

Изменчивость характеристик вод в северо-восточной части Гренландского моря в зимний период 2019–2023 годов

Т. М. Максимовская^{1, 2, ✉}, А. В. Зимин¹, О. А. Атаджанова¹,
А. А. Коник¹, Д. В. Моисеев²

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Мурманский морской биологический институт РАН, Мурманск, Россия

✉ maximovskaja.t@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.07.2024; одобрена после рецензирования 23.08.2024;
принята к публикации 29.01.2025.

Аннотация

Цель. Выполнить анализ особенностей изменчивости характеристик вод в северо-восточной части Гренландского моря с акцентом на район Прикромочной фронтальной зоны в зимний период на основе результатов судовых измерений, а также оценить соответствие данных реанализа результатам контактных наблюдений – цель данного исследования.

Методы и результаты. В работе использовались результаты измерений температуры и солёности вод в северо-восточной части Гренландского моря по данным экспедиционных исследований в зимний период 2019–2023 гг. Оценка аномалий температуры и солёности атлантических вод выполнялась путем сопоставления данных *in situ* с климатическими данными WOA-2023. Для оценки качества реанализов привлекались данные из продуктов *MERCATOR PSY4QV3R1*, *CMEMS GLORYS12v1* и *TOPAZ5* на горизонтах 0–40 м. Сравнение осуществлялось с применением стандартных статистических методов. Установлено, что исследуемый фронтальный раздел между арктическими и атлантическими водами прослеживался на расстоянии до 80 км от ледовой кромки. Максимальные градиенты термохалинных характеристик в области Прикромочной ледовой зоны были зафиксированы в 2023 г. в условиях значительных положительных аномалий температуры поверхностных вод атлантического происхождения. Показано, что данные реанализов хорошо описывают температуру и солёность только в области атлантических вод.

Выводы. Результаты судовых наблюдений подтверждают существование устойчивых положительных аномалий температуры вод относительно климатических значений в поверхностном слое в зимний период в северо-восточной части Гренландского моря, что отражается на характеристиках градиентов гидрологических полей в области Прикромочной фронтальной зоны. Сравнение измеренных и модельных полей температуры и солёности показало, что в последних отсутствуют наборы данных, достоверно описывающие термохалинные характеристики вод вблизи ледовой кромки.

Ключевые слова: температура воды, солёность воды, фронтальная зона, Прикромочная ледовая зона, *MERCATOR*, *GLORYS12v1*, *TOPAZ5*, судовые наблюдения, Гренландское море

Благодарности: работа выполнена в рамках тем государственного задания FMWE-2024-0028 и FMEE-2024-0016.

Для цитирования: Изменчивость характеристик вод в северо-восточной части Гренландского моря в зимний период 2019–2023 годов / Т. М. Максимовская [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 2. С. 146–159. EDN IAADWK.

Variability of Water Characteristics in the Northeastern Part of the Greenland Sea during the Winter Periods in 2019–2023

T. M. Maksimovskaya^{1, 2, ✉}, A. V. Zimin¹, O. A. Atadzhanova¹,
A. A. Konik¹, D. V. Moiseev²

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Murmansk Marine Biological Institute, Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia

✉ maximovskaja.t@yandex.ru

Abstract

Purpose. The paper aims to present the results of *in situ* measurements, analyze the features of variability of water characteristics in the northeastern part of the Greenland Sea with an emphasis on the Marginal Frontal Zone in winter based on the onboard measurement results, as well as to assess the agreement between the reanalysis data and the *in situ* observations.

Methods and Results. The results of temperature and salinity measurements performed during the expeditionary research in the northeastern part of the Greenland Sea in winter periods of 2019–2023 are used in the paper. The temperature and salinity anomalies of the Atlantic waters are assessed by comparing the *in situ* data with the WOA-2023 climatic data. To evaluate the reanalysis quality, the data from the MERCATOR PSY4QV3R1, CMEMS GLORYS12v1 and TOPAZ5 products for the 0–40 m depths are involved. The comparison is carried out using the standard statistical methods: descriptive statistics, spatial correlation analysis and discrepancy function method. It is found that the studied frontal section between the Arctic and Atlantic waters could be traced up to 80 km from the ice edge. The maximum gradients of thermohaline characteristics in the Marginal Frontal Zone were recorded in 2023 under conditions of the significant positive temperature anomalies of surface waters of the Atlantic origin. It is shown that the reanalysis data describe accurately temperature and salinity only within the Atlantic water region.

Conclusions. The results of *in situ* measurements confirm the existence of stable positive water temperature anomalies relative to the climatic values in the surface layer of the Greenland Sea northeastern part in winter, which influence the characteristics of hydrological field gradients in the Marginal Frontal Zone. Being compared, the temperature and salinity fields resulted from the observation and reanalysis data have shown that the latter lack the datasets which describe reliably the thermohaline characteristics of waters near the ice edge.

Keywords: water temperature, water salinity, frontal zone, Marginal Frontal Zone, MERCATOR, GLORYS12v1, TOPAZ5, onboard observations, Greenland Sea

