УДК 551.46.06

© *А. В. Зимин*[1,2 *], *О. А. Атаджанова*[1], *А. А. Коник*[1,2], *С. М. Гордеева*[1]

[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Университетская наб., д. 7–9, г. Санкт-Петербург, Россия
[*]E-mail: zimin2@mail.ru

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ, С ДАННЫМИ ИЗ ГЛОБАЛЬНЫХ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ

Статья поступила в редакцию 03.05.2020, после доработки 17.08.2020

Приведены результаты количественного сравнения полей температуры и солености, полученные по результатам океанографических судовых измерений, с данными из глобальных океанологических баз. Измерения выполнялись на полигоне с регулярным расположением океанографических станций в юго-западной части Баренцева моря с 29.10.2018 по 02.11.2018 г. в рамках 74-го рейса на НИС «Академик Мстислав Келдыш». Для сравнения привлекались продукты MERCATOR PSY4QV3R1, CMEMS GLORYS12v1, World Ocean Atlas 2013, GHRSST OSTIA и данные Suomi NNP VIIRS на горизонтах от 0 до 100 метров. Проводились сравнения по средним и дисперсиям; относительно данных наблюдений оценивались: аномалия, пространственная корреляция и функция расхождения; для выбранных изолиний рассчитывалось модифицированное расстояние Хаусдорфа. Сравнения результатов судовых наблюдений и продуктов показали, что в последних отсутствуют наборы данных, достоверно описывающие термохалинные характеристики всей водной толщи на акватории Баренцева моря в осенний период времени. Основные различия проявляются в описании распределения температуры, а поля солености воспроизводятся в целом лучше. Наилучшее соответствие результатам измерений отмечено у продукта GHRSST OSTIA, описывающего только поверхностную температуру океана. Проведенный анализ свидетельствует о том, что при описании изменчивости гидрологических условий в арктических морях еще рано полностью опираться на данные глобальных продуктов, несмотря на их пространственный охват и регулярность обновления.

Ключевые слова: температура, соленость, НИС «Академик Мстислав Келдыш», GHRSST OSTIA, MERCATOR PSY4QV3R1, CMEMS GLORYS12v1, WOA 2013, Suomi NPP VIIRS, модифицированное расстояние Хаусдорфа, Баренцево море.

© *A. V. Zimin*[1,2*], *O. A. Atadzhanova*[1], *A. A. Konik*[1,2], *S. M. Gordeeva*[1]

[1]Shirshov Institute of Oceanology RAS, 117997, Nahimovsky Pr., 36, Moscow, Russia
[2]St. Petersburg State University, 199034, 7–9, Universitetskaya Emb., St. Petersburg, Russia
[*]E-mail: zimin2@mail.ru

COMPARISON OF HYDROGRAPHY OBSERVATIONS WITH DATA OF GLOBAL PRODUCTS IN THE BARENTS SEA

Received 03.05.2020, in final form 17.08.2020

The paper presents the results of a quantitative comparison of temperature and salinity fields obtained from oceanographic ship measurements with data from global oceanological databases. The measurements were performed at a regular location of oceanographic stations in the South-Western part of the Barents Sea from October 29 to November 2, 2018, as part of the 74th expedition to the research vessel “Akademik Mstislav Keldysh”. For comparison, MERCATOR PSY4QV3R1, CMEMS GLORYS12v1, World Ocean Atlas 2013, GHRSST OSTIA, and Suomi NNP VIIRS data on horizons from 0 to 100 meters were used. Comparisons were made using averages and variances; anomalies, spatial correlations, and divergence functions were estimated relative to observational data and the modified Hausdorff distance was calculated for the selected isolines. Comparison of the results of ship observations and products showed that among the latter there are no data sets that reliably describe the thermohaline characteristics of the entire water column in the Barents Sea in the autumn period. The main differences in products are shown in the description of the temperature distribution, and the salinity fields are generally reproduced better. The greatest agreement with

Ссылка для цитирования: *Зимин А.В.*, *Атаджанова О.А.*, *Коник А.А.*, *Гордеева С.М.* Сравнение результатов наблюдений, выполненных в Баренцевом море, с данными из глобальных океанологических баз // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 4. С. 66–77. doi: 10.7868/S2073667320040061

For citation: *Zimin A.V.*, *Atadzhanova O.A.*, *Konik A.A.*, *Gordeeva S.M.* Comparison of Hydrography Observations with Data of Global Products in the Barents Sea. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 4, 66–77. doi: 10.7868/S2073667320040061

the measurement results was observed in the product GHRSST OSTIA describing only the surface temperature of the ocean. The analysis shows that it is too early to fully rely on global product data when describing the variability of hydrological conditions in the Arctic seas, despite their coverage and regular updates.

Key words: temperature, salinity, R/V "Akademik Mstislav Keldysh", GHRSST OSTIA, MERCATOR PSY4QV3R1, CMEMS GLORYS12v1, WOA 2013, Suomi NPP VIIRS, modified Hausdorff distance, Barents Sea.

1. Введение

В последние десятилетия характеристики вод Баренцева моря, как и других областей Арктики, испытывают существенные изменения, связанные с климатическими процессами. Трансформация термохалинной структуры вод Баренцева моря связывается с интенсификацией притока тёплых и солёных атлантических вод из Норвежского моря [1] и снижением поступления морского льда из других районов Северного Ледовитого океана [2]. Считается, что до 65 % тепла, вносимого в Баренцево море между мысом Нордкап и архипелагом Шпицберген, отдается в атмосферу и в окружающие воды в пределах южной части моря [3]. Соответственно, рост притока теплых вод из Атлантики приводит к тому, что воды в Баренцевом море накапливают в летний сезон большее количество тепла, что сказывается на объемах теплоотдачи в осенне-зимний период. Развивающаяся осенью термохалинная конвекция захватывает тёплую атлантическую воду, поднимая её к поверхности. Это приводит к изменению интенсивности и пространственному перераспределению потоков в системе океан-атмосфера, что в свою очередь влияет на состояние атмосферы и образование льда в Северном Ледовитом океане [4]. Таким образом, складывающиеся на акватории Баренцева моря гидрологические условия естественным образом оказывают влияние на остальной арктический регион. В этой связи весьма актуальной является задача непрерывного мониторинга морской среды, которая должна способствовать повышению качества прогноза ожидаемых изменений. Решение этой задачи, в первую очередь, связано с совершенствованием систем мониторинга и созданием численных моделей, включающих оперативную ассимиляцию спутниковых, дрифтерных и судовых наблюдений, хотя поступление регулярных данных с акватории арктических морей обеспечивают только некоторые спутниковые наблюдательные системы и прибрежные станции.

Глобальные океанские модели, включающие системы реанализа океанских данных, постоянно развиваются, а результаты их работы выкладываются в открытый доступ [5–7]. Создаваемые с помощью моделей «продукты» (наборы пространственно-временных значений характеристик вод) регулярно обновляются и позволяют воспроизводить океанические поля температуры, солености и др. Многие исследователи [1, 8–10] используют их при решении различных задач научно-прикладного характера, считая их верифицированными для всех районов Мирового океана. При этом сопоставление судовых и модельных данных для конкретного региона представляется, как правило, как некоторая второстепенная задача, уже выполненная и не заслуживающая внимания, хотя представленные продукты дают лишь некоторую *оценку* полей океанологических величин. Их ошибки могут быть следствием как неполноты входных данных, так и несовершенства используемых математических моделей.

