



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ПО и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Сравнительный анализ различных баз данных в арктических морях»

Исполнитель: Украинцева Анастасия Кирилловна

Руководитель: к. г. н., доцент, Гордеева Светлана Михайловна

Консультант: к. ф.-м. н., Седаков Роман Олегович

«К защите допускаю»

И.О. Заведующий кафедрой _____

(подпись)

_____ кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

_____ Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«10» 06 2025 г.

г. Санкт-Петербург

2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Физико-географическое описание морей Лаптевых и Карского	6
1.1 Географическое положение моря Лаптевых	6
1.2 Гидрография моря Лаптевых	8
1.3 Ледовая обстановка моря Лаптевых	13
1.4 Географическое положение Карского моря	15
1.5 Гидрография Карского моря	18
1.6 Ледовая обстановка Карского моря	20
2 Материалы и методы исследования	22
2.1 Описание модели HYCOM GOFS	22
2.2 Материалы и методы для сравнения оперативной модели HYCOM GOFS с натурными данными в море Лаптевых и Карском	23
3 Сравнительный анализ оперативной модели HYCOM GOFS с натурными данными в морях Лаптевых и Карском	26
3.1 Оценка различий в море Лаптевых	26
3.1 Оценка различий в Карском море	33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	39
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	41
Приложение А. Код для расчетов	43

ВВЕДЕНИЕ

Оперативные модели океана играют ключевую роль в предоставлении краткосрочных прогнозов его состояния, включая такие параметры, как солёность, температура и скорости течений. Эти данные имеют большое практическое значение для обеспечения безопасной навигации, эффективной добычи природных ресурсов, а также устойчивого ведения хозяйственной деятельности в морских акваториях. В условиях изменяющегося климата и активного освоения Арктики точность и надёжность таких прогнозов становятся особенно важными.

В Арктическом регионе ведётся сбор океанографических данных с помощью различных методов наблюдений: спутникового мониторинга, буйковых станций, судовых измерений и автономных подводных аппаратов. В частности, для морей Карского и Лаптевых существуют специализированные базы данных, включающие:

1. **Архивы гидрологических наблюдений** – содержат многолетние ряды измерений температуры, солёности и уровня моря.
2. **Спутниковые данные** – предоставляют информацию о ледовом покрове, температуре поверхности моря и динамике течений.
3. **Региональные модели** – разрабатываются для более точного воспроизведения процессов в Арктике, включая термохалинную циркуляцию и ледовый режим.
4. **Международные проекты** – направлены на комплексное изучение арктических морей, с использованием современных измерительных систем и численного моделирования.

Несмотря на наличие этих данных, их интеграция в оперативные модели остаётся сложной задачей из-за недостаточной пространственной и временной разрешённости наблюдений, особенно в условиях ледовой обстановки.[1]

Актуальность оценки надёжности моделей.

Существует значительное количество исследований по валидации и сравнению численных моделей для глобального океана [2]. Однако аналогичные работы для Арктического региона, в частности для морей Сибирского шельфа, остаются немногочисленными. Кроме того, современные глобальные модели (такие как HYCOM, ORCA, MITgcm) могут недостаточно точно воспроизводить региональные процессы в Арктике, такие как:

- формирование и таяние морского льда,
- взаимодействие речного стока с морскими водами
- мезомасштабные вихри и прибрежные течения.

Таким образом, важной научной задачей является проверка глобальных модельных данных с точки зрения их применимости для описания региональных процессов в Арктике. Это позволит улучшить точность прогнозов и обеспечить более обоснованное принятие решений в сфере морской деятельности.

В современной океанологии широко применяются системы прогностического моделирования, позволяющие оптимизировать обработку данных и в определенной степени заменять натурные наблюдения. Это расширяет возможности исследований, снижая их стоимость и трудоемкость. Тем не менее, при моделировании невозможно учесть все физические процессы, протекающие в океане и на суше, что может приводить к расхождениям между модельными данными и реальной стратификацией водных масс.

В связи с этим особую актуальность приобретает оценка адекватности моделей реанализа, то есть их способности достоверно воспроизводить наблюдаемые условия [2].

Целью данной работы является выполнение сравнительного анализа оперативной модели реанализа HYCOM Global Ocean Forecasting System (GOFS) с натурными данными в акватории морей Лаптевых и Карского.

В данной работе были поставлены следующие задачи:

1. Изучение физико-географических и гидрометеорологических условий формирования морей Лаптевых и Карского;
2. Формирование базы данных экспедиционных наблюдений и соответствующих данных оперативной модели реанализа HYCOM GOFS;
3. Выполнение сравнительного анализа данных на основе визуального анализа и статических расчетов.

Результаты исследования были представлены и обсуждены на следующих конференциях:

1. XIII Международной научно-практической конференции «МОРСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ (MARESEDU-2024)» (Москва, 23-27 октября 2024)
2. Конференция Студенческого Научного Общества (СНО) Института гидрологии и океанологии РГГМУ (Санкт-Петербург, 20-21 апреля 2023);

1 Физико-географическое описание морей Лаптевых и Карского

1.1 Географическое положение моря Лаптевых

Море Лаптевых, являющееся окраинным морем Северного Ледовитого океана, занимает уникальное географическое положение между Сибирью и полуостровом Таймыр (Рисунок 1.1) [2]. Это море, обрамленное островами Северной Земли на западе и Новосибирскими островами на востоке, представляет собой важный объект для изучения как с точки зрения географии, так и экологии.

Море Лаптевых занимает пространство на севере России, между восточным побережьем Сибири и архипелагом Новой Земли. Его географические координаты варьируются от 72° северной широты до 80° с.ш. и от 130° восточной долготы до 160° в.д. Включая такие важные географические объекты, как Чукотское море на востоке и Карское море на западе, этот водоем образует обширную акваторию, которая играет важную роль в северном регионе.

Площадь моря составляет 672 тыс. кв. км, а его береговая линия изрезана, создавая множество заливов и бухт, что делает его не только интересным с точки зрения природных форм, но и значимым для морской навигации и экосистемы региона. Ограничено море Лаптевых несколькими полуостровами, среди которых выделяются Таймыр и Северный, а также островами архипелага Франц-Иосифа. Береговая линия сильно изрезана, поэтому насчитывается некоторое количество бухт, мысов, заливов, мысов, заливов, губ и полуостровов различных формы и размеров. В море большое количество островов, часть из которых располагается на западе. Есть, как группы островов (Вилькицкого, Фаддея и Комсомольской Правды), так и одиночные острова (Малый Таймыр, Песчаный, Столбовой и Бельковский [4].

В море Лаптевых впадают такие реки: Хатанга, Анабар, Оленёк, Яна. Самой крупной рекой, впадающей в море Лаптевых, является река Лена. Ее основная особенность – большая дельта [2]. Река Лена составляет 70% материкового стока, в то время как общий сток западных рек, впадающих в море, равен 30%. Следовательно, наиболее богатая речными водами часть моря – юго-восточная [3]. От общего объема всего материкового стока в моря российской Арктики, сток рек, впадающих в море Лаптевых, составляет 30%. Что касается конкретно стока в воды моря, то около 90% годового стока происходит в летний период, с июня по сентябрь. За год больше всего воды стекает в августе, а меньше в январе. Эту ситуацию можно связать с преобладающим влиянием таяния снегов [3]. В итоге, довольно значимый речной сток объясняет наличие распресненных вод, особенно в юго-восточной части моря.

Береговая линия сильно изрезана, поэтому насчитывается некоторое количество бухт, мысов, заливов, мысов, заливов, губ и полуостровов различных формы и размеров. Этому подвержены восточные берега Северной Земли и полуострова Таймыр. Так, двигаясь на восток от последнего, береговая линия образует крупные заливы (Хатангский, Анабарский, Оленекский, Янский), губы (Буор-Хая, Ванькина), полуострова (Хара-Тумус, Нордвик) и бухты (Кожевникова, Нордвик, Тикси).

Рельеф и строение побережья разнообразно на разных участках, все дело в различных морфологических типах берегов: абразионных и аккумулятивных, а также местами ледяных. Море Лаптевых полностью занимает шельф, часть материкового склона и ложа океана. Следовательно, рельеф дна можно назвать равниной. На ней находятся желоба, банки (Семёновская, Васильевская) и возвышенности. Большая часть моря мелководная (25-50 м), а на севере становится глубже (100-2000м) [3]. Для моря Лаптевых характерно следующее: – большая удаленность от Атлантического и Тихого океана; – высокоширотное положение; – самое

суровое море среди арктических морей, из-за влияния близости азиатского материка и льдов [3].

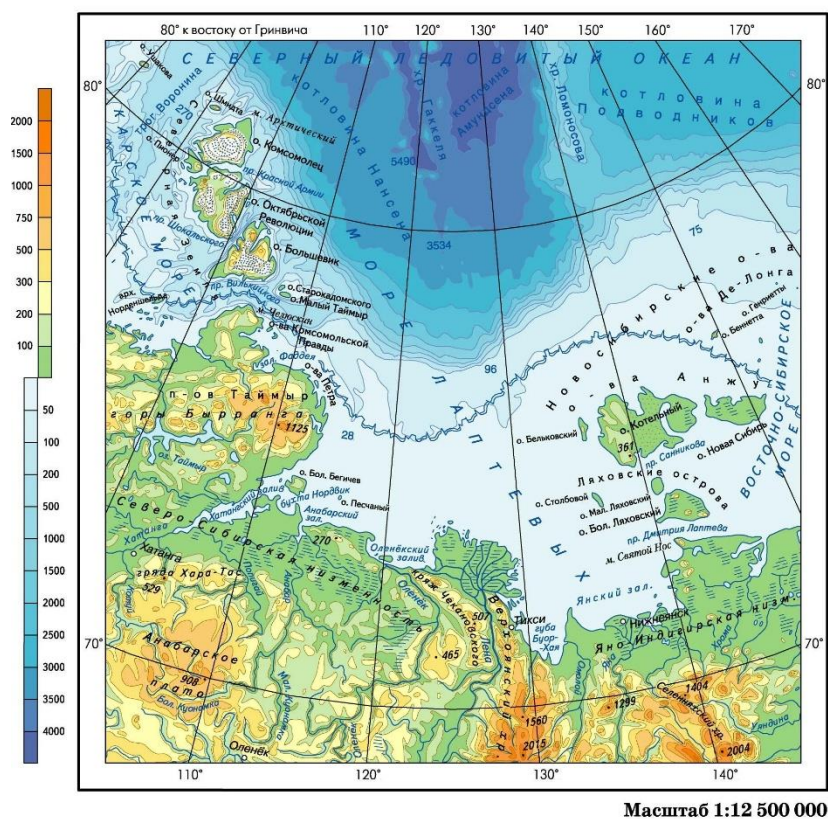


Рисунок 1.1 - Физическая карта моря Лаптевых

1.2 Гидрография моря Лаптевых

Влияние гидрологического режима моря Лаптевых определяется рядом ключевых факторов, которые можно классифицировать на климатические, гидродинамические и метеорологические. Прежде всего, необходимо отметить суровость арктического климата, характеризующегося экстремальными температурными условиями, что оказывает значительное воздействие на термодинамику водных масс [5].

Свободный водообмен с Северным Ледовитым океаном (СЛО) играет важную роль в формировании гидрологических характеристик моря Лаптевых, способствуя циркуляции водных масс и обмену тепловыми и химическими компонентами между различными морскими бассейнами.

Однако отдаленность от Тихого и Атлантического океанов исключает отопляющее воздействие, что приводит к формированию уникальных гидрологических условий.

Ледовый покров, присутствующий практически на всей территории моря на протяжении большей части года (с частичным освобождением ото льда в августе и сентябре), оказывает существенное влияние на тепло- и массообмен в системе "море-атмосфера". Этот фактор является одним из ключевых в формировании холодного климата региона [4].

Сибирский антициклон, который доминирует в зимний период, приводит к охлаждению воздушных масс. Температуры воздуха могут достигать значений от -26 до -29 °C, а ветровой режим характеризуется относительной стабильностью.

Большой материковый сток, особенно с рек Лена, Яна и Хатанга, оказывает значительное влияние на солевой состав и гидрохимические характеристики вод моря Лаптевых. Эти реки приносят значительные объемы пресной воды, что влияет на стратификацию водных масс и формирование локальных гидрологических особенностей. В течение годового цикла температура водной среды демонстрирует тенденцию к приближению к точке замерзания, что обусловлено продолжительным воздействием отрицательных температурных режимов атмосферного воздуха. Данное явление представляет собой результат климатической динамики, характеризующейся устойчивыми низкими температурами в течение значительной части года [5].