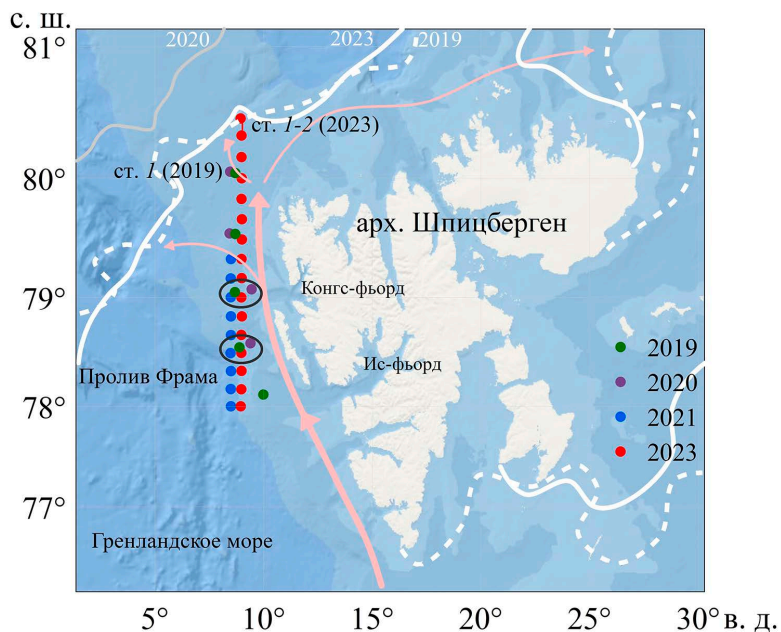
Acknowledgements: The study was carried out within the framework of state assignment themes FMWE-2024-0028 and FMEE-2024-0016.

For citation: Maksimovskaya, T.M., Zimin, A.V., Atadzhanova, O.A., Konik, A.A. and Moiseev, D.V., 2025. Variability of Water Characteristics in the Northeastern Part of the Greenland Sea during the Winter Periods in 2019–2023. *Physical Oceanography*, 32(2), pp. 174–186.

Введение

Северо-восточная часть Гренландского моря (пролив Фрама), прилегающая к арх. Шпицберген (рис. 1), характеризуется взаимодействием вод атлантического и арктического происхождения, а также подвержена влиянию талых вод, поступающих от берегов о. Западный Шпицберген. Через пролив Фрама осуществляется значительная часть водо- и теплообмена Арктического бассейна с Мировым океаном [1]. Норвежское течение, являющееся продолжением Северо-Атлантического течения и проходящее вдоль норвежского склона,

переносит на север в Северный Ледовитый океан теплые и соленые атлантические воды. В процессе движения Норвежское течение разделяется на две ветви. Одна из них поворачивает на восток в Баренцево море и продолжается как Нордкапское течение, вторая ветвь движется вдоль западной окраины Баренцева моря и склона арх. Шпицберген, становясь ядром Западно-Шпицбергенского течения (ЗШТ), которое разделяется на три ветви. Западное ответвление циркулирует главным образом в западном и юго-западном направлениях. Центральная ветвь ЗШТ движется в северном направлении над мелководным плато Ермака. Самая восточная, Шпицбергенская, ветвь продолжает движение над северным склоном арх. Шпицберген и циклонически циркулирует, погружаясь под опресненные и холодные арктические воды [2, 3].



Р и с. 1. Карта района исследования. Положение станций СТД-зондирования – цветные точки, области мониторинговых точек – черные эллипсы, положение течений – розовые стрелки, положение ледовой кромки в 2019 и 2023 гг. – сплошная и штриховая белые линии, положение ледовой кромки в 2020 г. – сплошная серая линия

F i g. 1. Map of research area. Position of CTD sensing stations are shown by colored dots, areas of monitoring points – by black ellipses, position of currents – by pink arrows, position of ice edge in 2019 and 2023 – by solid and dashed white lines, and position of ice edge in 2020 – by solid gray line

Прикромочная ледовая зона (ПЛЗ) определяется как переходная зона между свободным ото льда морем и плотным дрейфующим льдом и простирается от условной линии, где 15 % поверхности моря покрыто льдом, до положения изолинии 80%-ной концентрации ледового покрова [4]. Внутри или за пределами ПЛЗ обычно наблюдается Прикромочная фронтальная зона (ПрФЗ), существование которой обусловлено взаимодействием относительно распределенных холодных арктических вод, образующихся в результате таяния льда, и трансформированных атлантических вод в области, удаленной от ледовой

кромки на расстояние в несколько десятков километров [5]. Исследования, выполненные в ПЛЗ Баренцева моря весной 2023 г., показали, что ПрФЗ может находиться от ледовой кромки на расстоянии от единиц до сотен километров [6].

В районе ПрФЗ происходят сложные и разномасштабные процессы взаимодействия в системе океан – морской лед – атмосфера. Считается, что на изменчивость термохалинной структуры в районе к западу и северо-западу от архипелага Шпицберген существенное влияние могут оказывать атмосферные процессы [7]. В работе [8] рассматривается изменчивость положения ПЛЗ под влиянием динамики океана, связанной с вихревыми структурами, регистрируемыми в проливе Фрама по данным спутниковых радиолокационных наблюдений. Показано, что смещение ледовой кромки и интенсивность вихреобразования обуславливаются влиянием ветровых условий. В [9] обнаружено, что на изменчивость положения ледовой кромки, а соответственно и характеристики ПЛЗ, влияют приливные течения. При этом градиенты рельефа дна вызывают аномалии скорости приливных течений, что отражается на характеристиках прикромочной зоны независимо от интенсивности ветрового воздействия. Все упомянутые процессы влияют на параметры турбулентных потоков, их учет важен для качественного описания и прогнозирования гидрометеорологических условий в Арктике [10].

Глобальные модели океана, дополненные системами реанализа океанских данных, постоянно развиваются, а результаты их работы выкладываются в открытый доступ в виде оперативно дополняемых баз данных [11, 12]. В [13] отмечается, что основная причина ошибок океанских моделей при моделировании Арктического региона состоит в использовании параметризации подсеточных процессов, разработанных для средних широт. Создаваемые наборы пространственно-временных значений характеристик вод из этих баз часто используют, считая их при этом верифицированными, при решении прикладных задач, в том числе связанных с обнаружением фронтальных зон [14] или регистрацией изменений доступной потенциальной и кинетической энергии мезомасштабных вихрей [15]. При этом сопоставление судовых и модельных данных для рассматриваемого региона не проводится, что не всегда представляется корректным [16]. В работе [17] рассматриваются итоги океанографических наблюдений в Северном Ледовитом океане к северу от арх. Шпицберген. В частности, выполняется сравнение с климатическими данными из *Monthly Isopycnal/Mixed-layer Ocean Climatology (MIMOC)* с пространственным разрешением $0,5^\circ$. Было получено, что верхний слой вод атлантического происхождения по данным наблюдений был более теплым и соленым, чем было показано климатическими данными *MIMOC*. Оценка же качества воспроизведения океанскими базами данных характеристик поверхностных вод по повторяющимся судовым наблюдениям в северо-восточной части Гренландского моря в зимний период ранее не проводилась.