Как правило, сопоставление регулярных модельных и отрывочных *in situ* данных носит чисто иллюстративный характер. Чрезвычайно редко к этим сравнениям привлекаются статистические критерии. Сравнение «модель — *in situ* наблюдение» затрудняется тем, что результаты измерений, используемые для верификации, отражают состояние океана в конкретной точке в конкретный момент времени, а модель, как правило, предоставляет значения, осредненные по некоторой области пространства и времени. Соответственно, верификация данных, полученных из продуктов, требует проведения специализированных наблюдений, учитывающих особенности, как района исследований, так и модельной сетки. То есть для достижения репрезентативности *in situ* наблюдения должны выполняться, во-первых, в течение минимально возможного промежутка времени в узлах регулярной сетки, сопоставимой с модельной по шагу [11], а во-вторых, желательно вдали от динамически активных фронтальных зон [12]. Кроме того, данные наблюдений должны позволять провести так называемую «независимую» верификацию продуктов, т. е. не должны быть задействованы в разработке рассматриваемых баз [13].

Целью исследования является количественное сравнение результатов независимых *in situ* измерений с данными из глобальных океанологических баз для выбора информационного продукта, наиболее достоверно описывающего изменчивость термохалинных полей в юго-западной части Баренцева моря.

2. Исходные данные

В качестве эталонных значений выступили результаты судовых контактных измерений температуры и солености, выполнявшиеся на полигоне в юго-западной части Баренцева моря с 29 октября по 2 ноября

2018 года [14] в рамках 74-го рейса на НИС «Академик Мстислав Келдыш» («АМК»). Полигонная съемка состояла из 58 океанографических станций, выполненных на регулярной сетке на удалении от берега более 12 миль, в районе, где отсутствовали резкие перепады глубин. Карта полигона представлена на рис. 1 (см. вклейку).

Методика измерений заключалась в проведении вертикальных зондирований толщи вод с помощью CTD-зонда SBE-25 (США). Гидрологические работы выполнялись от поверхности до максимально возможного горизонта. Данные зондирования на каждой станции осреднялись по глубине с шагом 1 м. Для дальнейшего сравнения данных экспедиционных наблюдений с другими информационными продуктами использовались все данные, полученные на полигоне, за исключением самого западного разреза полигона из 5 станций. Использовались данные, полученные на горизонтах 10, 50, 75, 100 м.

Для сравнения с судовыми наблюдениями было выбрано пять принципиально различных продуктов, находящихся в свободном доступе. Все данные выбирались из них для района, указанного на рис. 1.

В качестве продукта, в основе которого заложена прогностическая модель, была взята «Оперативная система анализа и прогноза Мирового океана европейской группы». Полное название продукта GLOBAL OCEAN1/12° PHYSICS ANALYSIS AND FORECAST UPDATED DAILY, официальное сокращенное название которого MERCATOR PSY4QV3R1 [15], в работе далее будем использовать более краткое название PSY4QV3R1. Она обеспечивает воспроизведение среднесуточных гидрофизических полей для всего Мирового океана с разрешением 1/12° [16]. PSY4QV3R1, включает в себя ежедневные данные по уровню океана, солености, температуре, глубине перемешанного слоя и распространению льда. Эта система использует численную океанскую модель NEMO [17] с 50 неравномерно расположенными по глубине горизонтами для большинства гидрофизических характеристик. Для исследования из глобального архива были выбраны среднесуточные данные температуры и солености воды с 29 октября по 2 ноября 2018 года, для слоев, среднее положение по глубине которых соответствует 9.6, 47.4, 77.8 и 92.3 м.

Как продукт, полученный на основе реанализа, привлекался массив, разработанный Службой мониторинга морской среды «Коперник» [18]. Полное название продукта GLOBAL OCEAN PHYSICS REANALYSIS, официальное сокращенное название которого CMEMS GLORYS12v1, в работе далее будем использовать название GLORYS12v1. Он содержит среднемесячные и суточные гидрофизические поля с глобальным охватом в разрешении 1/12° для 50 горизонтов [19]. Модельная составляющая GLORYS12v1 — система реанализа European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-Interim, использующая фильтр Калмана для ассимиляции [20] данных температуры, солености, течений, уровня моря, и поверхности льда. Для анализа выбирались среднесуточные значения температуры и солености для тех же горизонтов и периода времени, как и для PSY4QV3R1.

Привлекался глобальный архив температуры морской поверхности, полное название продукта The Group for High Resolution Sea Surface Temperature Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis, официальное сокращенное название которого GHRSST OSTIA, в работе использовалось сокращенное название OSTIA. Данный архив включает в себя поля осредненные с помощью оптимальной интерполяции на глобальной сетке 0.054° по широте и долготе [5]. Он основывается на спутниковых данных температуры поверхности океана с датчиков высокого разрешения (AVHRR, AMSRE, AATSR) и данных, полученных с буев. Для проведения сравнения с сайта [21] были взяты среднесуточные данные по температуре поверхности моря с 29 октября по 2 ноября 2018 г.

Так же был использован набор среднемесячных данных из World Ocean Atlas 2013 (WOA13), который представляет собой полученные методом объективного анализа климатические поля температуры и солености Мирового океана с разрешением 1/4° по широте и долготе на 57 стандартных расширенных океанографических горизонтах [22, 23]. В данной работе использовались массивы значений WOA13 температуры и солености для горизонтов 10, 50, 75, 100 метров за октябрь и ноябрь с сайта [24].

В качестве продукта, описывающего результаты дистанционного зондирования, в работе использовались спутниковые данные температуры поверхности моря уровня обработки L3 с сайта [24], полученные с помощью спутникового радиометра Suomi NPP VIIRS с пространственным разрешением 4 км [25, 26]. Из-за циклонической активности в районе исследования получить полноценную матрицу данных удалось только за 30 октября 2018 г.

3. Методы обработки данных

Методика сравнения состояла из трех основных этапов. На первом этапе проводилось формирование однотипных массивов данных путем приведения всех исходных полей к единой пространственной сетке,

за основу было взято расположение станций судовых измерений на полигоне (рис. 1). В результате была сформирована регулярная сетка, состоящая из 54 узлов (6 на 9 точек). Она охватывала район от 69.48° до 70.76°с.ш. с шагом 0.16° и от 34.8° до 38.7°в.д. с шагом 0.78°. Все поля для каждого из продуктов были интерполированы на сетку методом Kriging в программе Surfer [27], который на предварительном этапе работы дал минимальные оценки ошибок интерполяции характеристик полей. Массивы готовились для четырех рассматриваемых горизонтов: поверхность или 10 м (в зависимости от продукта), 50, 75 и 100 м. Для анализа были подготовлены массивы ежедневных, осредненных за весь период и композитных данных. Последние формировались кумулятивно, на основе ежедневных данных за пять дней, путем включения в массив сведений с условием, что они соответствовали по пространству и времени (суткам) *in situ* измерениям. На основе месячных данных WOA13 были рассчитаны только средние значения характеристик за два месяца (октябрь — ноябрь).