Температура (T) Температурные показатели демонстрируют вариативность, при этом наблюдается их повышение в направлении с запада на восток и с севера на юг, что свидетельствует о наличии градиента температурных значений в зависимости от географического расположения [6]. В зимний период температура поверхности моря варьирует в диапазоне от $-0,8^{\circ}\text{C}$ до $-1,8^{\circ}\text{C}$, начиная с южных прибрежных районов, где расположены устья крупных рек, таких как Хатанга и Лена, и достигая

северо-западной оконечности моря. В прибрежной зоне температурный режим воды характеризуется колебаниями от -1°C до $1,2^{\circ}\text{C}$. На материковой отмели температура придонного слоя в открытом море составляет $-1,6^{\circ}\text{C}$. В глубоководных районах северо-западной части моря, температура воды у дна достигает минимальных значений, равных $-0,7^{\circ}\text{C}$.

Летом температурный режим воды в значительной степени определяется положением кромки льда, которая является индикатором площади морской поверхности, подвергающейся нагреву в летний период [5]. Температура воды на поверхности моря в северной части характеризуется значительными температурными градиентами, обусловленными климатическими и гидрологическими особенностями региона. В отличие от южных и центральных районов, северная часть моря подвержена интенсивному ледоставу, что существенно влияет на альбедо поверхности. Вследствие высокой отражательной способности ледового покрова (до 70% солнечной радиации отражается обратно в атмосферу), температура воды в этом регионе редко превышает $2-3^{\circ}\text{C}$, и только в ограниченных участках, таких как полыньи, формируются локальные зоны с более высокими значениями.

Центральные районы моря демонстрируют более умеренные температурные показатели, где поверхностный слой воды прогревается до $3-4^{\circ}\text{C}$ [5]. На юго-восточных территориях, характеризующихся максимальными значениями инсоляции, температура воды может достигать $6-7^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о значительной роли солнечной радиации в формировании температурных режимов.

Прогрев поверхностного слоя воды до $5-10^{\circ}\text{C}$ наблюдается на восточных побережьях полуострова Таймыр и архипелага Северная Земля [5]. Эти регионы отличаются наличием заприпайных полыней, которые играют ключевую роль в аккумуляции солнечной энергии и последующем прогреве водных масс. В устьях рек температура воды в летний период составляет $6-7^{\circ}\text{C}$, у кромки льда она стабилизируется на уровне 0°C , тогда

как в открытом море, свободном ото льда, температура варьируется в пределах 2-4°C.[5]

Солёность (S)[7]. В акватории моря Лаптевых значения этого гидрологического параметра демонстрируют значительную пространственную вариабельность, варьируясь в диапазоне от 1 до 35‰. В целом, водная масса характеризуется как опреснённая, с преобладанием значений солёности в интервале 20-30‰. Пространственное распределение солёности демонстрирует тенденцию к увеличению с юго-востока на северо-запад, что свидетельствует о наличии градиента, обусловленного динамикой водных масс и климатическими факторами.

При анализе распределения солёности в зимний период необходимо учитывать выделения солей при льдообразовании. Данный процесс приводит к понижению солёности морской воды в период формирования льда. В регионах с активным речным стоком, где летом происходит освобождение моря ото льда, наблюдается интенсивное замерзание, что способствует повышению солёности до значений в диапазоне 22-25‰. В центральной части моря, в отличие от прибрежных зон, сезонные колебания солёности варьируются в пределах 5‰, что свидетельствует о стабильности этого параметра в глубинных слоях.

Течения [5]. В акватории моря Лаптевых доминирует циклонический круговорот, характеризующийся движением водных масс в направлении против часовой стрелки. Этот процесс способствует переносу поверхностных вод с запада на восток вдоль береговой линии, где интенсивность течения усиливается под воздействием Ленского течения.

У восточных берегов моря наблюдается отклонение потока вод на север и северо-запад, что приводит к формированию Новосибирского течения. Данное течение, в свою очередь, интегрируется в систему Трансарктического течения, которое протекает в арктических водах. В северной части Северной Земли происходит ответвление поверхностных вод на юг, формируя Восточно-таймырское течение.

Восточно-таймырское течение движется вдоль восточного побережья Северной Земли и полуострова Таймыр в восточном направлении, что обеспечивает замыкание циклонического круговорота.

Кроме того, следует отметить, что часть водных масс южной части моря Лаптевых мигрирует в Восточно-Сибирское море через проливы Санникова и Лаптева, что способствует обмену вод между этими двумя арктическими бассейнами. Скорости течений в пределах моря, как правило, не превышают 2 см/с, что указывает на относительно низкую интенсивность гидродинамических процессов.[5]

Центр циклонического круговорота преимущественно располагается в северной части моря Лаптевых. Однако, под воздействием различных факторов, включая метеорологические условия и геоморфологические особенности, этот центр может временно смещаться в направлении Северной Земли. Подобные смещения могут приводить к формированию ответвлений от основных потоков, что, в свою очередь, оказывает влияние на общую структуру циркуляции и распределение водных масс в регионе.

Кроме того, необходимо учитывать, что приливные процессы также оказывают существенное влияние на стабильность и динамику постоянных течений в море Лаптевых. Взаимодействие приливных и течений создает сложную систему гидродинамических взаимодействий, которая требует дальнейшего детального изучения для более точного понимания механизмов формирования и функционирования циклонического круговорота.

Уровень моря —[8]. Приливные явления в арктических водах формируются за счет приливной волны, генерируемой в Атлантическом океане и распространяющейся в северном направлении к берегам Евразийского континента. В большинстве регионов, включая прибрежные зоны, наблюдается полусуточный характер приливов, обусловленный гравитационным воздействием Луны и Солнца. Однако в некоторых специфических районах, таких как Северная Земля, часть полуострова Таймыр и Эбеляхская губа, включая остров Большой Ляховский, отмечается

аномалия в виде неправильного полусуточного прилива. Эти отклонения от стандартного полусуточного цикла обусловлены комплексным взаимодействием географических, климатических и гидродинамических факторов, требующих дальнейшего детального изучения для более полного понимания механизмов формирования приливных процессов в данном регионе. Величина приливных колебаний в данном регионе характеризуется умеренными показателями, варьирующимися в пределах 0,5-0,8 метра. Следует отметить, что в дельте реки Лена наблюдается минимальное проявление приливных процессов, обусловленное сложной гидрографической конфигурацией, включающей множество протоков, что приводит к рассеиванию и диссипации приливной энергии.

В Хатангском заливе, напротив, фиксируются более значительные приливные подъемы, достигающие 2 метров в сизигии. Этот феномен объясняется специфической морфологией залива, которая характеризуется постепенным сужением его ширины и уменьшением глубины, что способствует значительному увеличению дальности распространения приливной волны вдоль реки Хатанга.

Море Лаптевых подвержено сезонным и сгонно-нагонным колебаниям уровня воды. В целом, море Лаптевых можно классифицировать как относительно спокойное водное пространство. Это обусловлено несколькими факторами: слабой ветровой активностью, небольшой глубиной моря и постоянным присутствием ледового покрова на значительной его территории. В среднем, уровень волнения составляет 2-4 балла, при высоте волн до 1 метра. Максимальные волны, достигающие 4-6 метров, преимущественно наблюдаются в осенний период.[5]

1.3 Ледовая обстановка моря Лаптевых

В период с октября по май акватория исследуемого морского бассейна покрывается льдами различной степени зрелости и толщины [9]. Генезис

ледяного покрова начинается в конце сентября и охватывает всю площадь моря. В зимний период на востоке наблюдается формирование обширного припайного льда, достигающего толщины до двух метров. В западной и северо-западной частях моря припай либо незначительно развит, либо отсутствует вовсе. Общая площадь припайного льда составляет около 30% от общей площади морского бассейна.

Процесс разрушения припайного льда начинается в июле, причем в первую очередь это явление наблюдается в устьях крупных рек, таких как Лена и Хатанга. Эти процессы представляют собой ключевые этапы сезонной трансформации ледового покрова, оказывающие значительное влияние на гидрологический режим и экосистему региона.

В акватории моря наблюдаются значительные области полыней и молодого льда, простирающиеся на расстояния от десятков до нескольких сотен километров. К числу таких зон относятся Восточно-Североземельская, Таймырская, Ленская и Новосибирская полыньи, которые в летний период становятся ключевыми центрами очищения моря от ледового покрова. Площадь этих полыней увеличивается и может достигать до тысячи квадратных километров. Процесс таяния льда начинается в июне-июле, а к августу море полностью освобождается ото льдов. В летний период положение кромки льда динамично изменяется под воздействием течений и ветровых факторов (Рисунок 1.2).

Восточная часть моря характеризуется меньшей ледовитостью по сравнению с западной. В данной акватории встречаются тяжелые многолетние льды, которые вдоль восточного побережья полуострова Таймыр спускаются от отрога океанического Таймырского ледяного массива. Этот массив сохраняется до начала нового цикла ледообразования и может перемещаться как на юг, так и на север, в зависимости от преобладающих ветров. Локальный Янский ледяной массив формируется из припайного льда. Обычно он полностью стаивает к третьей декаде августа, но в случае недостаточного таяния может быть унесен за пределы моря на север.

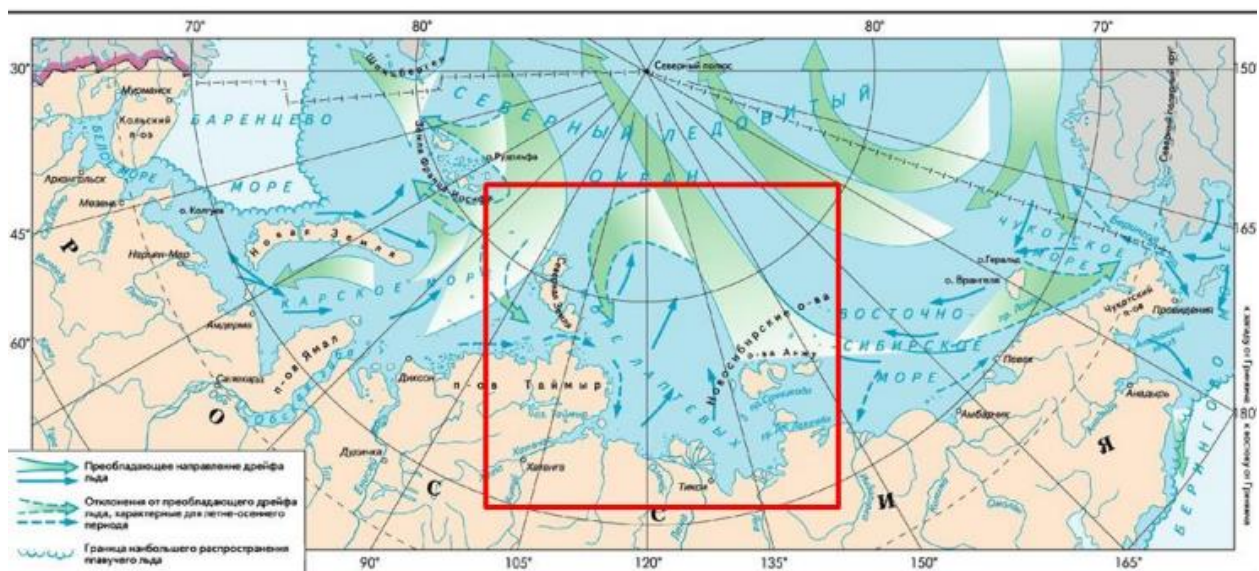


Рисунок 1.2 - Движение льда в Российском секторе Арктики

Преобладающее направление дрейфа льдов в Арктическом бассейне характеризуется северным вектором, однако в летне-осенний период наблюдаются значительные отклонения от основного потока [10]. Эти отклонения проявляются в виде двух основных ответвлений. Первое ответвление направлено в юго-западную часть моря, где оно достигает побережья архипелага Северная Земля. Второе ответвление простирается вдоль восточных берегов полуострова Таймыр, постепенно смещаясь к южной оконечности континента. Данные особенности ледового дрейфа обусловлены комплексным взаимодействием атмосферных и океанических факторов, включая ветровые системы, температурные градиенты и топографические особенности региона.[6]

1.4 Географическое положение Карского моря

Карское море, являясь частью акватории Северного Ледовитого океана, расположено в высоких широтах Арктического бассейна (Рисунок 1.3). Его северная граница проходит по Полярному бассейну, что подчёркивает важную роль моря в арктической гидрографии и климатологии. На востоке море граничит с морем Лаптевых, а на западе – с Баренцевым морем, что определяет его уникальные геоморфологические и гидрологические

особенности. Значительная часть акватории расположена в пределах шельфовой зоны, что характерно для арктических морей. Площадь моря составляет 893,4 тыс. км², объём вод – 112 тыс. км³, при средней глубине 127 метров и максимальной – 620 метров [11].