Таким образом, цель работы – выполнение анализа результатов уникальных судовых измерений за зимний период 2019, 2020, 2021 и 2023 гг., выявление особенности изменчивости характеристик вод в северо-восточной части Гренландского моря с акцентом на район ПрФЗ, а также оценка соответствия оперативно пополняемых океанических баз данных результатам наблюдений.

Данные и методы

В работе использовались данные визуальных наблюдений ледовой кромки и СТД-зондирований, полученные в ходе экспедиций Мурманского морского биологического института РАН на НИС «Дальние Зеленцы» в зимний период 2019, 2020, 2021 и 2023 гг. Измерения основных гидрологических параметров морской среды выполнялись методом СТД-профилирования с помощью СТД-зонда *SEACAT SBE 19 plus V2*. Исследования проводились на разрезах, расположенных на акватории к северо-западу от арх. Шпицберген (рис. 1) в следующие периоды: 20–21 ноября 2019 г., 6–7 ноября 2020 г., 23–25 ноября 2021 г. и 4–5 декабря 2023 г. Для верификации результатов визуальных наблюдений за кромкой льда, выполнявшихся с борта судна, использовались данные о положении ледяного покрова с пространственным разрешением $1/4^\circ$, подготовленные Бременским университетом [18]. В качестве границы положения ледовой кромки принималась изолиния, соответствующая 80%-ной концентрации льда. Отметим, что в относительной близости к ледовой кромке разрезы были выполнены лишь в 2019 и 2023 гг. В частности, в 2023 г. НИС «Дальние Зеленцы» удалось подойти вплотную к полю крупнобитого льда сплоченностью 7–8 баллов. При этом непосредственно СТД-зондирование выполнялось в области, где сплоченность не превышала 1–2 балла (визуальные наблюдения с борта судна) и почти отсутствовали риски потери зондирующего оборудования. Именно эти данные привлекались для описания характеристик вод в области ПрФЗ. В 2020 и 2021 гг. северные точки разрезов находились южнее ледовой кромки на 144 и 141 км соответственно, эти данные использовались для оценки межгодовой изменчивости гидрологических характеристик в указанном районе.

Для описания изменчивости гидрологических условий использовались данные двух мониторинговых групп станций, положение которых практически совпадало (рис. 1), выполненных в экспедициях 2019, 2020, 2021 и 2023 гг. На этих станциях для верхнего слоя (0–40 м) оценивалось отклонение результатов *in situ* от климатических значений температуры и солености, приведенных на сайте <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-atlas-2023/bin/woa23.pl> из атласа *World Ocean Atlas 2023* за тридцатилетний период 1991–2020 гг. с пространственным разрешением $1/4^\circ$.

Для сравнения результатов СТД-зондирования с данными оперативных океанских моделей использовались следующие продукты реанализа:

– *CMEMS GLORYS12v1* (GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030 / E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS). <https://doi.org/10.48670/moi-00021> (date of access: 05.02.2024));

– *MERCATOR PSY4QV3R1* (GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024 / Global Ocean Physics Analysis and Forecast. Marine Data Store (MDS). <https://doi.org/10.48670/moi-00016> (date of access: 05.02.2024));

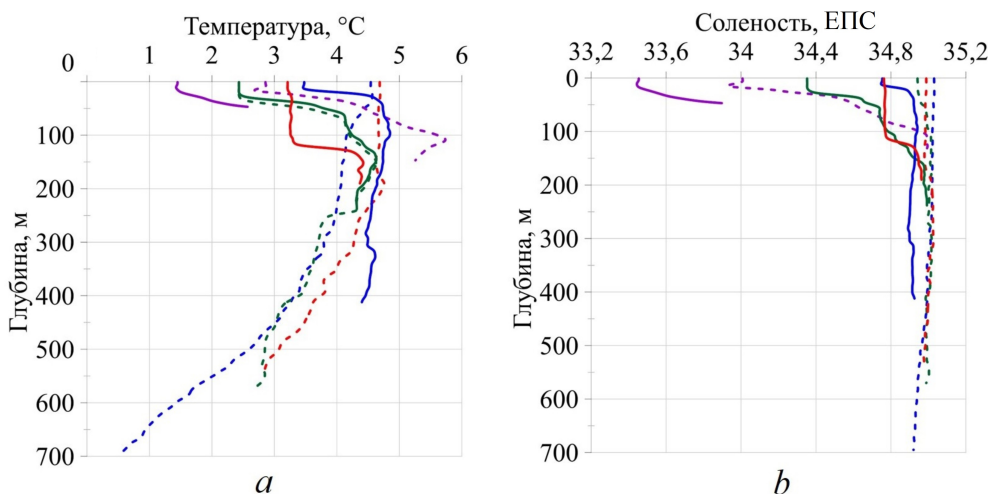
– *TOPAZ5* (ARCTIC_ANALYSISFORECAST_PHY_002_001 / Arctic Ocean Physics Analysis and Forecast. Marine Data Store (MDS). <https://doi.org/10.48670/moi-00001> (date of access: 05.02.2024)).