На втором этапе работ производилось сравнение разных наборов данных (*X*) с *in situ* наблюдениями (*I*) по горизонтам. Сначала выполнялось сравнение композитных и измеренных данных по средним по полю значениям характеристик и их пространственной дисперсии [28], рассчитывались средние аномалии *An* (1) и функции расхождения (стоимости) *F* (2) [29].

$$An = \frac{\sum_{j=1}^{N} | I_j - X_j |}{N} \tag{1}$$

$$F = \left| \frac{Mi - Mx}{\sqrt{D}} \right|, \tag{2}$$

где N — длина ряда, Mi и D — среднее значение и дисперсия *in situ* наблюдений I соответственно, Mx — среднее значение данных продуктов X, j — порядковый номер узла. Нумерация узлов сетки производилась вдоль параллели с нижнего левого угла полигона, каждый раз начиная с самого западного узла.

Затем рассчитывались коэффициенты корреляции пространственных полей (точка в точку) между ежедневными, усредненными за период и композитными массивами для каждого набора данных и *in situ* измерениями.

На третьем этапе выполнялось пространственное сравнение полей путем расчета модифицированного расстояния Хаусдорфа (MHD). Оно часто используется для количественной оценки сходства между пространственным распределением моделируемых и контрольных скалярных полей различных гидрометеорологических параметров [30, 31]. На каждом горизонте для *in situ* данных и данных продуктов выбиралась одна и та же изолиния температуры (солености), для которой проводился перевод её пространственных координат в километры относительно начала отсчета географических координат. В результате формируются A — набор (множество) a точек (с координатами в км) по данным *in situ* наблюдений, B — набор b точек по данным одного из продуктов. Дальнейшие пояснения даны в терминах теории множеств.

Вначале производился расчет минимального расстояния от множества точек A до каждой точки b (3), затем выполнялся аналогичный расчет от каждой точки a до множества точек B (4).

$$d(A,b) = \inf_{a \in A} d(a,b), \tag{3}$$

$$d(a,B) = \inf_{b \in B} d(a,b). \tag{4}$$

Далее вычисляются средние минимальные расстояния в наборах множеств (5), (6),

$$d(A,B) = \frac{1}{|A|} \sum_{a \in A} d(a,B), \tag{5}$$

$$d(B,A) = \frac{1}{|B|} \sum_{b \in B} d(A,b), \tag{6}$$

где |A| и |B| — количество точек в этих множествах соответственно. На последнем этапе выбиралось максимальное значение из имеющихся средних минимальных расстояний между наборами точек изолиний (7) для каждого горизонта,

$$MHD = \max\{d(A,B), d(B,A)\}. \tag{7}$$

4. Гидрологические условия на акватории по данным наблюдений

Температура на полигоне в период измерений в слое 0–100 м менялась незначительно, от 7.0 °C на поверхности до 3.5 °C на глубине в восточной части полигона. Соленость — от 34.1 ‰ у поверхности на южных станциях полигона до 34.8 ‰ на глубине в северо-восточной части полигона. В целом на полигоне температура уменьшалась с глубиной, а соленость возрастала. Верхний квазиоднородный слой составлял 35–45 м. Ярко выраженный слой скачка отсутствовал. Почти вся вода на полигоне ассоциируется с Мурманской прибрежной водной массой [3].

Наглядное представление о распределении термохалинных полей можно получить из рис. 2 (см. вклейку). Температура и соленость на глубине 10 м изменялись от почти 5.4 до 7.0 °C и от 34.1 до 34.7 ‰ соответственно. На фоне относительно равномерного распределения в температуре наблюдался «язык» холодных вод, который привел к формированию слабо выраженной градиентной зоны до 0.05 °C на милю. Соленость в целом на полигоне увеличивается с юго-запада на северо-восток со слабовыраженными градиентами. Наиболее теплые воды с низкой соленостью отмечались в юго-западной части полигона, а соленые воды со средней температурой — в северо-восточной части полигона. С глубиной картина распределения вод менялась незначительно.

5. Сравнение судовых наблюдений с данными из глобальных баз

Представление об изменчивости термохалинных полей по композитным данным продуктов на горизонте 10 м можно получить из рис. 3 (см. вклейку). Общим для всех полей температуры является ее высокие значения в юго-западной части полигона. При этом абсолютные значения по базам PSY4QV3R1, GLORYS12V1 выше измеренных, а заток холодных вод в юго-восточной части полигона прослеживается слабо. По климатическим данным атласа WOA13 температура (более чем на 1 °C) меньше, чем по данным измерений, а заток более холодных вод в юго-восточной части отсутствует. Генеральные черты распределения солености по данным всех баз практически одинаковые: наблюдается ее рост с юго-запада на северо-восток, различия носят локальный характер.

Поля температуры воды на поверхности моря представлены на рис. 4 (см. вклейку). Нетрудно заметить, что при сохранении общей тенденции в пространственной изменчивости температуры наблюдаются колебания меньших масштабов. По данным OSTIA прослеживается зона теплых вод в северо-западной части полигона, по спутниковым данным VIIRS — зона холодной аномалии имеет пятнистый характер и охватывает значительные по пространству площади.

По рисункам 3 и 4 видно, что полученные по данным измерений и анализируемым продуктам поля температуры и солености в целом близки по тенденциям. Почти во всех данных заметные различия наблюдаются в поле температуры в юго-восточной и западной частях полигона. В поле солености тенденции сохраняются по всем данным, изменяется только положение в пространстве конкретных изохалин.

Для количественного сравнения различных данных вначале производился расчет среднего арифметического значения и дисперсии [28]. Для этого поля с данными о температуре и солености воды разных информационных продуктов были усреднены по пространству на каждом горизонте, и была рассчитана их дисперсия в пределах поля (табл. 1). Как видно из таблицы, статистические характеристики между данными разных продуктов схожи. Тем не менее, была проведена оценка статистического равенства средних значений (по критерию Стьюдента) и дисперсий (по критерию Фишера) при уровне значимости 5 % попарно: измерения НИС «АМК» — данные другого информационного продукта [28]. Сравнение средних показало, что модельные продукты PSY4QV3R1 и GLORYS12V1 значительно завышают температуру воды практически на всех горизонтах, а соленость моделью PSY4QV3R1 занижается на промежуточных горизонтах. Средняя изменчивость характеристик в пределах района отражается адекватно и статистически не отличается от измеренной, за исключением горизонтов 75 м (температура воды, PSY4QV3R1) и 75 и 100 м (соленость, GLORYS12V1). Климатический атлас WOA13 ожидаемо показал значительные отличия по всем параметрам на всех горизонтах: в нем температура воды занижена, а соленость повышена; дисперсия в поле меньше в 2–4 раза. Это очевидно объясняется сильным сглаживанием процессов при временном осреднении до среднемесячных значений. Наилучшее количественное соответствие (статистическое равенство средних и дисперсии) показал продукт OSTIA на поверхности бассейна. Спутниковые данные VIIRS имеют в два раза большую дисперсию, что объясняется повышенной детальностью спутниковых снимков по сравнению с натурными измерениями.