Карское море отличается сложным гидрологическим режимом, обусловленным его географическим положением и взаимодействием водных масс. На его климатические и океанографические процессы существенное влияние оказывают тёплые атлантические воды, поступающие через Баренцево море, и холодные арктические течения из Полярного бассейна. Это взаимодействие формирует уникальные условия, определяющие локальные климатические особенности, биологическую продуктивность и геохимические процессы в регионе

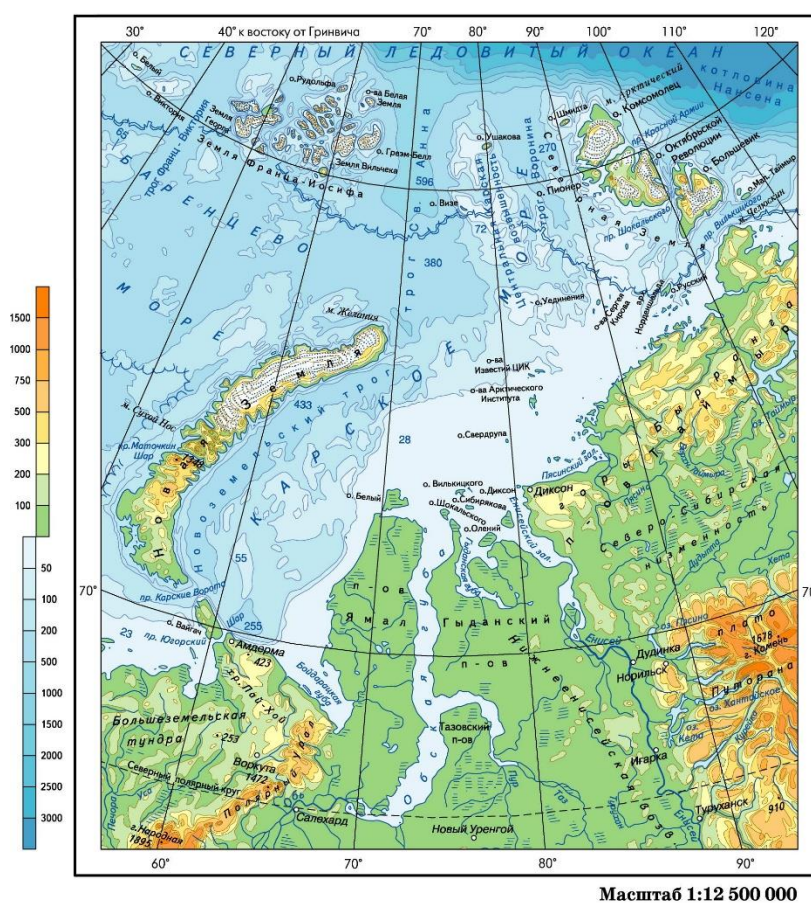


Рисунок 1.3 - Физическая карта Карского моря

Западная граница Карского моря определяется следующими географическими ориентирами. Восточное побережье архипелага Новая Земля, западная граница пролива Карские Ворота, восточное побережье острова Вайгач и западная граница пролива Югорский Шар. Восточная граница моря проходит по западному побережью островов архипелага Северная Земля, а также по восточным проливам Красная Армия, Шокальского и Вилькицкого. Южная граница Карского моря простирается вдоль материковой части Евразии от мыса Белый Нос до мыса Прончищева.

Море характеризуется наличием обширного архипелага, включающего преимущественно мелкие острова, расположенные вблизи континентальной окраины. Эти острова обычно формируют компактные архипелаги, в то время как наиболее крупные объекты (острова Диксон, Свердруп, Нансена и Шокальского) находятся в изолированном положении.

Рельеф дна Карского моря отличается сложной структурой: в южных и восточных районах преобладают мелководные зоны, тогда как западные и северо-восточные части характеризуются глубоководными котловинами. Желоб Святой Анны и желоб Воронина (до 200 м глубиной) простираются в этих направлениях, а Новоземельская впадина достигает 500 метров [3].

Береговая линия имеет сложный изрезанный рельеф, сформированный тектоническими процессами и ледниковой эрозией. Восточное побережье Новая Земля изобилует фьордами, в то время как материковое побережье включает крупные губы (Байдарацкая, Обская) и заливы (Гыданский, Енисейский, Пясинский). Западное побережье Северной Земли отличается меньшей изрезанностью, что отражает региональные различия в тектонике и климате.

В поверхностном слое вод наблюдается повышение температуры и солёности с глубиной. Сезонные колебания термохалинного режима связаны с ледообразованием, которое зимой инициирует конвекционные процессы [10].

1.5 Гидрография Карского моря

Водные массы, поступающие через пролив Карские Ворота из Баренцева моря, характеризуются высокой соленостью и вертикальной однородностью температурного распределения [8]. Воды Атлантического океана проникают в Карское море через глубоководные желобы благодаря Западно-Шпицбергенскому течению. Различие в солености между атлантическими и арктическими водами приводит к тому, что более плотные атлантические воды опускаются под арктические и распространяются вдоль континентального склона, формируя сложную гидродинамическую систему.

Материковый сток оказывает значительное воздействие на Карское море в теплый период, когда речные воды, прогретые на материке, разрушают ледовый покров. Это способствует термическому и химическому обмену между речными и морскими водами, а также лучшему прогреву поверхностного слоя. Вариативность гидрохимического режима Карского моря обусловлена многообразием источников водных масс, поступающих в регион, каждый из которых характеризуется уникальными гидрометеорологическими параметрами, что создает сложную и динамичную водную экосистему.

Температура [8]. В зимний период температура воды в Карском море, обусловленная ледовым покровом, может опускаться ниже -2°C . Наименьшие значения температуры наблюдаются в северных районах морской акватории, тогда как в заливах и устьях рек фиксируются более высокие температурные показатели. Прибрежные зоны характеризуются отрицательными температурами, что обусловлено процессами интенсивного перемешивания водных масс под воздействием ветровых и конвективных процессов.

В глубоководных желобах (Святой Анны и Воронина) температура воды остается положительной ($+1^{\circ}\text{C}$) благодаря притоку теплых атлантических водных масс. Сезонное распределение ледового покрова, температурные характеристики атмосферы, материковый сток и поступление теплых водных масс играют ключевую роль в формировании термического режима.

В весенне-летний период значительная часть солнечной энергии расходуется на таяние льда, что ограничивает прогрев вод. Летом поверхностные слои достигают $+2-6^{\circ}\text{C}$, при этом в районах материкового стока температура может превышать $+15^{\circ}\text{C}$. Глубина прогрева варьирует от 10-15 метров на севере до 60-70 метров на юго-западе.

Соленость [8]. Соленость Карского моря определяется материковым стоком, ледовыми процессами и притоком соленых вод из соседних морей. В южных районах, подверженных влиянию речного стока, соленость составляет 3-5‰. Зимнее ледообразование увеличивает концентрацию соли в воде, тогда как летнее таяние льдов и речной сток приводят к распреснению (5-10‰ в прибрежной зоне).

Наибольшие значения солености (до 35‰) наблюдаются в северных районах и у дна, где проявляется влияние атлантических вод. Этот градиент солености формирует сложную вертикальную стратификацию водных масс.

Система течений [8].

Гидродинамический режим Карского моря определяется взаимодействием нескольких течений:

- *Ямальское течение* (опресненные воды рек Оби и Енисея)
- *Новоземельское течение* (холодные соленые воды из Баренцева моря)
- *Восточно-Карское течение* (перенос арктических льдов)

В южной части моря формируется антициклонический круговорот, а в проливах (Карские Ворота, Вилькицкого) наблюдаются сильные приливные течения. Ледовый покров (7-8 месяцев в году) существенно затрудняет

изучение циркуляции вод. Летом усиление речного стока изменяет направление и интенсивность течений, влияя на всю экосистему региона [9].

1.6 Ледовая обстановка Карского моря

В акватории Карского моря формирование ледяного покрова имеет ярко выраженную пространственно-временную дифференциацию [9]. В северных районах этот процесс начинается уже в сентябре, тогда как в южных районах наблюдается значительное запаздывание, приходящееся на октябрь-ноябрь. В период с ноября по июнь, охватывающий 8-9 месяцев, практически вся акватория моря покрывается льдом, который характеризуется различной степенью сплоченности, варьирующейся от 70% до 10%. В отдельных зонах толщина льда может достигать 1,5 метра, что свидетельствует о значительных региональных различиях в ледовых условиях.

В период с конца мая по начало июня в юго-западном районе Карского моря происходит постепенное таяние ледового покрова [9], которое к концу июня приводит к разрушению неподвижного льда (припая) и образованию дрейфующих ледяных полей. Июнь характеризуется значительным снижением сплоченности льда или его полным таянием во всех окраинных морях, расположенных к югу от 70° северной широты. Это явление обусловлено повышением температуры воздуха и воды, что способствует интенсификации процессов таяния. В то же время, северные районы моря сохраняют ледяное покрытие, однако его сплоченность значительно уменьшается, что указывает на асимметрию ледовых процессов в акватории моря.

Анализ данных о ледовитости Карского моря демонстрирует выраженный отрицательный линейный тренд [9], определяемый как отношение площади, покрытой льдом любой сплоченности, к общей

площади водного объекта. В летние месяцы Карское море практически полностью освобождается от ледяного покрова, что подтверждается статистически значимым снижением средних значений ледовитости на 37% за последнее десятилетие. Кроме того, наблюдается существенное уменьшение толщины припая в районах полярных станций, достигающее 18 см в зимний период, что свидетельствует о структурной трансформации ледового покрова и изменении климатических условий в Арктическом регионе.

В годы с высокими значениями ледовитости промышленный лов рыбы будет существенно затруднен, так как доступными районами Карского моря будут только южный и юго-западный. В теплые же годы, когда кромка льда будет отдалена далеко на север, район лова рыбы значительно расширится в северном и восточном направлениях.[8]

2 Материалы и методы исследования

2.1 Описание модели HYCOM GOFS

Для проведения сравнительного анализа были задействованы данные, полученные с использованием оперативной модели HYCOM GOFS (Hybrid Coordinate Ocean Model Global Ocean Forecasting System). HYCOM GOFS [12] представляет собой передовую прогностическую численную модель, предназначенную для комплексного анализа динамики океанических и атмосферных процессов. Эта модель, разработанная с применением передовых методов численного моделирования, обладает высокой точностью и универсальностью, что позволяет применять её для решения широкого спектра задач, как в научной, так и в практической сферах.

Одной из ключевых особенностей HYCOM GOFS является её гибридная координатная система, основанная на сетке GLBy 0.08. Эта сетка характеризуется разрешением 0.08° по долготе и 0.04° по широте, охватывая пространственный диапазон от 80° южной широты до 90° северной широты. Такая конфигурация позволяет модели эффективно учитывать сложную трёхмерную структуру океана, включая как горизонтальные, так и вертикальные вариации физических параметров.

Модель HYCOM GOFS интегрирует в себя детальное моделирование горизонтальных распределений температуры, солёности и течений, а также учитывает вертикальные изменения посредством многослойной структуры. Это достигается за счёт использования различных параметров и коэффициентов, что обеспечивает высокую точность и реалистичность предсказаний. Применение HYCOM GOFS в научных исследованиях и практических приложениях позволяет проводить комплексный анализ океанических процессов, включая моделирование циркуляции, взаимодействия океана и атмосферы, а также оценку воздействия климатических изменений на морские экосистемы. Благодаря своей точности

и универсальности, HYCOM GOFs является важным инструментом для специалистов в области океанологии, климатологии и смежных наук. [1]

Модель HYCOM GOFs характеризуется высоким пространственным разрешением в $1/12^\circ$, включает 40 вертикальных уровней и предоставляет осреднённые данные с интервалом в 3 часа.

