

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МОЛОДЫХИНА Софья Викторовна

Выпускная квалификационная работа

Стохастический генератор ледяного покрова Карского моря

Бакалавриат

Направление подготовки 05.03.04 «Гидрометеорология»

Профиль «Океанология»

Научный руководитель:

ассистент, к.г.н. Май Р.И.

Рецензент:

к.г.н. Клячкин С.В.

Санкт-Петербург

2020 год

Оглавление

Введение	4
Глава I. Основные элементы ледяного покрова и методы их определения.....	7
1.1 Элементы ледяного покрова.....	7
1.2 Методы наблюдений за ледяным покровом.....	10
Глава II. Физико-географическое описание исследуемого региона.....	13
2.1 Общие сведения о гидрометеорологическом режиме Карского моря	13
2.2 Сплочённость льда Арктики.....	15
2.3 Ледовые условия Карского моря.....	16
Глава III. Источники информации о ледяном покрове для создания стохастического генератора.....	17
3.1 Формат SIGRID-3 и карты состояния ледяного покрова.....	17
3.2 Проект OSI SAF для обеспечения данными по морскому льду.....	20
3.3 Статистический анализ характеристик ледяного покрова по данным формата SIGRID-3 за 2006-2016 гг.....	21
3.4 Сравнение информации проекта OSI SAF с ледовыми картами SIGRID-3 за 2006-2016 гг.....	22
3.5 Результаты сравнительного анализа ледовых карт SIGRID-3 и данных проекта OSI SAF	23
Глава IV. Режимные характеристики ледяного покрова Карского моря.....	29
4.1. Оценка математического ожидания режимных характеристик ледяного покрова	29
4.2. Оценка изменчивости характеристик ледяного покрова.....	39
4.3 Пространственно-временная связанность сплочённости	44
Глава V. Стохастическое моделирование ледяного покрова	46
5.1. Понятие «стохастический генератор ледяного покрова»	46
5.2 Схемы стохастического моделирования изменения сплочённости.....	46
5.2.1. Схема Бернулли	46
5.2.2. Цепи Маркова	51

5.2.3. Стохастический генератор, основанный на цепях Маркова с пространственно-связанным полем случайной вероятности	52
5.3 Перспективы развития стохастического генератора	56
Заключение	58
Список литературы	59
Приложения	62

Введение

Ледяной покров – отличительная особенность Северного Ледовитого океана и замерзающих морей. Увеличивающаяся активность детальности в полярных широтах нашей страны требует тщательного изучения вопросов, связанных с формированием ледяного покрова, пространственного распределения толщины льда и методов идентификации прочих характеристик.

В данной работе исследуются режимные характеристики ледяного покрова Карского моря. Арктические грузоперевозки по Карскому морю затруднены из-за неблагоприятных климатических условий. При этом Карское море является частью Северного морского пути – через море осуществляется сообщение Европы с Азией. Несколько крупных морских заливов врезаны в материковую часть и создают такие акватории, как Обская и Байдарацкая губы. На их побережьях размещено несколько поселков, где проводятся геологические работы по поиску газа и нефти. На полуострове Ямал реализуется проект «Ямал СПГ» по добыче, сжижению и поставкам природного газа на базе Южно-Тамбейского месторождения. Доказанные и вероятные запасы газа месторождения по стандартам PRMS составляют 926 млрд куб. м. В рамках проекта формируется транспортная инфраструктура, включающая морской порт и аэропорт Сабетта. Порт Сабетта является самым молодым портом России, при этом он стал абсолютным лидером по росту грузооборота среди морских портов России. Порт Сабетта предназначен как для транспортировки сжиженного природного газа, так и для обеспечения круглогодичной навигации по Северному морскому пути.

Одной из крупнейших частных компаний России и крупнейший производитель никеля и палладия в мире является «Норильский никель». На сегодняшний день «Норникель» объединяет группу предприятий, одна из основных производственных площадок расположена на Таймырском полуострове – Заполярный филиал. Основными видами деятельности предприятий группы являются поиск, разведка, добыча, обогащение и переработка полезных ископаемых, производство, маркетинг и реализация цветных и драгоценных металлов. Транспортировка полезных ископаемых осуществляется через Карское море по Северному морскому пути.