Таблица 1

Статистические характеристики. Жирным шрифтом выделены характеристики, статистически значимо отличающиеся (при α = 0.05) от измеренных на НИС «АМК»

Descriptive statistics. Characteristics that are statistically significant differ (at α = 0.05) from those measured at the R / V "AMK" are marked in bold

Параметр/Продукт	НИС «АМК»	PSY4 QV3R1	GLORYS 12V1	WOA13	OSTIA (0 м)	VIIRS (0 м)
Температура на глубине 10 м						
Среднее, °C	6.12	**6.57**	**6.53**	**5.19**	6.27	5.98
Дисперсия, °C^2	0.20	0.22	0.16	0.09	0.25	**0.42**
Аномалия, °C	—	0.52	0.47	0.93	0.25	0.13
Ф. расхождения	—	1.01	0.92	2.09	0.32	0.31
Температура на глубине 50 м						
Среднее, °C	6.07	**6.58**	**6.54**	**4.83**	—	—
Дисперсия, °C^2	0.25	0.23	0.17	**0.15**	—	—
Аномалия, °C	—	0.58	0.53	1.24	—	—
Ф. расхождения	—	1.02	0.94	2.48	—	—
Температура на глубине 75 м						
Среднее, °C	5.54	**6.44**	5.86	**4.21**	—	—
Дисперсия, °C^2	0.79	**0.48**	0.99	**0.22**	—	—
Аномалия, °C	—	0.92	0.60	1.37	—	—
Ф. расхождения	—	1.02	0.37	1.49	—	—
Температура на глубине 100 м						
Среднее, °C	4.88	**5.96**	**5.41**	**3.83**	—	—
Дисперсия, °C^2	0.87	1.01	1.10	**0.19**	—	—
Аномалия, °C	—	1.08	0.69	1.09	—	—
Ф. расхождения	—	1.15	0.56	1.13	—	—
Соленость на глубине 10 м						
Среднее, ‰	34.504	34.456	34.485	34.526	—	—
Дисперсия, ‰^{2}	0.021	0.019	0.017	**0.011**	—	—
Аномалия, ‰	—	0.077	0.060	0.042	—	—
Ф. расхождения	—	0.450	0.176	0.211	—	—
Соленость на глубине 50 м						
Среднее, ‰	34.527	**34.457**	34.490	**34.594**	—	—
Дисперсия, ‰^{2}	0.014	0.018	0.015	**0.008**	—	—
Аномалия, ‰	—	0.081	0.060	0.069	—	—
Ф. расхождения	—	0.595	0.321	0.567	—	—
Соленость на глубине 75 м						
Среднее, ‰	34.555	**34.488**	34.526	**34.651**	—	—
Дисперсия, ‰^{2}	0.020	0.017	**0.011**	0.007	—	—
Аномалия, ‰	—	0.076	0.063	0.109	—	—
Ф. расхождения	—	0.478	0.208	0.678	—	—
Соленость на глубине 100 м						
Среднее, ‰	34.574	34.529	34.539	**34.673**	—	—
Дисперсия, ‰^{2}	0.017	0.017	**0.010**	**0.007**	—	—
Аномалия, ‰	—	0.073	0.061	0.106	—	—
Ф. расхождения	—	0.347	0.265	0.766	—	—

Аномалия абсолютных значений в поле температуры и солености относительно данных наблюдений самая значительная, как и следовало ожидать, у атласа WOA13. Стоит отметить, что в данных продуктов PSY4QV3R1, GLORYS12V1 по температуре так же присутствует стабильно высокая аномалия, величина которой еще и увеличивается с глубиной, аномалия же солёности по этим продуктам практически стабильна по глубине. Наименьшая аномалия по температуре отмечается в данных OSTIA и VIIRS.

Согласно классификации, предложенной в [29] для интерпретации функции расхождения используют следующие диапазоны $0 \le F < 1$ (хорошо), $1 \le F < 2$ (удовлетворительно) и $2 \le F$ (плохо). Согласно этим критериям, распределение температуры хорошо описывают продукты GLORYS12V1 (на всех горизонтах),

OSTIA и VIIRS, а соленость хорошо описывают все продукты (табл. 1). Плохо поле температуры воспроизводит климатический атлас WOA13 на горизонтах 10 и 50 м. Остальные результаты можно назвать удовлетворительными.

Результаты корреляционного сопоставления пространственных полей гидрофизических характеристик судовых наблюдений с данными продуктов представлены в табл. 2. Для всех расчетов статистическая обоснованность обнаруженной связи определялась исходя из уровня значимости (p-level), равного 0.05. Наибольшее совпадение ($R > 0.90$) для полей температуры у поверхности в отдельные дни, а также для периода в целом отмечается с данными OSTIA, а для солености — с климатическими данными WOA13.

Слабая корреляция наблюдений с базой OSTIA за 31 октября ($R = 0.58$) объясняется отражением в данных продукта затока теплых вод с запада, который не отмечается в этот день по другим источникам. Однако коэффициенты корреляции данных контактных измерений имеют устойчивую связь для средних за 5-суточный период данных OSTIA, что подтверждает репрезентативность этой базы вне зависимости от наличия отдельных суточных температурных аномалий.

«Схожесть» продуктов PSY4QV3R1, GLORYS12V1 с данными НИС «АМК» хоть несколько ниже ($R = 0.72...0.86$), но для всех горизонтов и осреднений практически одинакова. Фактическая соленость отражается в модельных данных несколько лучше температуры воды, что вероятно, связано с её малой пространственной и временной изменчивостью в этом регионе, близкой к климатическим значениям.

Атлас WOA13 описывает изменчивость температуры воды посредственно (табл. 2), особенно на глубине, что отражает анормальность тепловых процессов, протекающих в море последние годы, отмеченную многими исследователями [1].

Таблица 2

Коэффициенты корреляции ежесуточных, осредненных за период и композитных полей температуры (*T*) и солености (*S*), полученных между данными судовых измерений НИС «Академик Мстислав Келдыш» и соответствующими данными продуктов PSY4QV3R1, GLORYS12V1, WOA13, OSTIA

Correlation coefficients of daily, period averaged and composite fields of temperature (*T*) and salinity (*S*) obtained from ship measurements of the R/V "Akademik Mstislav Keldysh" with the corresponding product data PSY4QV3R1, GLORIS12V1, WOA13, OSTIA

Дата	PSY4QV3R1		GLORYS12V1		WOA13		OSTIA
	T	*S*	*T*	*S*	*T*	*S*	*T* (0 м)
Глубина 10 м							
29.10.2018	0.76	0.85	0.78	0.84	—	—	0.83
30.10.2018	0.74	0.84	0.78	0.84			0.90
31.10.2018	0.73	0.84	0.78	0.85			0.58
01.11.2018	0.73	0.84	0.77	0.84			0.93
02.11.2018	0.75	0.85	0.77	0.84			0.90
Среднее за период	0.75	0.85	0.79	0.85	0.59	0.93	0.90
Композит	0.72	0.85	0.76	0.86	—	—	0.77
Глубина 50 м							
29.10.2018	0.76	0.84	0.76	0.83	—	—	—
30.10.2018	0.74	0.83	0.76	0.84			
31.10.2018	0.73	0.83	0.76	0.84			
01.11.2018	0.74	0.83	0.75	0.84			
02.11.2018	0.75	0.83	0.76	0.84			
Среднее за период	0.74	0.83	0.77	0.85	0.58	0.90	
Композит	0.74	0.86	0.75	0.85	—	—	
Глубина 75 м							
29.10.2018	0.81	0.82	0.78	0.78	—	—	—
30.10.2018	0.78	0.83	0.79	0.78			
31.10.2018	0.78	0.83	0.79	0.80			
01.11.2018	0.77	0.83	0.79	0.80			
02.11.2018	0.78	0.82	0.79	0.81			
Среднее за период	0.79	0.83	0.79	0.80	0.42	0.90	
Композит	0.79	0.83	0.80	0.82	—	—	