2.2 Материалы и методы для сравнения оперативной модели HYCOM GOFs с натурными данными в море Лаптевых и Карском

В основе работы лежали данные прямых измерений температуры и солёности, в море Лаптевых (рисунок 2.1) и Карском море (Рисунок 2.2), собранных в ходе экспедиции «Плавучий университет – 2024» Экспедиция проводилась на научно-исследовательском судне «Профессор Молчанов» в период с 20 июля по 28 августа. В рамках экспедиции в море Лаптевых было выполнено 53 гидрологические станции, объединённые в 8 разрезов, в Карском море в общей сложности выполнено 102 станции, объединённые в 13 разрезов. На каждой станции проводились измерения вертикального распределения температуры и солёности за каждый метр, с использованием зонда Sea Bird Electronics (SBE) 19 plus V2. Точность измерений составляет $0,005^\circ\text{C}$ для температуры и $0,0005 \text{ C/м}$ для солёности.

Для оценки качества модели HYCOM GOFs из неё выбирались данные температуры и солёности в морях Лаптевых и Карского в период с 20 июля по 28 августа максимально близлежащие к натурным измерениям [13], за сутки, в течение которых эти измерения проводились (8 сроков), на всех горизонтах модели от поверхности до глубины места.

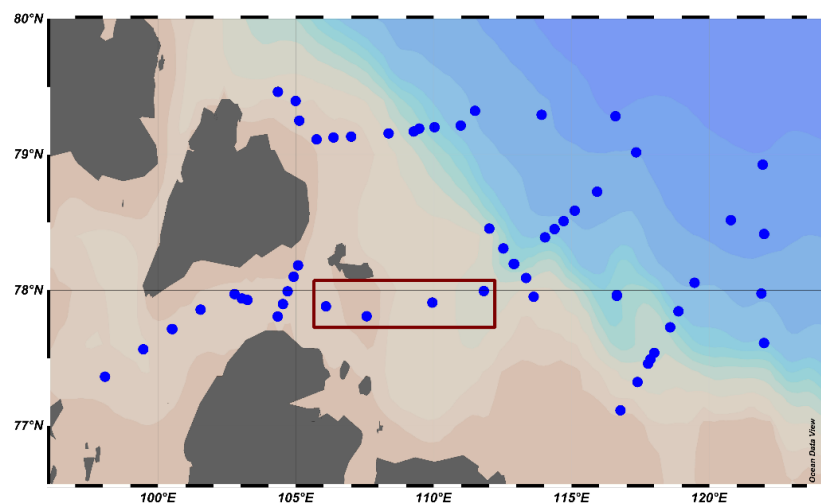


Рисунок 2.1 - Расположение гидрологических станций экспедиции «Плавучий университет – 2024» на НИС «Профессор Молчанов» с 20 июля по 28 августа 2024 г. в западной части моря Лаптевых.

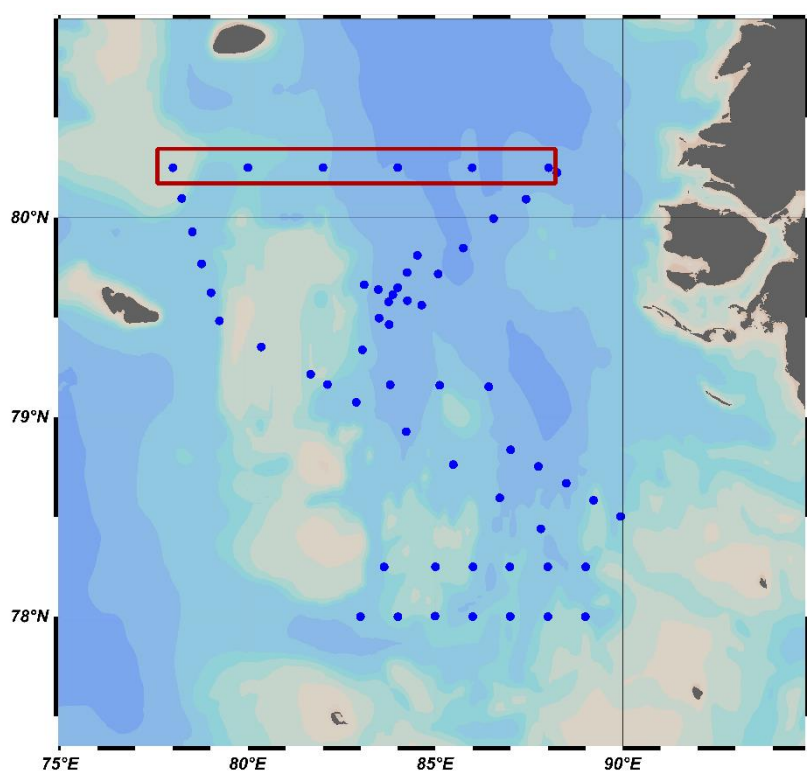


Рисунок 2.1 - Расположение гидрологических станций экспедиции «Плавучий университет – 2024» на НИС «Профессор Молчанов» с 20 июля по 28 августа 2024 г. в северо-восточной части Карского моря

Модельные данные осреднялись за сутки и затем интерполировались на сетку, соответствующую натурным измерениям, с применением метода линейной интерполяции.

Для оценки расхождений между модельными и натурными данными были использованы рассчитанные для вертикальных профилей в точках:

- коэффициент корреляции Пирсона;
- разности полей температуры и солёности;
- средняя абсолютная ошибка (MAE);
- среднеквадратическая ошибка (RMSE);
- относительная ошибка (RE).

Коэффициент корреляции Пирсона представляет собой ковариацию двух наборов данных, делённую на произведение их стандартных отклонений [9].

$$r = \frac{cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n \sigma_x \sigma_y} \quad (2.1)$$

Среднеквадратическая ошибка (RMSE) является показателем, отражающим среднее различие между прогнозируемыми значениями модели и фактическими данными [9]

$$\sigma_{y(x)} = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(y_i - y_{(x)i})^2}{n-1}} \quad (2.2)$$

Средняя абсолютная ошибка (MAE) рассчитывается как среднее абсолютных разностей между модельными и натурными данными.[9]

$$\sigma_{y(x)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}| \quad (2.3)$$

Для расчета статистических характеристик был использован программный код на языке matlab, Приложение А.

3 Сравнительный анализ оперативной модели HYCOM GOFS с натурными данными в морях Лаптевых и Карском

3.1 Оценка различий в море Лаптевых

В рамках данного исследования были проведены детальные количественные оценки степени соответствия *in situ* и модельных данных по параметрам солёности и температуры на вертикальных профилях в каждой точке.

Анализ корреляционных характеристик выявил положительную корреляцию в распределении полей температуры и солёности (рисунок 3.1) на всех исследуемых станциях. Коэффициент корреляции температурных данных демонстрирует значительные вариации, изменяясь от 0.6 до 0.95 на большинстве станций, что свидетельствует о высокой степени согласованности между экспериментальными и модельными данными. Однако, на северном разрезе, у Северной Земли, наблюдается существенное снижение коэффициента корреляции, который не превышает 0.5, что может указывать на наличие локальных факторов, влияющих на точность модели в данном регионе.

Аналогично, корреляция солёности проявляет устойчивую тенденцию к положительным значениям, колеблясь в диапазоне от 0.7 до 0.92 на всех станциях, что подтверждает общую согласованность между наблюдаемыми и модельными данными по этому параметру.

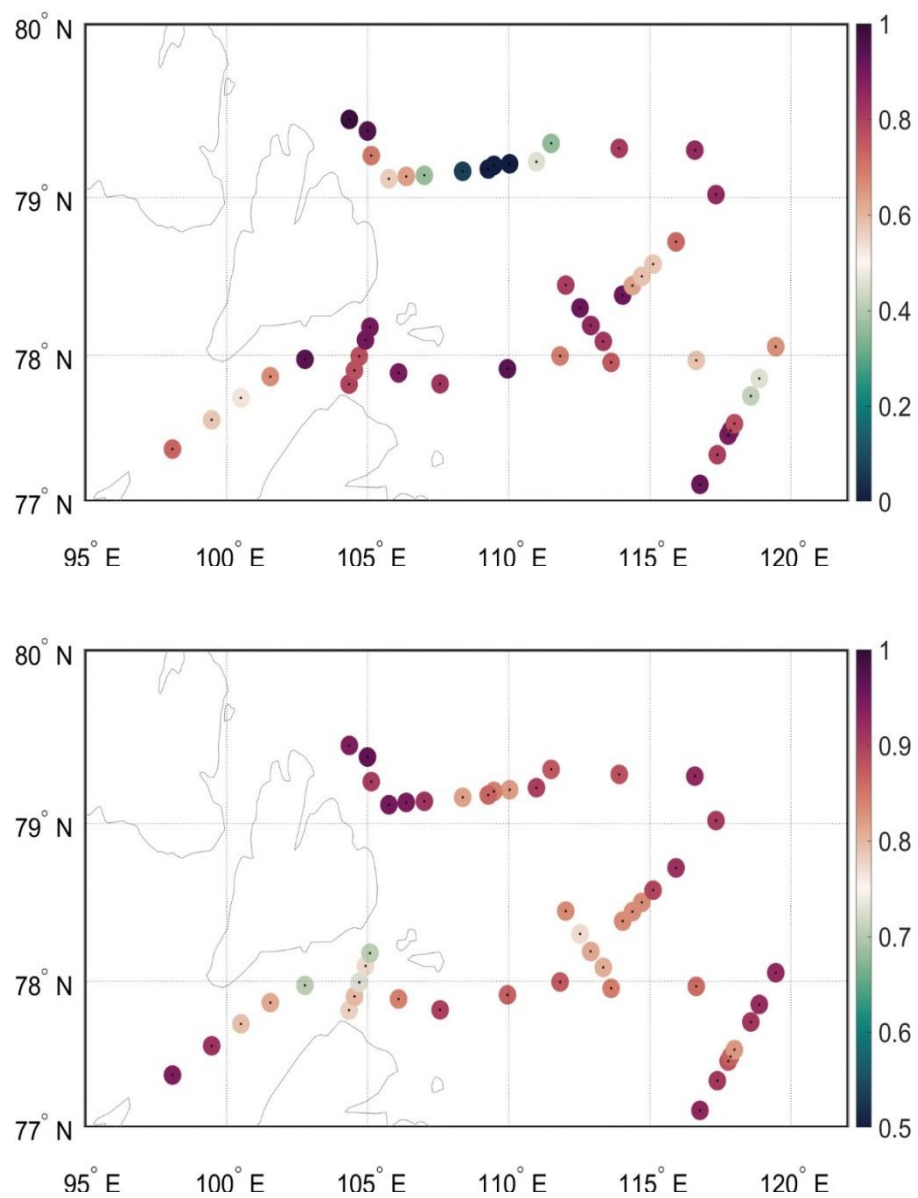


Рисунок 3.1 – Распределение коэффициентов корреляции вертикальных распределений температуры (вверху) и солёности (внизу) между модельными данными HYCOM GOFS и натурными данными 20 июля – 28 августа 2024 г.

Результаты расчета среднеквадратической и средней абсолютной ошибок позволяют сделать вывод о том, что они имеют схожую тенденцию. Средняя абсолютная ошибка на шельфовой зоне и в проливе Вилькицкого варьируется от 1.4-2.32 °C, на континентальном склоне варьируется от 0.36-1.2 °C, результаты среднеквадратической ошибки демонстрируют схожую, но более выраженную тенденцию, для полей температуры в проливе Вилькицкого и на шельфовой зоне значения варьируются от 1.4- 2.9 °C, на континентальном склоне от 0.2-1.2 °C. Можно сделать вывод о том, что ошибки модели выше в шельфовой зоне, в связи с более сложной динамической структурой вод, на континентальном склоне ошибки модели показывают более высокую воспроизводительность в глубоководных районах. Для полей солености ошибки модели также демонстрируют схожую тенденцию. Результаты расчета среднеквадратической ошибки на шельфе и в проливе Вилькицкого варьируются от 1.4-2.7 епс, на континентальном склоне результаты ошибки значительно меньше, они изменяются от 0.14-1 епс. Результат расчет средней абсолютной ошибки для пролива Вилькицкого и шельфовой зоны, также значительно больше, чем на континентальном склоне, она варьируется от 1.4-1.95 епс и 0.14-1 епс, соответственно.