Выбор продуктов реанализа *GLORYS12v1*, *PSY4QV3R1* и *TOPAZ5* был обусловлен наличием высокого пространственного и временного разрешения данных для района исследования. Продукт *GLORYS12v1* службы мониторинга

морской среды *Copernicus* является реанализом глобального океана с суточной дискретностью и пространственным разрешением $1/12^\circ$. Продукт *PSY4QV3R1*, оперативная система анализа и прогноза Мирового океана европейской группы, характеризуется аналогичным разрешением. Набор ежедневных данных *TOPAZ5*, использующий модель *HYCOM*, содержит информацию для Арктического региона с пространственным разрешением выходных данных 6,25 км. Количественное сравнение выполнялось по методике, подробно изложенной в [16], согласно которой формировались однотипные массивы с приведением данных продуктов и измерений к единым координатам, горизонтам и даты выполнения каждой из выбранных станций. Для сравнения были сформированы два массива: первый – для области мониторинговых точек района, находящегося под влиянием атлантических вод, и второй – для области ПрФЗ, где происходит взаимодействие арктических и атлантических вод. Далее проводилось сопоставление массивов по средневзвешенным значениям температуры и солёности, функции расхождения, аномалии, коэффициенту корреляции. Для интерпретации функции расхождения (F) использовалась классификация, предложенная в [19]: $0 \leq F < 1$ (хорошо), $1 \leq F < 2$ (удовлетворительно) и $2 \leq F$ (плохо).

Результаты и обсуждение

Для анализа межгодовой динамики температуры и солёности на коротком интервале (2019–2023 гг.) были выбраны две мониторинговые области (рис. 1) – северная и южная – в пределах которых находились гидрологические станции, расположенные на максимально близком расстоянии друг от друга. Станции мониторинговых областей имели разброс глубин от 45 до 1000 м (рис. 2), поскольку находились на некотором отдалении друг от друга в области свала глубин. В целом на всех рассматриваемых станциях температура изменялась в диапазоне $0,5\text{--}5,8^\circ\text{C}$, солёность – в диапазоне 33,4–35 ЕПС. Прослеживалось влияние холодных и опресненных вод, выносимых из Конгс-фьорда и Ис-фьорда о. Западный Шпицберген в верхнем 20-метровом слое на станциях, которые находились ближе к арх. Шпицберген. Наиболее восточное положение, соответственно более близкое к арх. Шпицберген, имели станции, выполненные в 2020 г. Здесь на горизонте 0 м наблюдались наименьшие значения температуры $1,45^\circ\text{C}$ и солёности 33,45 ЕПС. Для южной группы станций были характерны средние значения температуры и солёности в верхнем 40-метровом слое $4,2^\circ\text{C}$ и 34,8 ЕПС. В пределах северной группы станций аналогичные средние значения были меньше на $1,4^\circ\text{C}$ и 0,4 ЕПС. На станции из северной группы, выполненной в 2023 г., наблюдался пикноклин на глубине 120 м, существование которого было также обусловлено смещением вод ЗШТ с прибрежными шпицбергенскими водами на мелководье.



Р и с. 2. Вертикальные профили температуры и солёности воды на мониторинговых станциях (сплошная линия – станции северной группы точек, штриховая – южной; зеленым цветом обозначены станции, выполненные в 2019 г., фиолетовым – в 2020 г., синим – в 2021 г., красным – в 2023 г.)

Fig. 2. Vertical profiles of water temperature and salinity at monitoring stations (stations of the northern group of points are marked with solid line, those of the southern group – by dotted line; stations completed in 2019 – by green line, in 2020 – by purple line, in 2021 – by blue line, and in 2023 – by red line)

Для выявления связи изменчивости термохалинных характеристик на рассматриваемых океанографических станциях с более крупномасштабными процессами на данном интервале времени использовались приземная температура воздуха на метеостанциях арх. Шпицберген и аномалии температуры и солёности вод в мониторинговых областях, которые были рассчитаны относительно климатических, осредненных за 30-летний период, значений из *World Ocean Atlas*. Климатические значения температуры и солёности рассчитывались как средние значения за 30-летний период в месяцы измерений (ноябрь, декабрь), осредненные для каждой из мониторинговых областей. Анализ аномалий приземной температуры воздуха на метеостанциях в населенных пунктах арх. Шпицберген показал значительное потепление в зимний период (после «нормального» периода 1960–2000 гг.) 2000–2021 гг. [20, 21]. Аномалии приземной температуры воздуха достигали 3–6 °С. Воды ЗШТ в мониторинговых областях в зимний период с 2019 по 2023 гг. характеризовались положительной аномалией температуры (рис. 3). Значение аномалии солёности было близко к климатической норме в 2021 и 2023 гг. и отрицательным в 2019 и 2020 гг. (–0,1 и –0,9 соответственно). В 2020 г. наблюдались значительная отрицательная аномалия солёности и низкая аномалия температуры. В этот период влияние оказывали прибрежные воды арх. Шпицберген, имеющие пониженные значения температуры и солёности вследствие воздействия стока рек преимущественно ледникового и снегового питания и сезонного таяния.