Окончание табл. 2

Дата	PSY4QV3R1		GLORYS12V1		WOA13		OSTIA
	T	*S*	*T*	*S*	*T*	*S*	*T* (0 м)
Глубина 100 м							
29.10.2018	0.79	0.78	0.74	0.83	—	—	—
30.10.2018	0.78	0.77	0.75	0.83			
31.10.2018	0.77	0.77	0.76	0.82			
01.11.2018	0.77	0.77	0.76	0.81			
02.11.2018	0.78	0.77	0.75	0.83			
Среднее за период	0.78	0.77	0.76	0.83	0.35	0.83	
Композит	0.78	0.78	0.76	0.85	—	—	

Корреляция пространственных полей температуры поверхности воды по данным судовых наблюдений, а также модельных продуктов с результатами спутниковых измерений Suomi NPP VIIRS за 30.10.2018 представлены в табл. 3. Как можно видеть, наибольшие коэффициенты корреляции у спутниковых данных VIIRS отмечены со значениями из архива OSTIA, а также с данными НИС «АМК». Наименьшая корреляция зафиксирована с климатическими данными WOA13. Таким образом, суточные спутниковые данные и продукт OSTIA имеют хорошее совпадение 30.10.2018.

Количественные оценки расхождений положения изотерм и изохалин, часть из которых представлена на рис. 2–4, приведены в табл. 4. Так как поля температуры по данным WOA13 отличалось от других более значительными аномалиями, в расчетах MHD оно не участвовало.

Изотермы по данным продуктов PSY4QV3R1 и GLORYS12V1 не показали достаточной схожести с аналогичными изолиниями, полученными по наблюдениям с борта НИС «АМК» на всех горизонтах (табл. 4). У PSY4QV3R1 для верхних горизонтов расхождение изотерм составляло более 30 км, при этом изолинии даже не соответствовали общим тенденциям изолинии, полученной по данным измерений (рис. 2 и 3). Продукт GLORYS12V1 показал немногим лучший результат, за исключением горизонта 75 м, где изотерма у продукта была очень близка к изотерме *in situ* данных.

Так как данные OSTIA за 31 октября отражали наличие аномалии, которая не отмечалась ни в другие дни, ни в других данных, расчет MHD проводился как для композитных данных, так и для осредненных данных. MHD между изолиниями 6.7 по *in situ* данным и композитным OSTIA равняется 41.93 км. Большой вклад в такую величину дает как раз аномалия — заток теплых вод на северо-западе полигона. MHD без

Таблица 3

Коэффициенты корреляции полей температуры поверхности воды, полученных по спутниковым данным Suomi NPP VIIRS за 30.10.2018 г. с судовыми измерениями НИС «Академик Мстислав Келдыш», суточными за 30.10.2018 г. данными продуктов на глубине 10 м PSY4QV3R1, GLORYS12V1, OSTIA (0 м), а также осредненными за октябрь-ноябрь данными WOA13

Correlation coefficients of sea surface temperature fields obtained from satellite data of Suomi NNP Viirs for October 30, 2018 with *in situ* measurements of the R/V "Akademik Mstislav Keldysh", daily diurnal data for October 30, 2018 of product data at a depth of 10 m PSY4QV3R1, GLORIS12V1, OSTIA (0 m) and WOA13 data averaged for October-November

Дата	AMK	PSY4QV3R1	GLORYS12V1	WOA13	OSTIA (0 м)
30.10.2018	0.81	0.74	0.73	0.66	0.80

Таблица 4

Значения MHD для соответствующих изолиний на разных горизонтах для *in situ* наблюдений и каждого из продуктов

MHD values for the corresponding contours at different horizons for *in situ* observations and each of the products

H, м	*T*, °C	MHD, км		*S*, ‰	MHD, км		
		PSY4QV3R1	GLORYS12V1		PSY4QV3R1	GLORYS12V1	WOA13
10	6.7	34.4	21.5	34.50	9.6	1.3	1.4
50	6.6	35.8	23.9	34.55	2.2	1.3	23.5
75	5.4	32.9	3.1	34.55	1.4	1.4	54.7
100	6.0	14.4	15.3	34.55	1.2	0.8	50.0

учета затока, когда рассматривалась только изолинии в южной части полигона (рис. 4), равняется 4.17 км. Расчет модифицированного расстояния по той же изолинии и осредненным данным OSTIA показал почти идеальное совпадение 0.87 км.

В сравнении изолиний по солености на глубине 10 м наилучшее совпадение показали данные GLORYS12V1 и WOA13, а на глубинах 75 м и 100 м GLORYS12V1 и PSY4QV3R1, MHD у которых составляло менее 1.5 км. Наилучший показатель по всем горизонтам для солености отмечался у продукта GLORYS12V1.

Значения модифицированного расстояния Хаусдорфа, полученные для изолиний *in situ* данных и рассматриваемых продуктов, как и анализ статистических характеристик, подтвердили не самую лучшую воспроизводимость продуктами полей температуры и относительно хорошую воспроизводимость солености. Сравнение по конкретной изолинии на каждом горизонте показывает наилучший результат для продуктов OSTIA и GLORYS12V1, в то время как климатические данные имеют самые значительные расхождения с *in situ* измерениями.

6. Заключение

В работе приводится количественное и качественное сравнение данных по температуре и солености разных информационных продуктов из открытых океанографических баз данных с результатам in situ измерений, полученных для юго-западной части Баренцева моря в ходе экспедиции НИС «Академик Мстислав Келдыш» в октябре-ноябре 2018 г. Использовались базы как содержащие данные по температуре и солености по глубинам: PSY4QV3R1 (на основе прогностической модели), GLORYS12v1 (использующая реанализ), WOA13 (обобщающая данные наблюдений), так и только данные температуры поверхности моря продукта OSTIA и спутникового радиометра Suomi NPP VIIRS. Для сравнения был привлечен широкий комплекс различных апробированных статистических методов, позволяющий получить количественные оценки интегрального соответствия полей, их изменчивости, а также соответствия в пространстве конкретных изолиний.

Результаты сравнения судовых данных и описанных продуктов показали, что среди последних отсутствуют наборы данных, оптимально описывающие термохалинные характеристики всей водной толщи на акватории Баренцева моря в осенний период времени. Основные отличия у всех продуктов проявляются в описании распределения температуры. Поля солености воспроизводятся рассмотренными глобальными базами в целом лучше, чем поля температуры.

Лучшее совпадение температуры поверхности с судовыми данными отмечается у продукта OSTIA и наблюдений спутникового радиометра Suomi NPP VIIRS. Даже выявленный по данным OSTIA аномальный заток теплых вод не повлиял на общую репрезентативность осредненных данных.

Из продуктов, содержащих глубоководные данные, наиболее достоверным можно назвать GLORYS12V1, но со значительными допущениями. Основные различия наблюдаются в количественных оценках полей температуры, соответствующие аномалиям около 0.7 °C и отклонениям в положении конкретных изотерм в десятки километров. В солености наблюдается занижение дисперсии и, соответственно, несколько «сглаженные» поля.