Эти результаты позволяют сделать вывод, что модель HYCOM GOFs удовлетворительно воспроизводит гидрологические поля в глубоководных районах, но демонстрирует низкую точность на шельфе, особенно в зонах влияния речного стока и льдов. Это требует доработки параметризаций или перехода к региональным моделям с более высоким разрешением. На шельфе и в проливе Вилькицкого модель демонстрирует низкую точность в связи со сложной динамикой и воздействием речного стока и ледообразования. На континентальном склоне модель показывает более точный результат, в связи с тем, глубоководные районы более изучены и они адекватно представляются в глобальных моделях. Для полей солёности в проливе Вилькицкого и на шельфе моря Лаптевых модель показывает более грубые результаты, в связи

с тем, что можно наблюдать влияние речного стока, который плохо учитывается в глобальных моделях. На склоне модель работает лучше, в связи с тем, открытые участки меньше подвержены сильным изменениям солёности.

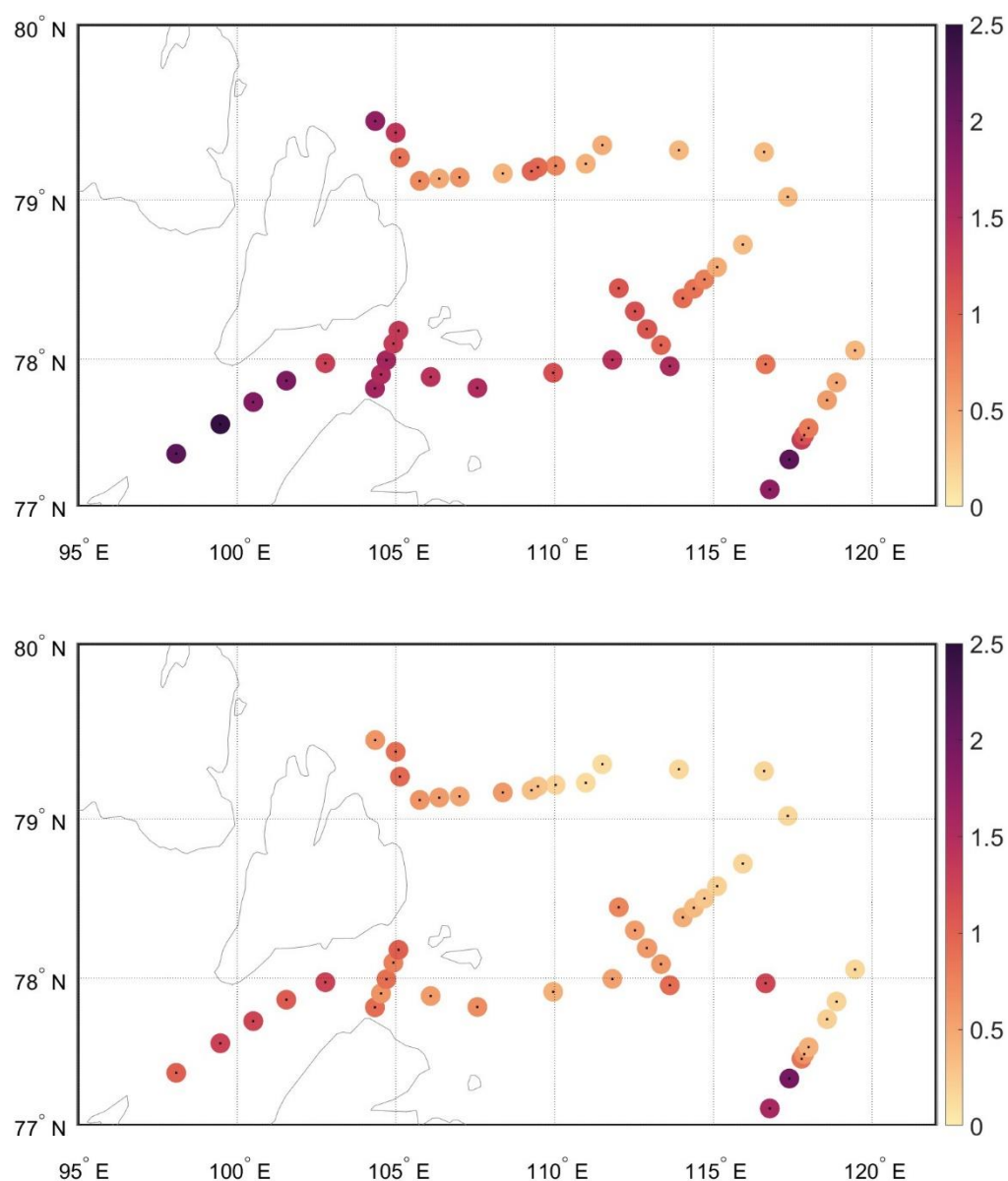


Рисунок 3.2 – Распределение средней абсолютной погрешности вертикальных распределений температуры (вверху) и солёности (внизу) между модельными данными HYCOM GOFS и натурными данными 20 июля – 28 августа 2024 г.

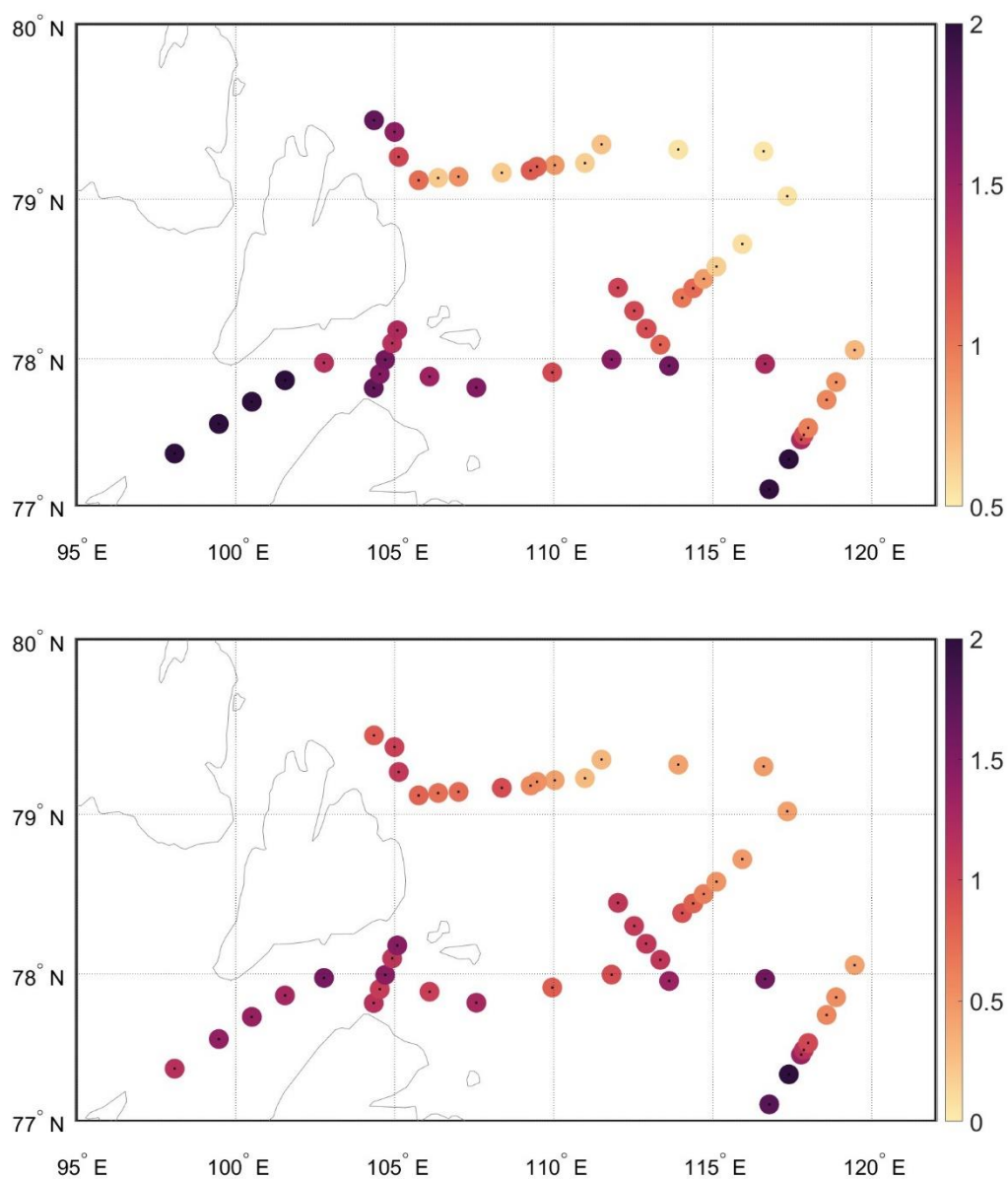


Рисунок 3.3 – Распределение среднеквадратической погрешности вертикальных распределений температуры (вверху) и солёности (внизу) между модельными данными HYCOM GOFS и натурными данными 20 июля – 28 августа 2024 г.

Модель HYCOM GOFs показывает хорошие результаты в глубоководных районах, но хуже воспроизводит природу на арктическом шельфе. Это связано с тем, что модель имеет низкое разрешение для мелководных вод, имеет недостаточное разрешение для шельфовых зон, где важны процессы с масштабами в сотни метров. Для полей температуры на континентальном склоне модель имеет хорошее соответствие, в связи с тем, что глобальные модели лучше описывают крупномасштабные процессы в открытых водах. В проливе Вилькицкого и на шельфовой зоне моря Лаптевых среднеквадратичное отклонение имеет значительное расхождение, в связи с тем, что мелководные районы подвержены влиянию сложных локальных процессов, которые глобальные модели плохо учитывают.

На рисунке 3.4 представлено сравнение данных о температуре и солености, полученных в результате натурных наблюдений и моделирования, на разрезе, расположенном между проливом Вилькицкого и континентальным склоном (обозначенные черным прямоугольником на рисунке 2.1). Данный разрез охватывает четыре гидрологические станции, что обеспечивает возможность проведения детального анализа гидрологических характеристик в указанной области. Анализ полученных данных показывает, значительное расхождение в оценке глубины термоклина: в модели она превышает наблюдаемую величину на 20 метров. Это указывает на различия в оценке вертикального распределения температурного градиента. Из-за этого в модельном слое ниже термоклина температура воды оказывается на 2°C выше по сравнению с натурными измерениями. В целом по разрезу температура воды в модели холоднее, чем в натурных данных. Разность данных по разрезу составляет от 0.5 до 1 °C. В модельных данных можем наблюдать заток холодных вод в районе 50-го горизонта, на восточных станциях чего не наблюдается в натурных измерениях, температура воды ниже термоклина в модели значительно теплее, чем в натурных измерениях.