Ведение хозяйственной деятельности на арктическом шельфе напрямую зависит от ледовой обстановки. Решение некоторых инженерных задач обусловлено исследованием режимных характеристик процессов и явлений, функционально связанных с параметрами ледяного покрова. Примером таких задач являются исследования изменения трафика движения судов по трассам Северного морского пути, расчет экстремальных условий

эксплуатации сооружений на шельфе и т.д. При этом необходимая длина реализации процессов и явлений может существенно превышать длительность имеющихся рядов наблюдений за льдом.

Один из способов увеличения длины рядов информации о ледяном покрове – создание и использование стохастического генератора, который позволит обеспечить искусственной (синтетической) информацией модели процессов и явлений, функционально связанных с параметрами ледяного покрова. Синтетическая ледовая информация по своим пространственно-временным статистическим характеристикам будет соответствовать реальной картине состояния ледяного покрова.

Кроме того, стохастический генератор ледяного покрова позволит обеспечить синтетической информацией имитационные модели плавания в Арктике, расчеты климатических характеристик навигационных условий. Стохастический генератор ледяного покрова может быть источником информации для типизации ледовых условий, расчета операций флота, тестирования методов автоматического определения оптимального пути судна во льдах и пр.

Из-за возникшей потребности в длинных рядах параметров погоды К. Ричардсон разработал стохастическую модель генерации рядов суточных осадков, максимальной и минимальной температур воздуха и солнечного излучения с учетом сезонного хода параметров (Richardson, 1981). Модель, в основе которой лежит использование вероятностных методов получения синтетической информации, получила название «генератор погоды». В отличие от ранее предложенных моделей (Buishand, 1978; Chin, 1977; Gabriel and Neuman, 1962), новая модель обеспечивает моделирование параметров погоды с использованием условных вероятностей.

Гельфан А. и Морейдо В. для расчета снегозапасов на территории Европейской России используют метод Монте-Карло для создания стохастических моделей на основе статистических характеристик снежного покрова (Гельфан и др., 2014). По принципу К. Ричардсона создан генератор погоды NEWGEN, который при моделировании использует переменные с временным осреднением за год, месяц и сутки. Генератор погоды включает в себя 28 параметров, в том числе модели температуры воздуха, атмосферных осадков и дефицита влажности воздуха, оценка которых проведена по многолетним рядам наблюдения. Результатом создания генератора является осуществление моделирования метеорологических переменных на 1000 лет для каждой станции, то есть для временного ряда, намного превышающего временное разрешение входных параметров. Разработанный в ходе исследования метод динамико-стохастического моделирования

позволяет рассчитывать характеристики снежного покрова в соответствии с реальной картиной современных климатических условий.

Результатом дипломной работы является создание стохастического генератора, основанного на методе Монте-Карло и случайных величин. Реализована модель генерации параметров ледяного покрова, которую мы можем назвать «генератором ледяного покрова» по аналогии с генератором погоды Гельфана и Морейдо.

Цель работы:

Создать стохастический генератор ледяного покрова, воспроизводящий реалистичные пространственно-временные закономерности изменения ледовых характеристик.

Задачи работы:

1. Ввести понятие стохастического генератора ледяного покрова и сформулировать требования к нему.
2. Выбрать источники информации для создания стохастического генератора ледяного покрова.
3. Оценить различные методы создания стохастического генератора, определить их преимущество, недостатки и ограничения.
4. Сравнить режимные характеристики ледяного покрова, рассчитанные по данным наблюдений и результатам работы стохастического генератора.

Глава I. Основные элементы ледяного покрова и методы их определения

1.1 Элементы ледяного покрова

Морской лёд – это сложная поликристаллическая смесь, состоящая из чистого льда с включениями рассола, воздуха и иных частиц, которая покрыта снегом. Лёд, образовавшийся на водной поверхности в результате понижения среднесуточной температуры воздуха, называется ледяным покровом, который обладает следующими характеристиками: положение кромки дрейфующего и неподвижного льда, сплочённость льда, его возраст, формы, наложенность и торосистость, разрушенность, сжатость, раздробленность, пространство чистой воды среди льдов, загрязнённость, заснеженность. (Волков, 1981).