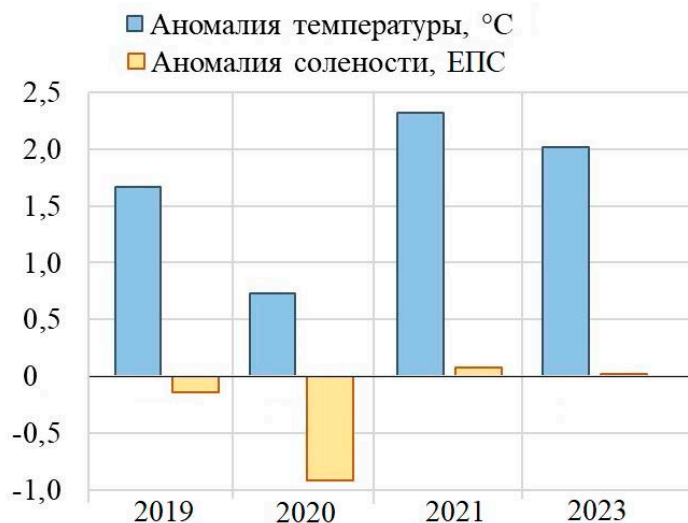


Рис. 3. Распределение аномалий температуры и солености в зимний период 2019–2023 гг. в мониторинговых областях

Fig. 3. Distribution of temperature and salinity anomalies in the monitoring areas during the winter periods in 2019–2023

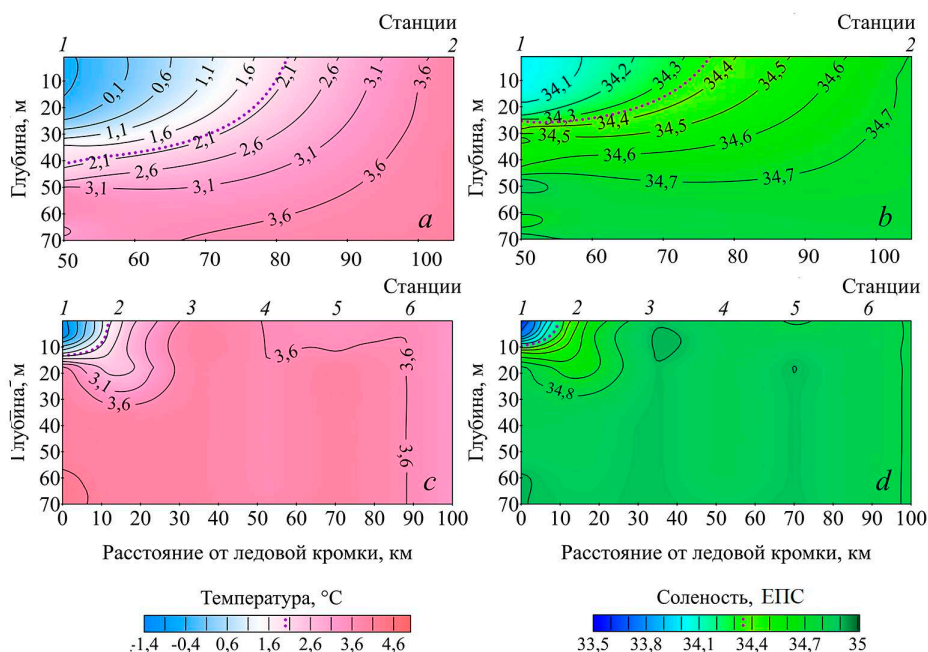
Сравнение данных *in situ* с данными продуктов реанализов в мониторинговых областях, расположенных преимущественно в атлантических водах, показало, что *PSY4QV3R1* и *TOPAZ5* наилучшим образом описывают температуру и соленость вод ЗШТ. Функция расхождения с данными *in situ* для всех продуктов в целом имела значения, близкие к нулю, что соответствовало «хорошему» результату сопоставления, а также отмечались высокие значимые коэффициенты корреляции (табл. 1). Статистическая значимость связи рядов измеренных и модельных данных определялась при уровне значимости 0,05. Ввиду того, что рассчитанный критерий Стьюдента изменялся в диапазоне 2–5 и был меньше критического значения (1,97–1,98), расхождения по среднему являлись значимыми. В среднем дисперсия температурных рядов измеренных данных составила $1\text{ }^{\circ}\text{C}^2$, а для данных реанализов – $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}^2$. Дисперсия солености наблюдений *in situ* была равна $0,5\text{ ЕПС}^2$, а у данных продуктов в два раза меньше – $0,25\text{ ЕПС}^2$. Данные реанализа показали более сглаженные профили температуры и солености в рассматриваемых координатах, занижая значения реальной дисперсии ряда. Продуктом *GLORIS12v1* температура и соленость вод были воспроизведены несколько хуже: средняя по ряду температура была завышена на $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, соленость – на $0,3\text{ ЕПС}$, однако коэффициент корреляции был достаточно высоким, функция расхождения попала в область «хороших» значений. В целом все три продукта показали хороший результат воспроизведения термохалинных характеристик в водах атлантического происхождения.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

**Статистические характеристики для сравнения данных
на мониторинговых станциях, расположенных в водах ЗШТ**
**Statistical characteristics for comparing the data obtained at the monitoring
stations located in the West Svalbard current waters**

Продукт / Reanalysis	Среднее значение (<i>in situ</i>) / Average value (<i>in situ</i>)	Среднее значе- ние (продукт) / Average value (reanalysis)	Аномалия / Anomaly	Функция расхождения / Cost function	Коэффициент корреляции / Correlation coefficient
Температура, °C / Temperature, °C					
<i>PSY4QV3R1</i>	3,54	3,49	0,05	0,05	0,80
<i>GLORIS12v1</i>	3,47	4,17	-0,70	0,69	0,79
<i>TOPAZ5</i>	3,53	3,44	0,09	0,09	0,90
Соленость, ЕПС / Salinity, PSU					
<i>PSY4QV3R1</i>	34,54	34,68	-0,14	0,24	0,95
<i>GLORIS12v1</i>	34,55	34,83	-0,28	0,58	0,91
<i>TOPAZ5</i>	34,58	34,75	-0,17	0,33	0,96