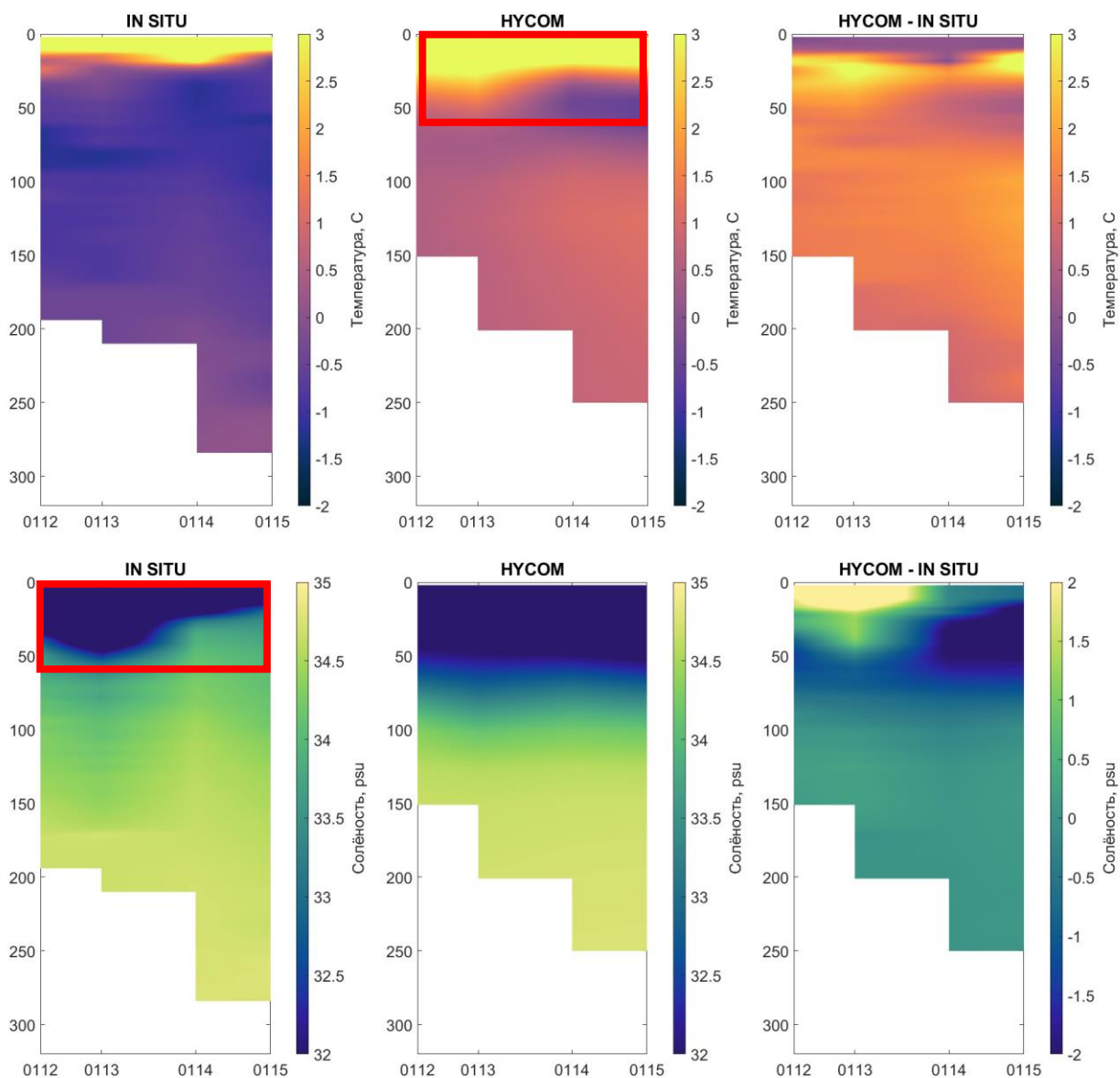


Рисунок 3.4 – Вертикальное распределение температуры (вверху) и солёности (внизу) на разрезе (станции 0112-0115, показанные на рисунке 2.1 черным прямоугольником). In situ – натурные измерения, HYCOM – модельные данные, HYCOM-in situ – разница модельных и натурных данных.

В отношении солёности, перемешанный слой по натурным данным характеризуется более низкой солёностью на 1–2 единицы практической солёности (ЕПС) по сравнению с модельными данными. Кроме того, в натурных наблюдениях отмечается пространственная асимметрия в распределении поверхностных распресненных водных масс, которая не воспроизводится в модели. Модель также демонстрирует занижение глубины

залегания галоклина на 30 метров по сравнению с натурными данными. В слое под галоклином различие в солёности между модельными и натурными данными составляет около 0 ЕПС, что свидетельствует о удовлетворительном соответствии в данной области. Тем не менее, выявленные расхождения в оценке глубины термоклина и отсутствие воспроизведения асимметрии в распределении поверхностных вод указывают на необходимость дальнейшего совершенствования модели для обеспечения более точного моделирования гидрологических процессов в исследуемом регионе. Разность модельных и натурных данных показывает значительное расхождение в поверхностном слое.

3.1 Оценка различий в Карском море

Проведены количественные оценки соответствия данных *in situ* и модельных значений параметров солёности и температуры на вертикальных профилях в каждой точке северо-восточной части Карского моря.

В рамках исследования были проанализированы корреляционные связи температурного поля и поля солёности (рисунок 3.6), что позволило выявить наличие положительных корреляций во всех изученных точках. Величина коэффициента корреляции температуры варьируется в диапазоне от 0,6 до 0,95 на большинстве станций. В северных разрезах, наблюдается значительное снижение данного коэффициента, которое опускается ниже 0,5.

Корреляционные связи солёности демонстрируют более стабильную и устойчивую картину, варьируясь в пределах от 0,8 до 0,92. Эти результаты свидетельствуют о высокой степени согласованности между наблюдаемыми и модельными данными в отношении солёности.

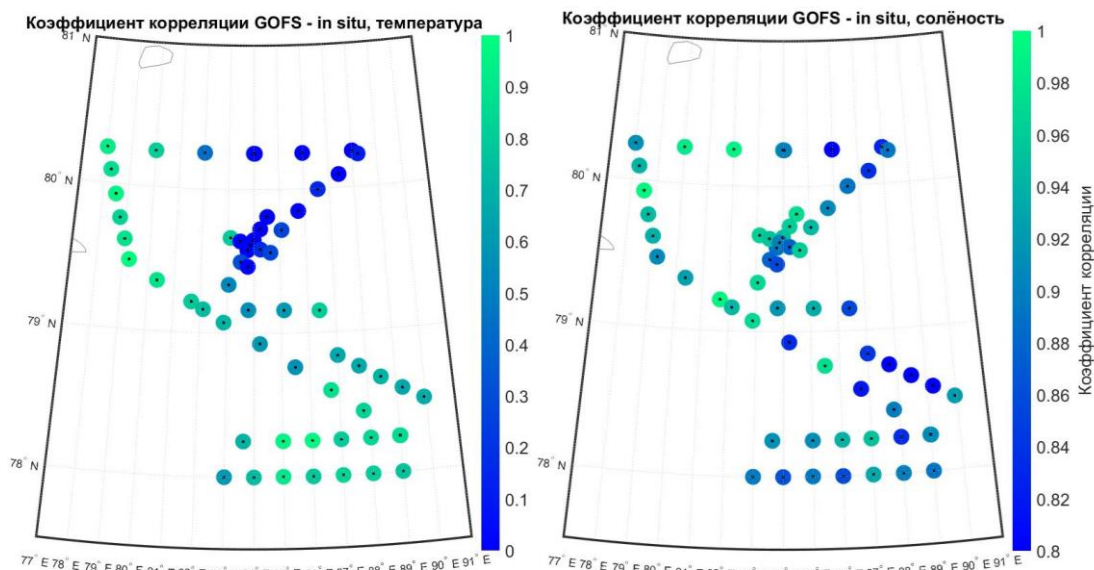


Рисунок 3.6 – – Распределение коэффициентов корреляции вертикальных распределений температуры (слева) и солёности (справа) между модельными данными HYCOM GOMC и натурными данными в Карском море 20 июля – 28 августа 2024 г.

Результаты расчета средней абсолютной погрешности для полей температуры и солёности (рисунок 3.7) демонстрируют значительную пространственную вариабельность в исследуемом регионе. В частности, значения средней абсолютной погрешности для температуры в желобе Воронина и на шельфе Карского моря варьируются в интервале от 1.4 до 2.02 °C, На континентальном склоне данный показатель находится в диапазоне от 0.36 до 1.2 °C

Значения средней абсолютной ошибки для солёности на континентальном склоне составляют от 1.4 до 1.95 епс, что значительно превышает показатели, наблюдаемые в желобе Воронина (0.14–1 епс).

Для полей температуры результаты расчета MAE на шельфе и желобе Воронина имеют низкое значение, это может быть связано с сильным влиянием речного стока и сезонного ледообразования, на континентальном склоне можем наблюдать более высокое соответствие, в связи с тем, что там стабильнее океанографические условия. Для полей солёности наблюдается

обратная ситуация, на континентальном склоне высокая ошибка, связанная с тем, что в модели недостаточный учет взаимодействия шельфовых и глубоководных вод и ошибки в параметризации вертикального перемешивания. В желобе Воронина можем наблюдать хорошее воспроизведение, в связи с более однородными условиями в глубоководной котловине.

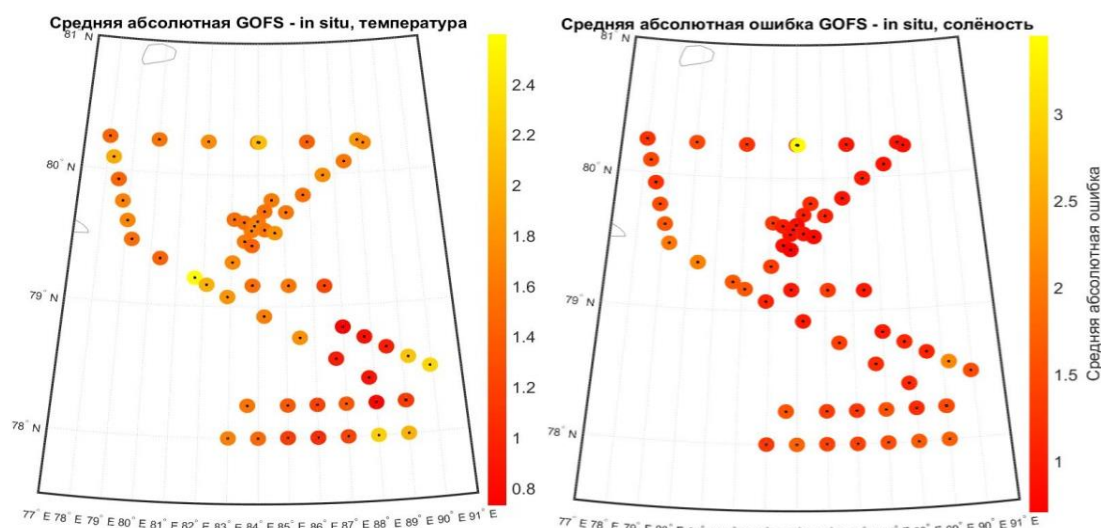


Рисунок 3.7 – Распределение коэффициентов корреляции вертикальных распределений температуры (слева) и солёности (справа) между модельными данными HYCOM GOFS и натурными данными в Карском море 20 июля – 28 августа 2024 г.

Результаты анализа среднеквадратичной ошибки температурных и соленосных полей, представленные в графическом виде на рисунке 3.8, выявляют значительные различия в их пространственной динамике. В глубоководной зоне желоба Воронина наблюдается вариабельность среднеквадратичной ошибки температуры в диапазоне от 1,4 до 2°С. В то же время в шельфовой зоне этот показатель варьируется от 0,8 до 2,2°С.

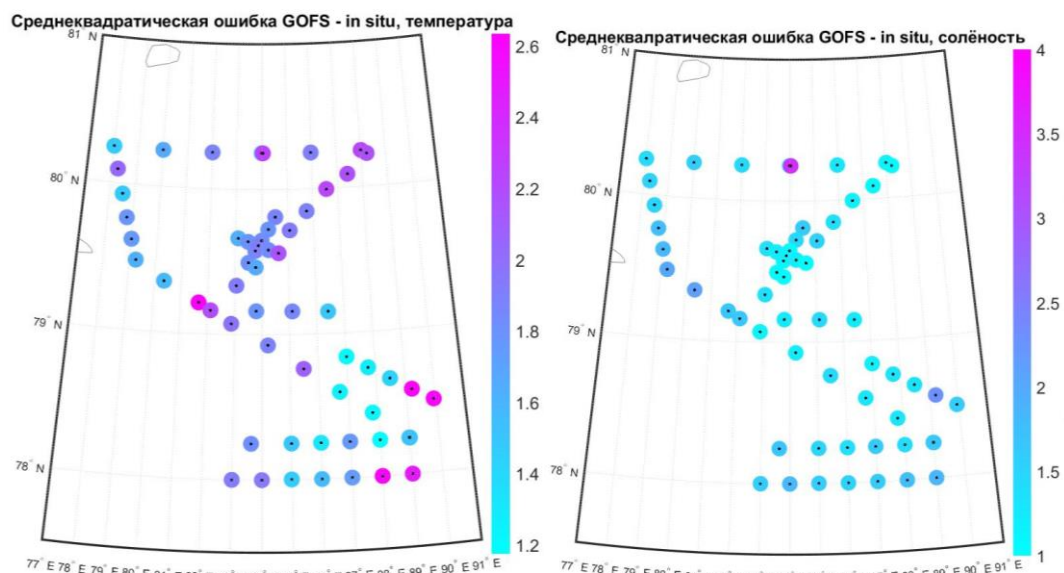


Рисунок 3.8 – Распределение среднеквадратической ошибки распределений температуры (слева) и солёности (справа) между модельными данными HYCOM GOFS и натурными данными в Карском море 20 июля – 28 августа 2024 г.