Кромка неподвижного льда – припай

Наличие за кромкой припая заприпайной полыньи (уже растаявшая или незамерзшая область ледяного покрова) является признаком границы данного припая. В случае отсутствия полыньи характерным признаком границы также являются трещины, каналы и разводья. О присутствии границы на участке между дрейфующим льдом и припаем говорят следующие косвенные признаки: наличие небольших зон молодого льда, свежих тросов за кромкой припая, особенности залегания снежного покрова, характер торосистых образований и наличие полосы тертого льда у кромки. Средняя толщина припая достигает 180 – 240 см, а длина его границы может составлять от 10 до 20 метров.

Сплочённость льда

Сплочённость льда характеризуется отношением площади льдин к зоне, где они распределены относительно равномерно, к общей площади данной зоны. Это отношение выражается в десятых долях по 10-балльной шкале (от 0 баллов – чистая вода, единичные льдины до 10 баллов – сплошной лёд). Если на видимой поверхности моря присутствует лёд различного возраста, то помимо определения общей сплочённости также описывается характер сплочённости каждой возрастной группы льдов.

Возраст льда

Возраст льда определяется по различным внешним признакам, которые являются индикаторами каждой возрастной стадии. Чтобы оценка возраста была точной, необходимо учитывать влияние освещённости, облачности и другие метеорологические

характеристики. Для каждой возрастной стадии формируется «эталон», основанный на цвете льда, характере снежного покрова, формы ледяных образований и др. Различают следующие возрастные стадии: начальные виды льда (ледяное сало, снежура, шуга), нилас (до 10 см), молодой лёд: серый (10-15 см), серо-белый (15-30 см), однолетний лёд: тонкий (30-70 см), средний (70-120 см), толстый (120 см и более), остаточный однолетний лёд, двухлетний лёд (180-280 см), многолетний лёд-полярный пак (300-350 см).

Формы ледяных образований

Плавающий лёд по формам подразделяется на ледяные поля, к которым относятся льдины более 20 м в поперечнике, и битый лёд – куски льда менее 20 м в поперечнике. Ледяные поля подразделяются на гигантские ледяные поля (более 10 км), обширные ледяные поля (2-10 км), большие ледяные поля (500-2000 м), обломки ледяных полей (100-500 м) и крупнобитый лёд (20-100 м). Формами плавучего льда также являются блинчатый лёд (от 30 см до 3 м) и тертый лёд. Тертый лёд – скопление плавучего льда, которое состоит из бесформенных кусков менее 2 м в поперечнике.

Сжатость льда

Сжатие характеризуется исчезновением чистой воды между льдинами, которое возникает в процессе сплочения дрейфующих льдов, их перегруппировки и возникновения разлома льдин. Сжатость льда также характеризуется балльной системой. В прибрежной зоне сжатие может достигать такого масштаба, что возникают трудности для движения не только транспортных судов, но и мощных ледоколов.

Загрязнённость льда

Загрязнение поверхности льда обусловлено воздействием различных факторов искусственного и естественного загрязнения. Наибольшее количество загрязняющих веществ органического происхождения попадает на лёд из морской воды в результате её замерзания.

Материковый сток и ветровое разрушение суши являются основными транспортерами неорганических загрязняющих частиц. Возникновение искусственного загрязнения характерно для мест активного судоходства, устьям рек, некоторым заливам и бухтам, к которым приурочены промышленные предприятия, города и посёлки. Данные о загрязнении льда указывают на характер его дрейфа и условия таяния.

Наслоенность и торосистость

Из-за неравномерного дрейфа отдельных ледяных образований могут возникнуть разломы, а также это может привести к столкновению льда, в результате чего ледяной покров деформируется. Деформация ледяного щита проявляется в виде наслоения, образования подсовов и торосов, что приводит к значительному увеличению толщины ледяного покрова.

Наслоения присущи ниласовым, серым и серо-белым льдам. В море процесс наслоения ниласовых и молодых льдов образует препятствие для судоходства, так как данное явление охватывает обширные участки и протекает неравномерно. Наслоение молодых льдов в конкретной зоне характеризуется отношением площади наслоенного льда к общей доле молодых льдов. Степень наслоения выражается в десятых долях (баллах).