Отличия ПЛЗ от окружающих вод заключаются в наличии на поверхности тонкого распресненного слоя, образованного в результате таяния морского льда, а также в наличии конвекции и затухания ветровых волн и зыби [22]. В пределах этой области в северо-восточной части Гренландского моря в зимний период 2019 и 2023 гг. была зафиксирована ПрФЗ по данным контактного зондирования с борта судна. На рис. 4 показано вертикальное распределение температуры и солености на гидрологических разрезах. Измерения в 2019 и 2023 гг. выполнялись с различным шагом по пространству. Первая станция разреза, выполненного в 2019 г., расположена напротив залива Ис-фьорд на 10° в. д., остальные четыре станции разреза проходили вдоль 8,9° в. д. до 80° с. ш. В 2023 г. станции *CTD*-зондирования выполнялись вдоль меридиана (9° в. д.) с дискретностью 10 морских миль от 78° с. ш. до ледовой кромки (на 80° 30' с. ш.). Разрезы ориентированы вдоль Западно-Шпицбергенского течения, в северной части пересекают ПрФЗ и арктические воды. Нумерация станций начинается с северной станции разреза. Температура вод на разрезе 2019 г. изменялась в диапазоне -0,5 ... 4,7 °C, соленость – 34–35 ЕПС. В 2023 г. диапазон изменчивости термохалинных характеристик составил -1,3 ... 4,8 °C и 33,5–35 ЕПС. Образованный в ПЛЗ слой распресненных вод с отрицательной температурой был отделен пикноклином от подстилающих трансформированных атлантических вод на глубине 10–30 м (рис. 4). Фронтальный раздел, отражающий положение максимальных градиентов температуры и солености, повторял очертания пикноклина. На рис. 4 условная линия фронтального раздела проведена по ближайшим изолиниям гидрологических характеристик.



Р и с. 4. Вертикальное распределение температуры (слева) и солёности (справа) в Прикромочной ледовой зоне на разрезе в 2019 г. (*a, b*) и 2023 г. (*c, d*). Фиолетовая пунктирная линия – изотерма и изохалина, вдоль которых проходят фронтальные разделы температуры и солёности

Fig. 4. Vertical distribution of temperature (left) and salinity (right) in the Marginal Frontal Zone on the sections in 2019 (*a, b*) and 2023 (*c, d*). Purple dotted line denotes the isotherm and isohaline along which the frontal sections of temperature and salinity run

На разрезе, выполненном в 2019 г., холодные распресненные арктические воды (температура $< 0^{\circ}\text{C}$, солёность < 34 ЕПС) наблюдались на северной станции в верхнем 30-метровом слое, их подстилала более теплые и солёные воды Западно-Шпицбергенского течения (температура $> 3^{\circ}\text{C}$, солёность $> 34,5$ ЕПС). В период исследований горизонтальный градиент температуры между ст. 1 и 2 достигал $0,08^{\circ}\text{C}/\text{км}$ в верхнем 20-метровом слое и уменьшался до нулевых значений к горизонту 90 м, ниже температура выравнивалась в подстилающем теплом слое атлантических вод. Горизонтальный градиент солёности в верхнем 20-метровом слое составлял $0,01$ ЕПС/км, уменьшаясь до нуля к горизонту 46 м. Фронтальный раздел здесь находился между станциями на расстоянии 30 км от самой северной станции и 80 км от предполагаемой кромки льда по данным Бременского университета. Глубина залегания фронтальной зоны не превышала 70–80 м.

В 2023 г. арктические воды прослеживались в верхнем 10-метровом слое. Горизонтальный градиент температуры между ст. 1 и 3 достигал $0,15^{\circ}\text{C}/\text{км}$ на поверхности моря и уменьшался до нуля на глубине 30 м. Градиент солёности уменьшался от $0,04$ ЕПС/км на поверхности до нуля на глубине 20 м. Максимальные градиенты температуры и солёности наблюдались между ст. 1 и 3 и составляли $0,24^{\circ}\text{C}/\text{км}$ и $0,07$ ЕПС/км. Если проводить фронтальный раздел по этой линии, то он будет находиться в 7 км от поля крупнобитого льда сплоченностью 8 баллов. Глубина залегания фронтальной зоны не превышала 30 м.

Сравнение результатов контактных измерений с данными продуктов реанализов выполнялось для станций из области распространения арктических вод Арктики и ПрФЗ. В 2019 г. во фронтальной зоне была только северная станция разреза (ст. 1), в 2023 г. северная станция находилась в зоне поверхностных арктических вод, ст. 2 – во фронтальной зоне (рис. 1). Температура и соленость здесь были завышены моделями в среднем на 1–3 °С и 0,2–0,6 ЕПС. Коэффициент корреляции имел малые значения, но был статистически значим для всех сравниваемых пар рядов, кроме случая сравнения измеренной солености с данными продукта *TOPAZ5*. Функция расхождения имела «удовлетворительные» значения при использовании *PSY4QV3R1* и *GLORIS12v1*. Региональный реанализ *TOPAZ5* показал «хорошую» функцию расхождения при низких коэффициентах корреляции, что указывает на низкую способность моделей к воспроизведению тенденции изменчивости температуры и солености вод по вертикали (табл. 2).

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

**Статистические характеристики для сравнения данных
зоны арктических вод и Прикромочной фронтальной зоны
Statistical characteristics for comparing the data obtained
in the Arctic waters zone and the Marginal Frontal Zone**

Продукт / Reanalysis	Среднее значение (<i>in situ</i>) / Average value (<i>in situ</i>)	Среднее значение (продукт) / Average value (reanalysis)	Аномалия / Anomaly	Функция расхождения / Cost function	Коэффициент корреляции / Correlation coefficient
Температура, °С / Temperature, °C					
<i>PSY4QV3R1</i>	1,75	–0,81	3,12	1,39	0,54
<i>GLORIS12v1</i>	1,10	2,91	–1,20	1,01	0,62
<i>TOPAZ5</i>	0,63	2,07	–0,69	0,95	0,27
Соленость, ЕПС / Salinity, PSU					
<i>PSY4QV3R1</i>	34,44	33,66	0,78	1,79	0,54
<i>GLORIS12v1</i>	34,33	34,73	–0,40	1,00	0,65
<i>TOPAZ5</i>	34,25	34,17	0,08	0,22	0,38

На рис. 5 показаны профили температуры и солености воды на ст. 2 разреза 2023 г., расположенной в пределах Прикромочной фронтальной зоны. Данные реанализов *PSY4QV3R1* и *TOPAZ5* показали существенное занижение значений (> 2 °С и > 1 ЕПС) в верхнем 7–15-метровом слое. То есть по данным этих реанализов распространение арктических вод наблюдается на большем расстоянии, чем это было зафиксировано по данным зондирования. Продукт *GLORIS12v1*, напротив, показал профиль с более характерными для атлантических вод значениями (температура > 4 °С, соленость ≈ 35 ЕПС) и их распределением по глубине.