Для солёностных полей также характерны значительные пространственные вариации. В глубоководной зоне желоба Воронина среднеквадратичная ошибка солёности варьирует в пределах от 1 до 1,5 единиц практической солёности (ЕПС). Однако выделяется аномальная точка с ошибкой, достигающей 3,5 ЕПС, что значительно превышает показатели шельфовой зоны. В оценке ошибки солёности значения варьируются от 0,2 до 1,5 ЕПС.

На рисунке 3.9 представлено сравнительное исследование данных о температуре и солёности, полученных в результате полевых наблюдений и моделирования, на разрезе, проходящем через желоб Воронина (показан на рисунке 2.2 прямоугольником). Этот разрез охватывает шесть гидрологических станций на широте 80,25 с.ш., что обеспечивает

возможность проведения детального анализа гидрологических характеристик в указанной области.

Анализ полученных данных выявил значительные расхождения между значениями температуры, измеренными in situ и рассчитанными по модели в поверхностном перемешанном слое.

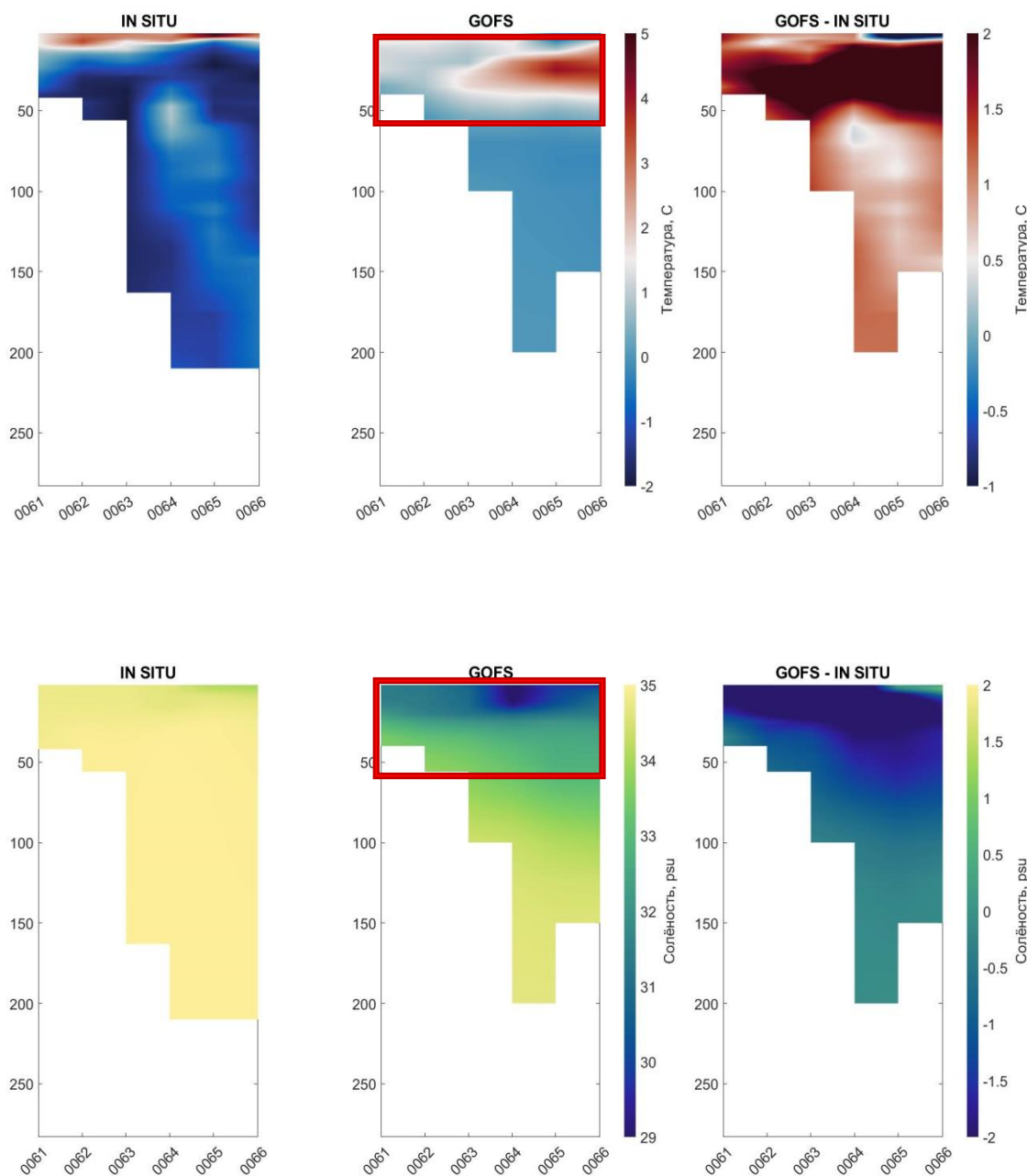


Рисунок 3.9 Вертикальное распределение температуры (вверху) и солёности (внизу) на разрезе (станции 0061-0066, показанные на рисунке 2.2 черным прямоугольником). In situ – натурные измерения, GOFS – модельные данные, GOFS-in situ – разница модельных и натурных данных.

В модельных данных зафиксирован выраженный промежуточный теплый слой на восточных станциях северного разреза, в желобе Воронина, на горизонтах 10-50 м, который не подтверждается результатами натурных наблюдений, там же можно наблюдать расхождения в поверхностном 10-метровом слое, температура натурных данных варьируется от 0.5-3°C, чего не видит модель. Разница между данными оценивается приблизительно в 2°C

Кроме того, анализ характеристик солёности также продемонстрировал существенные расхождения. В модельных данных в верхнем перемешанном слое зафиксирован приток пресных вод на северном разрезе желобе Воронина, который не подтверждается данными натурных наблюдений. В натурных данных мы можем наблюдать приток пресных вод на крайней станции северного разреза, где показатели солёности варьируются от 33-34 епс. Представленные результаты подчеркивают необходимость дальнейшего совершенствования моделей и методик, направленных на повышение точности прогнозирования и моделирования гидрологических процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено детальное сравнительное исследование полей температуры и солености, базирующееся на данных оперативного прогноза, полученных с использованием модели HYCOM GOFs, и результатах прямых измерений, выполненных во время научно-исследовательского рейса ПУ 2024 на борту научно-исследовательского судна «Профессор Молчанов». В рамках анализа были рассчитаны статистические характеристики, позволяющие объективно оценить точность и надежность прогнозных данных по отношению к фактическим измерениям.

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. В целом по вертикали данные модели и натурные данные согласованы, коэффициенты корреляции 0.6-0,95.
2. На основании анализа абсолютных и среднеквадратических ошибок выявлено, что модель показывает более высокое соответствие натурным данным на континентальном склоне, где отклонения температуры и солёности минимальны (среднеквадратическая ошибка по температуре 0,36-2,32 °С, 0,2-1,5 епс, средняя абсолютная ошибка 1.4-2,7 °С, 0,14-1 епс), что связано со стабильными условиями океана. В шельфовой зоне и приливе Вилькицкого показываются значительные расхождения (среднеквадратическая ошибка по температуре 1,4-2,32 °С, 1,4-2,9 епс, средняя абсолютная ошибка 1.4-2,02 °С, 1,4-2,7 епс) которые связаны со сложной динамикой океанических условий, таких как влияние речных стоков, ледообразование и мелководье. В целом модель завышает все оценки средние по вертикали.
3. Анализ расхождений модели и натурных данных на разрезах показал, что в поверхностном слое и слое скачка наблюдаются значительные различия между модельными и

натурными данными. В море Лаптевых слой скачка моделью занижается на 20 м. В желобе Воронина отмечаются промежуточные слои, которых нет в натурных данных.

Таким образом, чтобы улучшить точность моделирования гидродинамических процессов в шельфовых зонах и желобе Воронина, важно провести тщательный анализ параметров. Нужно особо сосредоточиться на термоклинных слоях, речном стоке и ледовых процессах. Эти моменты очень важны для правильного описания гидрологических и геофизических условий в этих районах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Wan, L., Zhu, J., Bertino, L. et al. Initial ensemble generation and validation for ocean data assimilation using HYCOM in the Pacific // Ocean Dynamics. 2008. V. 58, 81–99. <https://doi.org/10.1007/s10236-008-0133-x>. (дата обращения 03.04.2025)
2. Море Лаптевых // База знаний URL: http://proznania.ru/?page_id=2356 (дата обращения 05.03.2025)
3. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том 11. Море Лаптевых / Крутских Б.А., Лагутин Б.Л., Крутских Б.А., Лагутин Б.Л. и др.; под ред. Петров Л.С. - Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986 (дата обращения 10.03.2025)
4. Море Лаптевых - географическое положение и общая характеристика / [Электронный ресурс] // educhl.ru : [сайт]. — URL: <https://www.educhl.ru/170525/novosti-glubina-morya-laptevyyh-srednyaya> (дата обращения 05.03.2025)
5. ЭРСП по гидрометеорологическому режиму моря Лаптевых / [Электронный ресурс] //meteo.ru: [сайт]. — URL: http://meteo.ru/ERSP/atlaslaptev/opis_reg.html (дата обращения 21.04.2025)
6. А. А. Полухин, У. А. Казакова, Г. В. Гусак З, В. О. Муравья, И. Б. Беликов, Н. В. Панкратова, А. И. Скороход, Г. В. Борисенко Структура вод и поток углекислого газа над континентальным склоном моря Лаптевых и в проливе Вилькицкого в осенний сезон // Океанология. — 2023. — № 5. — С. 733-744.(дата обращения 25.04.2025)
7. Океанические воды, циркуляция вод морей российского сектора Арктики// География. — 2022. — № 7. — С. 126-128. (дата обращения 01.05.2025)

8. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации» – СПб.: РГГМУ, 2010 (дата обращения 16.02.2025)
9. 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 (дата обращения 02.09.2024)
10. Русанов В.П., Яковлев Н.И., А.Г. Буйневич Гидрохимический режим Северного Ледовитого океана // Труды ААНИИ. – 1979. – Т. 355. – 144 с (дата обращения 01.03.2025)
11. Щука С.А., Кременецкий В.В., Недоспасов А.А, Очередник В.В. Характеристики термохалинного режима Карского моря // Материалы 81 научной конференции «Экосистема Карского моря – новые данные экспедиционных исследований». Москва, 27–29 мая 2015 года. М.: АПР, 2015.(дата обращения 01.04.2025)
12. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник.– СПб.: изд. РГГМУ, 2008. (дата обращения 07.06.2025)
13. GOFS 3.1: 41-layer HYCOM + NCODA Global 1/12° Reanalysis// / [Электронный ресурс] //HYCOM.ORG: [сайт]. — URL: <https://www.hycom.org/> (дата обращения 20.08.2024)

Приложение А. Код для расчетов

Расчёт статистических характеристик был проведен на языке MATLAB. Для анализа расхождений между модельными и наблюдаемыми данными были использованы разностные поля температуры и солености, а также метрики на основе коэффициента корреляции Пирсона, средней абсолютной ошибки (MAE) и среднеквадратичной ошибки (RMSE), рассчитанные для вертикальных профилей натурных и модельных измерений. Коэффициент корреляции Пирсона представляет собой нормализованную ковариацию двух случайных величин, которая определяется как отношение ковариации между этими величинами к произведению их стандартных отклонений. Данная метрика позволяет оценить степень линейной зависимости между двумя наборами данных. Средняя абсолютная ошибка (MAE) является индикатором среднего абсолютного отклонения между модельными и фактическими значениями и рассчитывается как среднее арифметическое абсолютных разниц между соответствующими элементами двух наборов данных. MAE предоставляет информацию о величине ошибок без учета их направления. Среднеквадратичная ошибка (RMSE) представляет собой более строгую метрику, так как она учитывает как величину, так и направление отклонений. RMSE рассчитывается как квадратный корень из среднего квадрата разниц между прогнозируемыми и фактическими значениями. Эта метрика позволяет оценить среднеквадратичное отклонение модели от наблюдений и является одним из наиболее часто используемых показателей для оценки точности прогнозов.

