reanalysis. *Journal of Climate*. 2018;31(17):6967–6983. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0149.1>
5. Donlon CJ, et al. The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment*. 2012;116:140–158. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.017>
6. Artamonov YuV, Skripaleva EA., Nikolsky NV. Spatial Structure and Intra-Annual Variability of Weddell Sea Front based on the Data of NOAA OISST Reanalysis. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. 2020;4:89–102. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-4-89-102> (in Russian).
7. Kalavichchi KA, Bashmachnikov IL. Ocean–Atmosphere Interactions in the Barents Sea from Reanalyses Data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021;57(2):159–169. <https://doi.org/10.1134/S0001433821020067>
8. Udalov A, Budyansky M, Prants S, Didov A. Census and properties of mesoscale eddies in the Kuril Basin of the Okhotsk Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2024;212:104374. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2024.104374>
9. Shevchenko GV, Tshay ZhR, Lozhkin DM. The spatio-temporal variability of sea surface temperature of Bering Sea from ERA5 reanalysis data based on satellite information. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2024;1:52–64. <https://doi.org/10.31857/S0205961424010059> (in Russian).
10. Lam F-PA, Haley JrPJ, Janmaat J, et al. At-Sea Real-Time Coupled Four-Dimensional Oceanographic and Acoustic Forecasts During Battlespace Preparation 2007. *Journal of Marine Systems*. 2009;78: S306–S320. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.01.029>
11. Potemra JT. Numerical Modeling with Application to Tracking Marine Debris. *Marine Pollution Bulletin*. 2012;65:42–50. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.06.026>
12. Prants SV., Budyansky MV., Ulesky MYu. Lagrangian study of surface transport in the Kuroshio Extension area based on simulation of propagation of Fukushima-derived radionuclides. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2014;21(1):279–289. <https://doi.org/10.5194/npg-21-279-2014>
13. Kozub PK., Belonenko TV. Dependence of the formation of commercial saury accumulations on oceanological conditions in the South Kuril region according to satellite data. *Uchenye Zapiski Rossijskogo Gosudarstvennogo Gidrometeorologicheskogo Universiteta*. 2017;49:82–88. (in Russian).
14. Novikov Ju V., Antonenko DV., Nikitin AA. Influence of oceanological conditions on the position of pelagic fish fishing areas in the Pacific waters of the Kuril Islands in cold 2017 and warm 2018. *Trudy VNIRO*. 2020;180:99–115. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2020-180-99-115> (in Russian).
15. Budyansky MV., Kulik VV., Kivva KK. et al. Lagrangian analysis of Pacific waters in the Sea of Okhotsk based on satellite data in an appendix to pollock fishing. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2022;5:47–59. <https://doi.org/10.31857/S0205961422050050> (in Russian).
16. Budyansky MV., Lebedeva MA, Belonenko TA. et al. Analysis of oceanological conditions in Japanese mackerel fishing sites based on satellite and model data in the South Kuril Strait in 2020–2022. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2024;21(2):286–299. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-2-286-299> (in Russian).
17. Lozhkin DM., Chaj ZhR, Shevchenko GV. Satellite monitoring of temperature conditions in the estuaries of spawning rivers in the southern part of the island Sakhalin. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2018;5:15–22. <https://doi.org/10.31857/S020596140003232-6> (in Russian).
18. Buslov AV, Tepnin OB, Dubinina AYU. Some features of spawn ecology and embryogenesis of the east Kamchatka wall-eye pollock. *Izvestiya TINRO*. 2004;138:282–298 (in Russian).
19. Varkentin AI, Saushkina DYU. On some issues of pollock reproduction in the Pacific waters adjacent to Kamchatka and the northern Kuril Islands in 2013–2022. *Izvestia TINRO*. 2022;189:105–119. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-189-105-119> (in Russian).

20. Tepnin OB. Variability of hydrological conditions in the spawning grounds of East Kamchatka pollock (*Gadus chalcogrammus*) in 2012–2022. *Issledovaniya Vodnyh Biologicheskikh Resursov Kamchatki i Severo-Zapadnoj Chasti Tihogo Okeana*. 2022;66:79–93. <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2022.66.79-93> (in Russian).
21. Konik AA, Zimin AV, Atadzhanova OA, et al. Intra-Day Variability of Vertical Water Structure and Distributions Wall-eye Pollock Eggs in the Deep-Sea Canyons of Avacha Bay: A Field Experiment During the Spawning Period. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):77–89. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-6)
22. Tepnin OB, Soshin AV. On the applicability of high-resolution satellite data to analyze the variability of temperature conditions in the pre-estuary area of the Kamchatka Bay. *Issledovaniya Vodnyh Biologicheskikh Resursov Kamchatki i Severo-Zapadnoj Chasti Tihogo Okeana*. 2022b;2(64):85–96. <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2022.64.85-96> (in Russian).
23. Quality information document for Global Ocean Reanalysis Product GLOBAL REANALYSIS PHY001030. URL: <http://resources.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-030.pdf> (date of access: 27.01.2022).
24. Poli P, Healy SB, Dee DP. Assimilation of Global Positioning System radio occultation data in the ECMWF ERA-Interim reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2010;136(653):1972–1990. <https://doi.org/10.1002/qj.722>
25. Cummings JA, Smedstad OM. Variational Data Assimilation for the Global Ocean. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications*. 2013; Vol. II, chapter 13:303–343. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35088-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35088-7_13)
26. Gordeeva SM, Shevchuk OI. Guidance on the statistical processing of global archives of information (on the example of altimetry data). SPb.: RGGMU. 2013; 44 p. (in Russian).
27. Eilola K, Markus Meier HE, Almroth E. On the dynamics of oxygen, phosphorus and cyanobacteria in the Baltic Sea; A model study. *Journal of Marine Systems*. 2009;75(1–2):163–184. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.08.009>

#### Об авторах

- ЗИМИН Алексей Вадимович, главный научный сотрудник СПбФ ИО РАН, доктор географических наук, SPIN-код (РИНЦ): 9833-3460, ORCID: 0000-0003-1662-6385, Scopus AuthorID: 55032301400, WoS ResearcherID: C-5885–2014, e-mail: zimin2@mail.ru
- АТАДЖАНОВА Оксана Алишеровна, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, SPIN-код (РИНЦ): 5016-2970, ORCID: 0000-0001-6820-0533, Scopus AuthorID: 57188718743, WoS ResearcherID: R-7835–2018, e-mail: oksanam07@list.ru
- КОНИК Александр Александрович, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, SPIN-код (РИНЦ): 5839-1738, ORCID: 0000-0002-2089-158X, Scopus AuthorID: 57203864647, WoS ResearcherID: AAB-7195–2020, e-mail: konikrshu@gmail.com
- ТЕПНИН Олег Борисович, научный сотрудник КамчатНИРО, SPIN-код (РИНЦ): 4002-1975, ORCID: 0000-0001-9596-4336, WoS ResearcherID: KIL-1378–2024, e-mail: tenpin@ya.ru