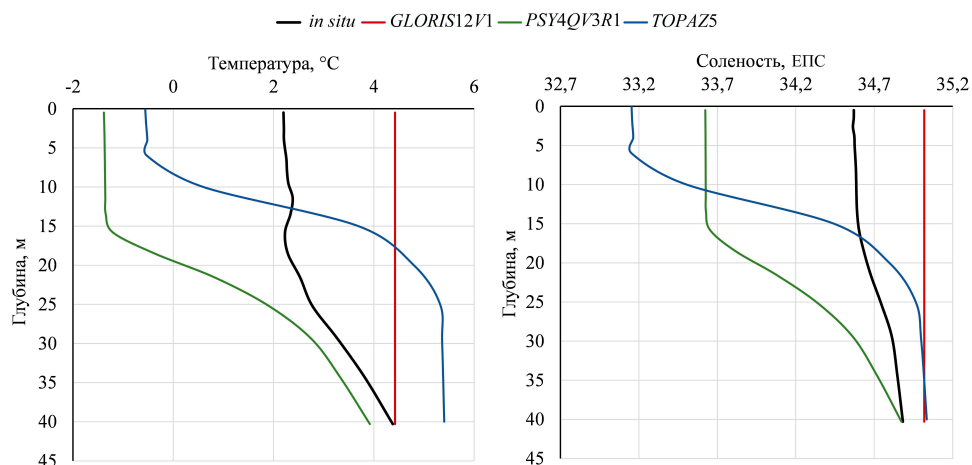


Рис. 5. Вертикальное распределение температуры (слева) и солёности (справа) по данным измерений *in situ* и реанализов *PSY4QV3R1*, *GLORIS12v1* и *TOPAZ5* на ст. 2 разреза в 2023 г.

Fig. 5. Vertical distribution of temperature (left) and salinity (right) based on the *in situ* measurement and *PSY4QV3R1*, *GLORIS12v1* and *TOPAZ5* reanalysis data at station 2 on section in 2023

Среднее значение дисперсии ($1,7\text{ }^{\circ}\text{C}^2$) рядов температуры по данным измерений и реанализа отличалось на сотые доли градуса. Дисперсия солёности по данным *in situ* составляла $0,4\text{ ЕПС}^2$, по данным реанализов – $0,5\text{ ЕПС}^2$. Область ПрФЗ отличалась высокой изменчивостью температуры и солёности, что отражали данные продуктов реанализа, однако они не воспроизводили с достаточной точностью ширину, глубину залегания, положение фронтального раздела и значения градиентов температуры и солёности вод фронтальной зоны. Функция расхождения температуры, рассчитанная для ПрФЗ по данным реанализа, имела в четыре раза меньшее значение, чем в мониторинговых областях, солёности – в 2,6 раза. Максимальное отклонение модельной температуры от измеренной в ПрФЗ в 35 раз превышало аналогичное в водах ЗШТ, солёности – в три раза. Это также отражает наличие значительных ошибок в воспроизведении моделями гидрологических параметров вблизи ледовой кромки.

Сравнение данных измерений *in situ* с данными продуктов *MERCATOR PSY4QV3R1*, *CMEMS GLORYS12v1* и *TOPAZ5* показало, что все три реанализа имеют хорошую согласованность значений температуры и солёности в водах Западно-Шпицбергенского течения, а распресненные охлажденные арктические воды и фронтальная зона между ними (арктическими и атлантическими) воспроизводятся плохо.

Заключение

Зимние периоды рассматриваемых 2019–2023 гг. характеризовались в целом как «теплые», наблюдались положительные аномалии температуры воды от $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 2020 г. до $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 2021 г. Аномалия температуры воды, зафиксированная в 2023 г., превышала аналогичную в 2019 г. на $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Фронтальный раздел в 2019 г. находился в 80 км от ледовой кромки, ПрФЗ наблюдалась в верхнем 30-метровом слое вод. В 2023 г. фронтальный раздел был зафиксирован на расстоянии 10 км от кромки льда, а ПрФЗ занимала верхний 10-метровый слой. Также более высокие градиенты температуры ($0,08\text{--}$

0,24 °С/км) на разрезе в 2023 г. относительно 2019 г. были обусловлены возросшей аномалией температуры Западно-Шпицбергенского течения.