Возникновению торосистых образований (таких, как подсовы, торосистые нагромождения, гряды торосов, барьеры) предшествуют подвижки и сжатия льдов всех возрастов. Наблюдение за торосистостью является одним из важнейших, особенно когда необходимо определить сплочённость льда. В результате дрейфа плавучий лёд неоднократно подвергается торосению, поэтому торосистость приобретает беспорядочный характер. Степень торосистости также характеризуется баллами.

У многолетнего льда торосистость может возникнуть только при сильных сжатиях, так как формированию торосистости препятствует высокая прочность и мощность льда. При этом торосы образуются из обломков раздробленного льда. Также на поверхности многолетнего льда могут располагаться холмы и бугры, которые возникли в процессе неоднократного обтаивания торосов, выпучивание льда из-за замерзания снежиц и неравномерного таяния участков ровного льда. Степень всхолмленности многолетних льдов оценивается по трехбалльной шкале.

Разрушенность льда

Данная характеристика обуславливает прочность льда, а также позволяет уточнить его фактическую сплочённость на стадии образования проталин и промоин. Оценка разрушенности показывает скорость таяния, что позволяет дать характеристику толщины льдов различных возрастов в период таяния. Появление снежиц, наличие снежного покрова, количество проталин и промоин позволяют дать оценку степени разрушенности льда. Также дополнительными характеристиками являются: цвет поверхностного слоя, осадка льдин, форма их краев и наличие подводных таранов. Несмотря на то, что таяние льдов различных возрастов начинается одновременно, этот процесс идёт с разной

скоростью и интенсивностью, поэтому оценку степени разрушенности дают по отдельным категориям возраста льда. Таяние начальных льдов происходит быстро, поэтому определить степень разрушенности не представляется возможным. Оцениваются разрушенность для молодых, однолетних и старых льды.

Заснеженность льда

Распределение снежного покрова на морских льдах происходит в зависимости от условий накопления и продолжительности выпадения. В осенний и зимний период снежный покров легко сдувается в местах спокойного замерзания благодаря ровной поверхности льда. В районах распространения подсонов и торосистых образований снежный покров располагается неравномерно.

Также снег быстро пропитывается выступающим изо льда рассолом и превращается в ледяную корку на ниласовых и серых льдах. На старых и однолетних торосистых льдах в конце зимы наблюдается наиболее мощный и неравномерный снежный покров. Скопления снега образуют заструги, сугробы и надувы, которые вытянуты по направлению ветра. На подветренной стороне торосовых гряд формируется толстый снежный покров высотой до метра и более.

Степень заснеженности льда и формы снежных образований являются основными признаками возраста льда. Оценивание степени заснеженности происходит по трехбалльной шкале.

1.2 Методы наблюдений за ледяным покровом

Начало развития наблюдений за льдом имеет тесную связь с историей исследования Арктики, которое условно проходило в несколько этапов.

Наибольшее время занял первый этап, в результате которого получены непериодические сведения о ледяном покрове, сбор которых происходил при осуществлении промысловой деятельности. Однако на данном этапе сбор информации о ледяном покрове не был обособленным видом деятельности. Производилось картирование морских льдов и составление морских навигационных карт. В виде устных пересказов и отдельных записей передавался опыт плавания во льдах поселенцев с берегов Белого моря – поморов. Эти исторические сведения стали фундаментом для работ М.В. Ломоносова, который обобщил разрозненные знания о распределении льда и его свойствах в Северном Ледовитом океане, а также выдвинул несколько научных гипотез и прогнозов, обнародовал специальную терминологию в области ледоведения. Первое сквозное

плавание состоялось лишь в 1878 году под руководством шведского ученого А.Э. Норденшельда.

Возникла необходимость в создании специализированной организации, которая могла бы обеспечить планомерные ледовые плавания.

С этого периода стали применяться самолеты для обеспечения судоходства в Арктике и исследования морских льдов. Первый полёт осуществлён 8 августа 1914 года Яном Нагурским на гидросамолете «Морис Фарман».

В сороковых годах была существенно изменена система условных знаков. Введена раскраска зон в соответствии с градациями сплочённости льда.