A.1 Создание массива интерполированных предельных глубин

```
% nm2='runs_GLBy0 3107.nc4';
% %ncinfo(nm)
% %temp=double(ncread(nm2, 'water_temp'));
% lat2=ncread(nm2, 'lat');
% lon2=ncread(nm2, 'lon');
% [mlat, mlon]=meshgrid(lat2, lon2);
% DD=griddata(double(lat), double(lon), depth, mlat, mlon);
% save('interp_depthV', 'mlat', 'mlon', 'DD')
%% Оценка разницы модельной и натурной батиметрии
% load('mj3__coord.mat')
% load("interp_depth.mat")
% for n=1:length(lat)
%     d_orig=mj3_d(n);
%     d_model=interp2(mlat, mlon, DD, lat(n), lon(n));
%     raznitsa(n)=((abs(d_orig-d_model))/d_orig)*100;
% end
% mj3_raz=raznitsa;
% save('bat_raz', 'nz_raz', 'mj1_raz', 'mj2_raz', 'mj3_raz')
%% Построение разрезов
r_names=mj3;
load('mj3__coord.mat')
lat_st=lat;
lon_st=lon;
prognosz=zeros(100, 1);
prognosz(prognosz==0)=NaN;
insitu=prognosz;
prognoszS=prognosz;
insituS=prognosz;
d_last=0;
load("mean_for_3007_2.mat")
for r=1:length(r_names)
    [a1, b1]=size(prognosz);
    %nm2=string(r_names(r));
    nm2=r_names(r);
    data=readmatrix(string(nm2), "FileType", "text");
    depth_st=data(:, 1);
    temp_st=data(:, 3);
    sal_st=data(:, 5);
    big_D2=interp3(lat, lon, 1:41, big_D, lat_st(r), lon_st(r), 1:41);
    tempico=interp3(lat, lon, squeeze(big_D2), temp_m2, lat_st(r), lon_st(r),
depth_st);
    tempico=squeeze(tempico);
```

```

saltico=interp3(lat, lon, squeeze(big_D2), sal_m2, lat_st(r), lon_st(r), depth_st);
saltico=squeeze(saltico);
[a2, b2]=size(temp_st);
if a2>a1
    insitu(a1+1:a2, :)=NaN;
    prognoz(a1+1:a2, :)=NaN;
    insituS(a1+1:a2, :)=NaN;
    prognozS(a1+1:a2, :)=NaN;
    d_last=depth_st(end);
end
if a1>a2
    temp_st(a2+1:a1)=NaN;
    tempico(a2+1:a1)=NaN;
    sal_st(a2+1:a1)=NaN;
    saltico(a2+1:a1)=NaN;
end
insitu=cat(2, insitu, temp_st);
prognoz=cat(2, prognoz, tempico);
insituS=cat(2, insituS, sal_st);
prognozS=cat(2, prognozS, saltico);
end
insitu(:, 1)=[];
prognoz(:, 1)=[];
insituS(:, 1)=[];
prognozS(:, 1)=[];
save('MJ_razrez_3', 'insitu', 'prognoz', 'insituS', 'prognozS')

```

A.2 Визуализация полученных результатов

```

dif=prognoz-insitu;
difS=prognozS-insituS;
[a, b]=size(insitu);
depth_mod=2:1:a+1;
cmap=cmocean('balance');
figure
tiledlayout(1, 3)
nexttile
f1=razrez(dist, depth_mod, insitu , r, 0, 'IN SITU', unit, cax1)
% f1.majorticks=dist;
% f1.majortickslabels=stn;
colormap(cmap)
set(gca, 'XTick', dist)
xticklabels(tick)

```

```

nexttile
f2=razrez(dist, depth_mod, prognosz, r, 1, 'GOFS', unit, cax1)
colormap(cmap)
set(gca, 'XTick', dist)
xticklabels(tick)
% f2.majorticks=dist;
% f2.majortickslabels=stn;
nexttile
f3=razrez(dist, depth_mod, dif, r, 1, 'GOFS - IN SITU', unit, cax2)
colormap(cmap)
set(gca, 'XTick', dist)
xticklabels(tick)
cmap=cmocean('haline');
figure
tiledlayout(1, 3)
nexttile
f1=razrez(dist, depth_mod, insituS, r, 0, 'IN SITU', unit2, cax12)
% f1.majorticks=dist;
% f1.majortickslabels=stn;
colormap(cmap)
set(gca, 'XTick', dist)
xticklabels(tick)
nexttile
f2=razrez(dist, depth_mod, prognoszS, r, 1, 'GOFS', unit2, cax12)
colormap(cmap)
set(gca, 'XTick', dist)
xticklabels(tick)
% f2.majorticks=dist;
% f2.majortickslabels=stn;
nexttile
f3=razrez(dist, depth_mod, difS, r, 1, 'GOFS - IN SITU', unit2, cax22)
colormap(cmap)
set(gca, 'XTick', dist)
xticklabels(tick)
ncinfo("etopo1.nc")
lat_g=ncread("etopo1.nc", 'lat');
lon_g=ncread("etopo1.nc", 'lon');
elevation=ncread("etopo1.nc", 'z');
ind_la=lat_g>=77 & lat_g<=81;
lat_g2=lat_g(ind_la);
ind_lo=lon_g>=95 & lon_g<=122; %122 %95
lon_g2=lon_g(ind_lo);
%elev=double(elev);
elev=elevation(ind_lo, ind_la);

```

```

elev=permute(elev, [2 1]);
%ink=ind_la+ind_lo;
[m lon, m lat]=meshgrid(lon_g2, lat_g2);
figure
worldmap([77 81], [95 122])
hold on
%contourm(lat_g2, lon_g2, elev, 40, 'LineColor','black', 'ShowText','on')
%hold on
[C, h]=contourm(lat_g2, lon_g2, elev, 'LevelList', [-2000, -1000, -500, -100],
'LineColor','black', 'ShowText','on');
[C, h]=contourm(lat_g2, lon_g2, elev, 'LevelList', [-1500, -750, -250],
'LineColor','black', 'LineStyle', '--', 'ShowText','off');
%clabelm(C, [-500, -100], 'LabelSpacing', 1500)
%colormap("winter")
hold on
contourm(lat_g2, lon_g2, elev, 'LevelList', [0 1], 'LineColor','black', 'LineWidth', 3,
'ShowText','off');
load("map_bad_bat_laptev.mat")
sz=200;
%wgs84 = wgs84Ellipsoid("m");
scatterm(lat_st, lon_st, sz, bat_raz, 'o', 'filled')
colormap("jet")
c=colorbar;
c.FontSize=15;
c.Label.String='Расхождение в батиметрии, %';
caxis([0 100])
hold on
plotm(lat_st, lon_st, '.', 'Color', 'k')

```

A.3 Расчет статистик

```

load("L_razrez_5.mat")
[a, b]=size(insitu);

for k=1:b
    temp_g=prognosz(:, k);
    temp=insitu(:, k);

    inn=isnan(temp_g);
    temp_g(inn)=[];
    temp(inn)=[];
    COR=corrcoef(temp_g, temp);
    corT(k)=COR(1, 2);
    mseT(k)=sqrt(mse(temp_g, temp));

```

```

maeT(k)=mae(temp_g, temp);
sal_g=prognoszS(:, k);
sal=insituS(:, k);

inn=isnan(sal_g);
sal_g(inn)=[];
sal(inn)=[];
COR=corrcoef(sal_g, sal);
corS(k)=COR(1, 2);
mseS(k)=sqrt(mse(sal_g, sal));
maeS(k)=mae(sal_g, sal);

```

end

```
save('l5_statistic', 'corT', 'corS', 'mseT', 'mseS', 'maeT', 'maeS')
```

A.4 Визуализация рассчитанных статистик:

```

% bounds_lat = [min(lat) max(lat)-1];
% bounds_lon = [min(lon) max(lon)+1];
%
setup = {'MapProjection','mercator','MLineLocation', 2,'PLineLocation', 5} %
проекция
%   'MapLatLimit',bounds_lat,...
%   'MapLonLimit',bounds_lon,...
%   'MeridianLabel' , 'on', 'ParallelLabel','on',... % включить/отключить
подписи
%   'MLabelParallel', 'south', 'PLabelMeridian', 'west',... % расположение
подписей
    'MLineLocation', 2,'PLineLocation', 5 % шаг подписей
%
'labelunits','degrees','LabelFormat','compass','MLabelRound',0,'PLabelRound',0,...
%   'fontsize', 11, 'frame','on', 'Grid', 'on','GColor','k','GLineWidth',.3};
% shores = gshhs('gshhs_i.b',[76 80],[97 120]);
%%
coord_names={'l1__coord.mat' 'l2__coord.mat' 'l3__coord.mat' 'l4__coord.mat'
'l5__coord.mat'};

raz_names={'l1_statistic' 'l2_statistic' 'l3_statistic' 'l4_statistic' 'l5_statistic'};

rr=5;

figure
axesm(setup{:})
% tightmap

```



```

worldmap([77 80], [95 122])
hold on
geoshow('ne_50m_coastline.shp','Color', [0.5 0.5 0.5])
%setup = {'MLineLocation', 10, 'PLineLocation',10}
hold on
for r=1:rr
    load(string(coord_names(r)))
    load(string(raz_names(r)))
scatterm(lat, lon, 300, corT, 'o', 'filled')
cmocean('curl')
colorbar
c=colorbar;
caxis([0 1])
fontsize("increase")
geoshow('ne_50m_coastline.shp','Color', [0.5 0.5 0.5])
hold on
plotm(lat, lon, '.', 'Color', 'k')
%c.Label.String='Коэффициент корреляции';
%c.FontSize=15;
end

figure
worldmap([77 80], [95 122])
hold on
geoshow('ne_50m_coastline.shp','Color', [0.5 0.5 0.5])
hold on
for r=1:rr
    load(string(coord_names(r)))
    load(string(raz_names(r)))
scatterm(lat, lon, 200, mseT, 'o', 'filled')
cmocean('matter')
colorbar
c=colorbar;
%caxis([0 1])
geoshow('ne_50m_coastline.shp','Color', [0.5 0.5 0.5])
hold on
plotm(lat, lon, '.', 'Color', 'k')
%c.Label.String='Среднеквадратическая ошибка, °C';
c.FontSize=15;
end
figure
worldmap([77 80], [95 122])
hold on
geoshow('ne_50m_coastline.shp','Color', [0.5 0.5 0.5])

```

```

hold on
for r=1:rr
    load(string(coord_names(r)))
    load(string(raz_names(r)))
scatterm(lat, lon, 200, maeT, 'o', 'filled')
cmocean('matter')
colorbar
c=colorbar;
%caxis([0 1])
geoshow('ne_50m_coastline.shp','Color', [0.5 0.5 0.5])
hold on
plotm(lat, lon, '.', 'Color', 'k')
%c.Label.String='Средняя абсолютная ошибка, °C';
c.FontSize=15;
end
figure
worldmap([77 80], [95 122])
hold on
geoshow('ne_50m_coastline.shp','Color', [0.5 0.5 0.5])
hold on
for r=1:rr
    load(string(coord_names(r)))
    load(string(raz_names(r)))
scatterm(lat, lon, 200, corS, 'o', 'filled')
cmocean('curl')
colorbar
c=colorbar;
caxis([0.5 1])
geoshow('ne_50m_coastline.shp','Color', [0.5 0.5 0.5])
hold on
plotm(lat, lon, '.', 'Color', 'k')
%c.Label.String='Коэффициент корреляции';
c.FontSize=15;
end
figure
worldmap([77 80], [95 122])
hold on
geoshow('ne_50m_coastline.shp','Color', [0.5 0.5 0.5])
hold on
for r=1:rr
    load(string(coord_names(r)))
    load(string(raz_names(r)))
scatterm(lat, lon, 200, mseS, 'o', 'filled')
cmocean('matter')

```

```

colorbar
c=colorbar;
%caxis([0 1])
geoshow('ne_50m_coastline.shp','Color', [0.5 0.5 0.5])
hold on
plotm(lat, lon, '.', 'Color', 'k')
%c.Label.String='Среднеквадратическая ошибка, епс';
c.FontSize=15;
end
figure
worldmap([77 80], [95 122])
hold on
geoshow('ne_50m_coastline.shp','Color', [0.5 0.5 0.5])
hold on
for r=1:rr
    load(string(coord_names(r)))
    load(string(raz_names(r)))
scatterm(lat, lon, 200, maeS, 'o', 'filled')
cmocean('matter')
colorbar
c=colorbar;
%caxis([0 1])
geoshow('ne_50m_coastline.shp','Color', [0.5 0.5 0.5])
hold on
plotm(lat, lon, '.', 'Color', 'k')
%c.Label.String='Средняя абсолютная ошибка, епс';
c.FontSize=15;
end

```