Полученные результаты показали, что при описании изменчивости гидрологических условий на акватории арктических морей еще рано полностью опираться на данные глобальных океанографических баз, несмотря на их охват и регулярность обновления. Использование данных из продуктов требует их тщательной верификации и взвешенного подхода. Только комплексный подход с учетом всех форм доступных гидрологических данных позволит получить достоверную информацию для оценки региональных климатических изменений.

7. Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема 0149–2019–0015).

Литература

1. *Аксёнов П.В.*, *Иванов В.В.* «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64, № 1. С. 42–54.
2. *Lind S.* et al. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // Nature Climate Change. 2018. N 8. P. 634–639.

3. *Ожигин В.К.* и др. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИНРО, 2016. 260 с.
4. *Суркова Г.В.*, *Романенко В.А.* Современная изменчивость энергообмена с атмосферой в Баренцевом море // Тезисы докладов международной научной конференции «Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики». СПб.: ГНЦ РФ ААНИИ, 2020. С. 217–219.
5. *Donlon C.J.* et al. The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 116. P. 140–158.
6. *Carton J.A.* et al. SODA3: a new ocean climate reanalysis // J. Climate. 2018. N 31. P. 6967–6983.
7. Ocean Monitoring and Forecasting. Ocean Forecasts. URL: http://bulletin.mercator-ocean.fr/ (дата обращения: 20.02.2020).
8. *Зинченко В.А., Гордеева С.М., Собко Ю.В., Белоненко Т.В.* Мезомасштабные вихри Лофотенской котловины по спутниковым данным // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 3. С. 46–54. doi: 10.7868/S2073667319030067
9. *Белоненко Т.В., Колдунов А.В.* О трендах стерических колебаний уровня в Северной Атлантике // Исследование Земли из космоса. 2018. № 5. С. 31–40.
10. *Гордеева С.М., Жарова А.Д.* Оперативная оценка рыбопромысловой обстановки в юго-восточной части Тихого океана // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 96–103.
11. *Кочергин В.П., Тимченко И.Е.* Мониторинг гидрофизических полей океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 279 с.
12. *Соколов В.А., Грузинов В.М.* Проблемы моделирования гидрологических полей в арктических морях // Арктика: экология и экономика. 2014. № 2(14). С. 40–49.
13. *Behrenfeld M.J.* et al. A photoacclimation and nutrient based model of light-saturated photosynthesis for quantifying oceanic primary production // Mar. Ecol. Progr. Ser. 2002. V. 228. P. 103–117.
14. *Зимин А.В.* и др. Гидрологические условия в юго-западной части Баренцева моря в октябре — ноябре 2018 г. (по материалам 74-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш») // Материалы конференции «Итоги экспедиционных исследований в 2018 году в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген». Севастополь: ИМБИ РАН, 2019. С. 79–80.
15. Copernicus Marine Environment Monitoring Service. GLOBAL OCEAN1/12° PHYSICS ANALYSIS AND FORECAST UPDATED DAILY. URL: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view= details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024 (дата обращения: 30.03.2018).
16. Quality information document for Global Sea Physical Analysis and Forecasting Product GLOBAL ANALYSIS FORECAST PHY001024. URL: http://resources.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001–024.pdf (дата обращения: 27.01.2020).
17. *Mathiot P.* et al. Explicit representation and parametrised impacts of under ice shelf seas in the z* coordinate ocean model NEMO 3.6 // Geoscientific Model Development. 2017. V. 10, N7. P. 2849–2874.
18. Copernicus Marine Environment Monitoring Service. GLOBAL OCEAN PHYSICS REANALYSIS. URL: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_ csw&task=results?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030 (дата обращения: 23.06.2019).
19. 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: 27.01.2020).
20. *Poli P.* et al. Assimilation of Global Positioning System radio occultation data in the ECMWF ERA-Interim reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2010. V. 136, N653. P. 1972–1990.
21. Asia-Pacific Data Research Center. URL: http://apdrc.soest.hawaii.edu (дата обращения: 23.06.2019).
22. *Locarnini R.A.* et al. World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature / Eds. S. Levitus, A. Mishonov // NOAA Atlas NESDIS73, 2013. 40 p.
23. *Zweng M.M.* et al. World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity / Eds. S. Levitus, A. Mishonov // NOAA Atlas NESDIS74, 2013. 39 p.
24. National centers for environmental information. National Oceanic and Atmospheric administration. URL: https://www.nodc.noaa.gov/ (дата обращения: 23.06.2019).
25. Ocean Color Web.Ocean Level-3 Standard Mapped Image Product. URL: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/docs/format/Ocean_Level-3_SMI_Products.pdf (дата обращения: 10.02.2020).
26. *Liu Y., Minnett P.J.* Sampling errors in satellite-derived infrared sea-surface temperatures. Part I: Global and regional MODIS fields // Remote Sensing of Environment. 2016. N177. P. 48–64.
27. *Мальцев К.А., Мухарамова С.С.* Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer): Учебное пособие. Казань: Казанский университет, 2014. 103 с.
28. *Гордеева С.М., Шевчук О.И.* Руководство по статистической обработке глобальных архивов информации (на примере альтиметрических данных). СПб.: РГГМУ, 2013. 44 с.

29. *Eilola K.* et al. On the dynamics of oxygen, phosphorus and cyanobacteria in the Baltic Sea; A model study // Journal of Marine Systems. 2009. V. 75 (1–2). P. 163–184.
30. *Dukhovskoy D.S.* et al. Skill metrics for evaluation and comparison of sea ice models // J. Geophys. Res. Oceans. 2015. V. 120. P. 5910–5931.
31. *Hiester H.R.* et al. A topological approach for quantitative comparisons of ocean model fields to satellite ocean color data // Methods in Oceanography. 2016. V. 17. P. 232–250.