В период 50 – 70 годов интенсивно применялись визуальные наблюдения за ледовой обстановкой, поскольку методы и средства наблюдений соответствовали уровню развития друг друга. Начали активно использовать вертолеты палубного базирования. Преимуществом вертолетной разведки является возможность детализирования распределения льдов. Вертолет, имея меньшую скорость, чем самолет, может выискать те детали, которые необходимы для решения определенной задачи. Также при взаимодействии вертолета и ледокола стало возможно изучение строения ледяного покрова в различных пространственных масштабах, его структуры и состояния, а также распределения напряжений во льду и деформаций. Однако вертолетная разведка напрямую зависит от местных условий погоды.

Возникло новое техническое средство инструментального авиационного наблюдения – аэрофотосъёмка, а в дополнение к ней стали экспериментально использоваться дистанционные способы зондирования.

Следующим этапом развития средств и методов ледовых наблюдений стало использование инструментальных средств и внедрения в оперативную практику информации, получаемой с космических аппаратов дистанционного зондирования. В настоящее время информация дистанционного зондирования используется в целях стратегического планирования морских операций, а также для составления ледовых прогнозов.

На сегодняшний день идет поиск оптимального построения системы ледовых наблюдений для обеспечения хозяйственной деятельности и деятельности по добыче и перевозу углеводородного сырья с территорий континентального шельфа России (Миронов, 2009).

На данный момент ведущими инструментальными комплексами ледовой разведки являются:

1. Искусственные спутники Земли, которые осуществляют прослеживание ледяного покрова в видимом и тепловом диапазонах спектра.
2. Инструментальные комплексы, которые устанавливаются на воздушных судах:
 - радиолокаторы бокового обзора;
 - радиолокационный видеоимпульсный измеритель толщины морского льда;
 - аэрофотосъемочная аппаратура;
 - самолетный радиационный термометр;
 - самолетные актиметрические датчики: пиранометр и альбедометр (Волков, 1981).

Глава II. Физико-географическое описание исследуемого региона

Карское море является окраинным морем Северного ледовитого океана, которое омывает берега северо-восточной части Европы, Западной Сибири и полуострова Таймыр. На западе море ограничено островом Вайгач и островами архипелага Новая Земля, соединено с Баренцевым морем проливами Югорский Шар, Карские Ворота и Маточкин Шар. На востоке море ограничено архипелагом Северная Земля. На северо-западе Карское море смыкается с Баренцевым морем, граница моря идет от м. Желания (архипелаг Новая Земля) на м. Кользат (архипелаг Земля Франца-Иосифа, восточный берег острова Грэм-Белл). На севере Карское море имеет широкий выход к Арктическому бассейну Северного Ледовитого океана. Расположенное в высоких широтах Арктики и непосредственно связанное с Северным Ледовитым океаном Карское море характеризуется полярным климатом. Относительная близость Атлантического океана немного смягчает климат, однако острова Новой Земли служат преградой на пути теплых атлантических воздушных масс (Горшков и др., 1980).

Площадь Карского моря равна 885.2 тыс. км², объем вод 112 тыс. куб. км, средняя глубина составляет 127 м, наибольшая – 620 м. (Добровольский, Залогин, 1965). Вдоль островов Новой Земли и острова Вайгач на западе моря располагается Новоземельская впадина с глубинами 200-400 м. На северо-востоке моря наибольшие глубины наблюдаются в желобе Святой Анны (до 600 метров).

2.1 Общие сведения о гидрометеорологическом режиме Карского моря

Распределение температуры воды.

Термический режим Карского моря очень неоднороден. Особенности географического положения моря и атмосферной циркуляции над ним создают заметные различия в режиме температуры воздуха над разными его частями. В зимний период, когда море сплошь покрыто льдом, температура воды под ним близка к температуре замерзания (-1.7, -1.9°C) (Добровольский, Залогин, 1965). Высокие температуры отмечаются вблизи устьев рек, наиболее низкие в районах поступления относительно соленых вод Баренцева моря. В мелководных районах моря водные массы от поверхности до дна становятся почти однородными и имеют отрицательную температуру. Только в желобах Воронина и Святой Анны температура воды положительна и достигает 1.0-1.5°C, это обусловлено поступлением в эти районы теплых глубинных атлантических вод. Но

проникновение их невелико и южных границ желобов они достигают сильно охлажденными (0°C и ниже).