Было показано, что термохалинные характеристики вод в области Прикромочной фронтальной зоны в северо-восточной части Гренландского моря в зимний период имеют сложную структуру, и при их описании в настоящий момент нельзя полностью опираться на данные глобальных океанографических моделей. Использование данных реанализа требует их тщательной верификации и взвешенного подхода. Только комплексный подход с учетом всех форм доступных гидрологических данных позволит получить достоверную информацию для оценки изменчивости гидрологических условий в Прикромочной фронтальной зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Walczowski W., Piechura J.* Influence of the West Spitsbergen Current on the local climate // *International Journal of Climatology*. 2011. Vol. 31, iss. 7. P. 1088–1093. <https://doi.org/10.1002/joc.2338>
2. The East Greenland Current and its impacts on the Nordic Seas: observed trends in the past decade / B. Rudels [et al.] // *ICES Journal of Marine Science*. 2012. Vol. 69, iss. 5. P. 841–851. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss079>
3. *Koenig Z., Kolås E. H., Fer I.* Structure and drivers of ocean mixing north of Svalbard in summer and fall 2018 // *Ocean Science*. 2021. Vol. 17, iss. 1. P. 365–381. <https://doi.org/10.5194/os-17-365-2021>
4. On the Definition of Marginal Ice Zone Width / C. Strong [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2017. Vol. 37, iss. 7. P. 1565–1584. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0171.1>
5. *Родионов В. Б., Костяной А. Г.* Океанические фронты морей Северо-Европейского бассейна. М.: ГЕОС, 1998. 290 с.
6. *Максимовская Т. М., Зимин А. В., Моисеев Д. В.* Результаты океанографических исследований в прикромочной зоне Баренцева моря весной 2023 года // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2023. Т. 16, № 4. С. 87–93. EDN SKMGYP. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16\(4\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16(4)-7)
7. Sea ice volume variability and water temperature in the Greenland Sea / V. Selyuzhenok [et al.] // *The Cryosphere*. 2020. Vol. 14, iss. 2. P. 477–495. <https://doi.org/10.5194/tc-14-477-2020>
8. *Петренко Л. А., Козлов И. Е.* Изменчивость прикромочной ледовой зоны и вихреобразования в проливе Фрама и у архипелага Шпицберген по данным спутниковых радиолокационных наблюдений в летний период // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 5. С. 631–649. EDN BZLYEJ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2023-5-631-649>
9. Evidence of Abrupt Transitions Between Sea Ice Dynamical Regimes in the East Greenland Marginal Ice Zone / D. M. Watkins [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2023. Vol. 50, iss. 15. e2023GL103558. <https://doi.org/10.1029/2023GL103558>
10. *Семенов В. А.* Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 57, № 1. С. 21–33. EDN CLCCMG. <https://doi.org/10.31857/S0002351521010119>
11. The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system / C. J. Donlon [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 116. P. 140–158. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.017>
12. *Carton J. A., Chepurin G. A., Chen L.* SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis // *Journal of Climate*. 2018. Vol. 31, iss. 17. P. 6967–6983. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0149.1>
13. Взаимодействие атмосферы и океана в Северном Ледовитом океане по данным измерений в летне-осенний период / И. А. Репина [и др.] // *Российская Арктика*. 2019. № 7. С. 49–61. EDN CGOUNO. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10075>

14. *Ахтямова А. Ф., Травкин В. С.* Исследование фронтальных зон Норвежского моря // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 1. С. 67–83. EDN CCZAKX. <https://doi.org/10.29039/0233-7584-2023-1-67-83>
15. *Мальшева А. А., Белоненко Т. В.* Изменение доступной потенциальной и кинетической энергии мезомасштабных вихрей в районе Капской котловины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 684–698. EDN YLYITW. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-73-684-698>
16. Сравнение результатов наблюдений, выполненных в Баренцевом море, с данными из глобальных океанологических баз / А. В. Зимин [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 4. С. 66–77. EDN GYRKVS. <https://doi.org/10.7868/S2073667320040061>
17. Winter to summer oceanographic observations in the Arctic Ocean north of Svalbard / A. Meyer [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2017. Vol. 122, iss. 8. P. 6218–6237. <https://doi.org/10.1002/2016JC012391>
18. *Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz channels // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2008. Vol. 113, iss. C2. C02S03. <https://doi.org/10.1029/2005JC003384>
19. *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, iss. 1–2. P. 163–184. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.08.009>
20. Изменения температуры воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в XX–XXI вв. Обоснование введения новой климатической нормы / Т. К. Карандашева [и др.] // Российская Арктика. 2021. № 2 (13). С. 26–39. EDN DBFPQM. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-2-26-39>
21. *Ильющенкова И. А., Коржиков А. Я., Иванов Б. В.* Некоторые закономерности формирования экстремальных приземных температур воздуха в районе архипелага Шпицберген в холодный период года // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69, № 2. С. 141–156. EDN LUDDYA. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-2-141-156>
22. Распределение радионуклидов в ледовой прикромочной зоне Баренцева моря (по материалам экспедиции 2016 года) / Г. В. Ильин [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН: Океанология. 2017. Т. 2, № 4. С. 101–111. EDN ZWMYZB

Об авторах:

Максимовская Татьяна Михайловна, младший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), **ORCID ID: 0000-0001-9136-6670**, **Scopus Author ID: 57735699200**, **ResearcherID: AAZ-6535-2020**, **SPIN-код: 3691-7586**, maximovskaja.t@yandex.ru

Зимин Алексей Вадимович, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-1662-6385**, **Scopus Author ID: 55032301400**, **ResearcherID: C-5885-2014**, **SPIN-код: 9833-3460**, zimin2@mail.ru

Атаджанова Оксана Алишеровна, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-6820-0533**, **Scopus Author ID: 57188718743**, **ResearcherID: R-7835-2018**, **SPIN-код: 5016-2970**, oksanam07@list.ru

Коник Александр Александрович, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (119053, Россия, г. Санкт-Петербург, 1-я Линия Васильевского острова, д. 30), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2089-158X**, **Scopus Author ID: 57203864647**, **ResearcherID: AAB-7195-2020**, **SPIN-код: 5839-1738**, konikrshu@gmail.com

Моисеев Денис Витальевич, заместитель директора по науке, Мурманский морской биологический институт РАН (183038, Россия, г. Мурманск, ул. Владимирская, д. 17), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0141-374X**, **Scopus Author ID: 35069960500**, **ResearcherID: C-1651-2015**, **SPIN-код: 2362-1359**, denis_moiseev@mmbi.info