References

1. *Aksenov P.V.*, *Ivanov V.V.* "Atlantification" as a possible cause for reducing of the sea-ice cover in the Nansen Basin in winter. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. *Arctic and Antarctic Research*. 2018, 64 (1), 42–54. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54 (in Russian).
2. *Lind S.* et al. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. *Nature Climate Change*. 2018, 8, 634–639.
3. *Ozhigin V.K.* et al. The waters of the Barents Sea: structure, circulation, variability. *Murmansk*, *PINRO*, 2016. 260 p. (in Russian).
4. *Surkova G.V.*, *Romanenko V.A.* Current variability of energy exchange with the atmosphere in the Barents Sea. *Tezisy Dokladov Mezhdunarodnoj Nauchnoj Konferencii «Kompleksnye Issledovaniya Prirodnoj Sredy Arktiki i Antarktiki»*. *SPb.*, *GNC RF AANII*, 2020, 217–219 (in Russian).
5. *Donlon C.J.* et al. The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment*. 2012, 116, 140–158.
6. *Carton J.A.* et al. SODA3: a new ocean climate reanalysis. *J. Climate*. 2018, 31, 6967–6983.
7. Ocean Monitoring and Forecasting. Ocean Forecasts. URL: http://bulletin.mercator-ocean.fr/ (date of access: 20.02.2020).
8. *Zinchenko V.A.*, *Gordeeva S.M.*, *Sobko Yu.V.*, *Belonenko T.V.* Analysis of mesoscale eddies in the Lofoten Basin based on satellite altimetry. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofzika*. 2019, 12, 3, 46–54. doi: 10.7868/S2073667319030067
9. *Belonenko T.V.*, *Koldunov A.V.* Trends of Steric Sea level oscillations in the North Atlantic. *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019, 55 (9), 1106–1113.
10. *Gordeeva S.M.*, *Zharova A.D.* Rapid Fishery Assessment in the South-East Pacific. *Uchenye Zapiski RGGMU*. 2016, 44, 96–103 (in Russian).
11. *Kochergin V.P.*, *Timchenko I.E.* Ocean hydrophysical field monitoring. *Leningrad*, *Gidrometeoizdat*, 1987. 279 p. (in Russian).
12. *Sokolov V.A.*, *Gruzinov V.M.* Problems of modeling hydrological fields in the Arctic seas. *Arktika*: *e'kologiya i e'konomika*. 2014, 2(14), 40–49 (in Russian).
13. *Behrenfeld M.J.* et al. A photoacclimation and nutrient based model of light-saturated photosynthesis for quantifying oceanic primary production. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 2002, 228, 103–117.
14. *Zimin A.V.* et al. Hydrological conditions in the southwestern part of the Barents Sea in October — November 2018 (based on materials from the 74th flight of the R/V "Akademik Mstislav Keldysh"). *Materialy Konferencii «Itogi E'kspedicionnyx Issledovanij v 2018 Godu v Mirovom Okeane, Vnutrennix Vodax i na Arxipelage Shpicbergen»*. *Sevastopol': IMBI RAN,* 2019, 79–80 (in Russian).
15. Copernicus Marine Environment Monitoring Service. GLOBAL OCEAN 1/12° PHYSICS ANALYSIS AND FORECAST UPDATED DAILY. URL: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view= details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024 (date of access: 30.03.2018).
16. Quality information document for Global Sea Physical Analysis and Forecasting Product GLOBAL ANALYSIS FORECAST PHY001024. URL: http://resources.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001–024.pdf (date of access: 27.01.2020).
17. *Mathiot P.* et al. Explicit representation and parametrised impacts of under ice shelf seas in the z* coordinate ocean model NEMO 3.6. *Geoscientific Model Development*. 2017, 10, 7, 2849–2874.
18. Copernicus Marine Environment Monitoring Service. GLOBAL OCEAN PHYSICS REANALYSIS. URL: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&task=results?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030 (date of access: 23.06.2019).
19. 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: 27.01.2020).
20. *Poli P.* et al. 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.
21. Asia-Pacific Data Research Center. URL: http://apdrc.soest.hawaii.edu (date of access: 23.06.2019).

22. *Locarnini R.A.* et al. World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature / Eds. S. Levitus, A. Mishonov. *NOAA Atlas NESDIS*73, 2013, 40 p.
23. *Zweng M.M.* et al. World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity / Eds. S. Levitus, A. Mishonov. *NOAA Atlas NESDIS*74, 2013, 39 p.
24. National centers for environmental information. National Oceanic and Atmospheric administration. URL: https://www.nodc.noaa.gov/ (date of access: 23.06.2019).
25. Ocean Color Web.Ocean Level-3 Standard Mapped Image Product. URL: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/docs/format/Ocean_Level-3_SMI_Products.pdf (date of access: 10.02.2020).
26. *Liu Y.*, *Minnett P.J.* Sampling errors in satellite-derived infrared sea-surface temperatures. Part I: Global and regional MODIS fields. *Remote Sensing of Environment*. 2016, 177, 48–64.
27. *Maltsev K.A.*, *Mukharamova S.S.* Building models of spatial variables (using the Surfer package): Tutorial. *Kazan*, *Kazan University*, 2014. 103 p. (in Russian).
28. *Gordeeva S.M.*, *Shevchuk O.I.* Guidance on the statistical processing of global archives of information (on the example of altimetry data). *SPb.*, *RGGMU*, 2013. 44 p. (in Russian).
29. *Eilola K.* et al. 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.
30. *Dukhovskoy D.S.* et al. Skill metrics for evaluation and comparison of sea ice models. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2015, 120, 5910–5931.
31. *Hiester H.R.* et al. A topological approach for quantitative comparisons of ocean model fields to satellite ocean color data. *Methods in Oceanography*. 2016, 17, 232–250.

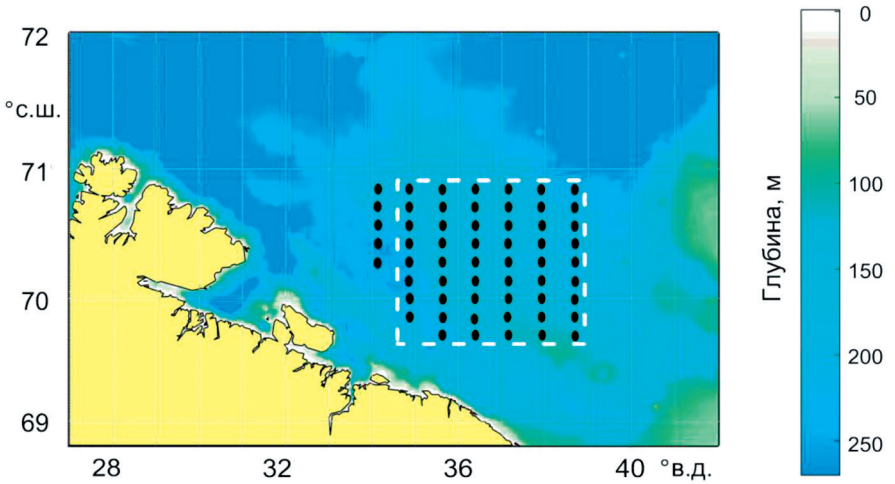

Рис. 1. Батиметрическая карта юго-западной части Баренцева моря: черные точки — положения станций *in situ* измерений в ходе экспедиции, белая пунктирная линия — район, используемый для сравнения разнородных данных.

Fig. 1. A bathymetry map of the southwestern part of the Barents Sea, where the black dots indicate the positions of *in situ* measurement stations during the expedition, and the white dashed line shows the area used to compare heterogeneous data.

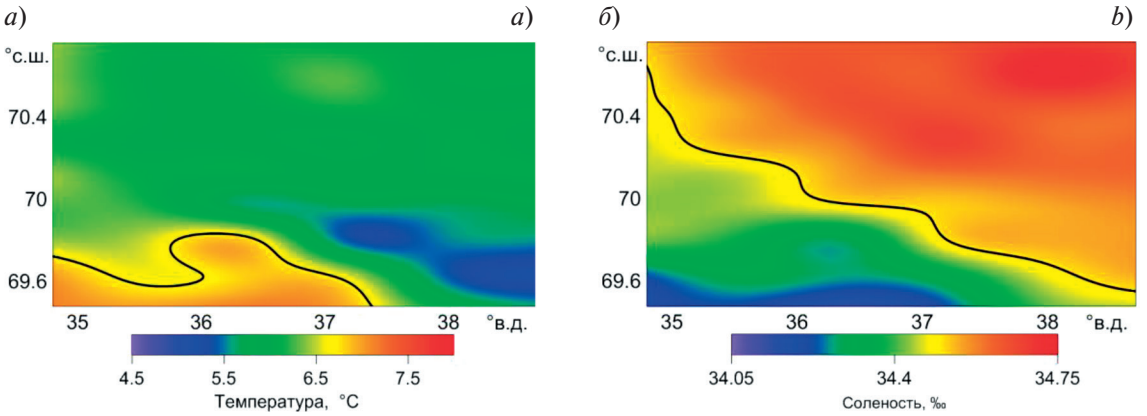

Рис. 2. Распределение температуры (*а*) и солености (*б*) на глубине 10 м по *in situ* наблюдениям на полигоне, положение которого представлено на рис. 1. Черной линией на (*а*) обозначена изолиния 6.7 °С, а на (*б*) — изолиния 33.5 ‰

Fig. 2. Distribution of temperature (*a*) and salinity (*b*) at a depth of 10 m according to *in situ* observations at the polygon corresponding to fig. 1. The black line on (*a*) indicates the isoline 6.7 °C, and on (*b*) the isoline 33.5 ‰.

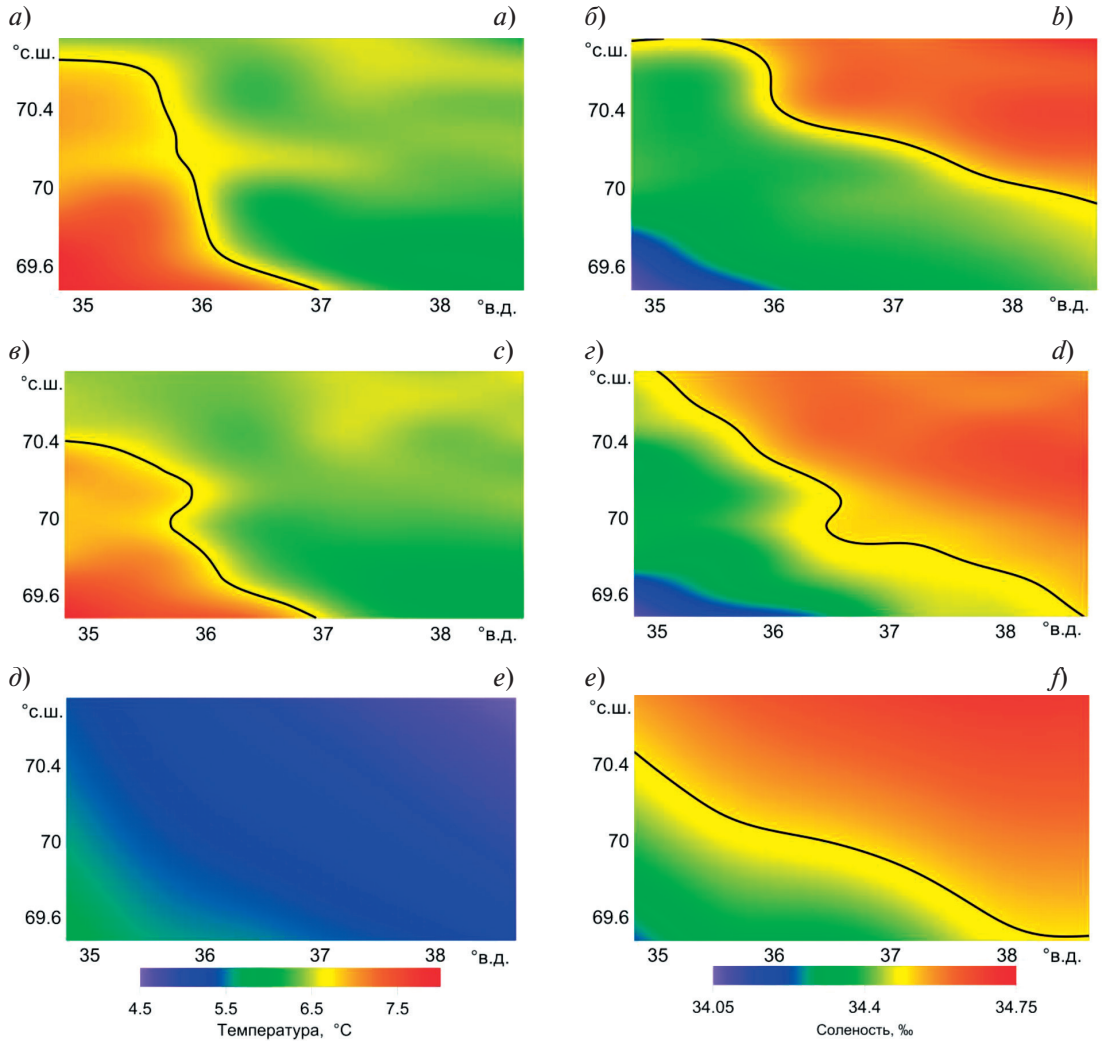

Рис. 3. Распределение температуры (*а*, *в*, *д*) и солености (*б*, *г*, *е*) на глубине 10 м по композитным данным PSY4QV3R1 (*а*, *б*), GLORYS12V1 (*в*, *г*) и осредненным данным WOA13 (*д*, *е*). На картах температуры черной линией обозначена изолиния 6.7 °С, на картах солености — 33.5 ‰.

Fig. 3. Distribution of temperature (*a*, *c*, *e*) and salinity (*b*, *d*, *f*) at a depth of 10 m according to composite data PSY4QV3R1 (*a*, *b*), GLORIS12V1 (*c*, *d*) and averaged data WOA13 (*e*, *f*). On the temperature maps, the black line indicates the contour 6.7 °C, on salinity maps — 33.5 ‰.

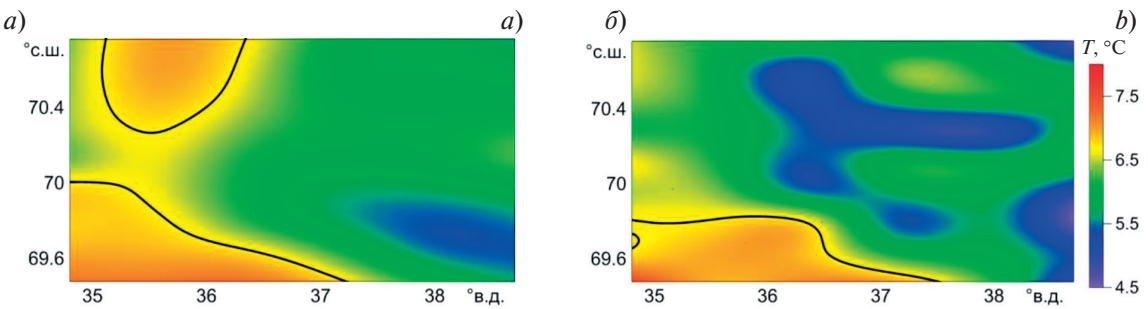

Рис. 4. Температура поверхности моря по композитным данным OSTIA (*а*) и спутниковым данным VIIRS за 30.10.2018 г. (*б*). Черной линией выделена изолиния 6.7 °С.

Fig. 4. Sea surface temperature according to composite data of OSTIA (*a*) and VIIRS satellite data for October 30, 2018 (*b*). The black line is the isoline of 6.7 °C.