В летний период Карское море имеет следующую вертикальную структуру: поверхностный прогретый распреснённый слой с положительными значениями температур и солёностью от 3 до 25 ‰ (толщина 5 – 15 м), слой галоклина, характеризующийся значительными градиентами характеристик (глубина 15 – 25 м), и придонный слой с отрицательными значениями температуры и солёностью выше 34 ‰. В северных частях этих морей верхние слои заняты поверхностной арктической водной массой, в промежуточных слоях наблюдаются атлантические водные массы (Васильев, 1976).

В Карском море температура воды испытывает значительные сезонные колебания. Формируются они летом за счет зависимости состояния поверхностного слоя от распределения льда, величины речного стока, притока теплых вод из других районов, колебаний положения полярного гидрофронта. Зимой колебания температуры воды в поверхностном слое незначительны, но довольно ярко проявляются в тепловом состоянии глубинных вод. Величина изменчивости среднегодовой температуры воды в Карском море составляет $\pm 1.5^\circ\text{C}$. Наибольшая устойчивость температур наблюдается в северных районах моря, за исключением областей, очищающихся от ледяного покрова. Здесь значения изменчивости особенно велики; также велики они и в районах, где важную роль играет адвекция тепла из Баренцева моря и Арктического бассейна (Добровольский, Залогин, 1965).

Распределение солёности.

На распределение и величину солёности Карского моря оказывают влияние взаимодействие с водными массами Северного Ледовитого океана, значительный материковый сток, а также формирование и разрушение ледяного покрова. Солёность поверхностных вод меняется в пределах от 5‰ в южной части моря до 33-34‰ на севере (Добровольский, Залогин, 1965). Минимальные значения отмечаются в районах впадения в море рек Оби и Енисея.

В западную часть моря поступают сравнительно однородные и солёные воды Баренцева моря, поэтому здесь солёность немного выше и увеличение ее с глубиной происходит менее резким скачком, чем на востоке моря.

Сезонные колебания связаны с процессами ледообразования и таяния. Осенью – в период образования льда – солёность характеризуется повышенными значениями. В теплые сезоны весенний приток речных вод уменьшает поверхностную солёность в

приустьевых участках и в прибрежной полосе. Далее таяние льдов и распространение речных вод летом распресняют поверхностный слой.

Циркуляция вод.

На формирование поверхностной циркуляции влияет речной сток и водообмен с Баренцевым морем. В результате действия стоковых течений и притока воды из смежных морей образуется круговорот поверхностных вод против часовой стрелки в юго-западной и северной частях моря. На круговорот в юго-западной части оказывают влияние поступающие воды из Баренцева моря и западная ветвь Обь-Енисейского течения.

Северная струя Обь-Енисейских вод направляется на северо-восток к островам Северная Земля, а восточная – вдоль Таймырского берега к проливу Вилькицкого. У острова Русский часть этого течения поворачивает на север, следует вдоль берегов Северной Земли, а затем, несколько отклоняясь к северо-западу, замыкает северо-восточный круговорот.

Скорости постоянных течений изменяются от 5 до 15 см/с. Однако, если они совпадают по направлению с ветровыми течениями, их скорости увеличиваются до 70-90 см/с (Добровольский, Залогин, 1965).

2.2 Сплочённость льда Арктики

Одной из возможных причин многолетних изменений в пространственном распределении льда может быть регулирующее воздействие со стороны солнечной активности. Существует характерная 10-летняя ритмичность повторяемости ледовой оппозиции в солнечном цикле. При усилении солнечной активности наблюдается смещение области наибольшей барической изменчивости к востоку от архипелага Северная Земля, что сопровождается увеличением повторяемости оппозиции. При ослаблении солнечной активности область наибольшей барической изменчивости смещается к западу от Северной Земли, что уменьшает повторяемости оппозиции.

Связь между годовыми значениями числа Вольфа (относительное число солнечных пятен) и сезонной сплочённостью льдов показывает, что в арктических морях – наряду с обширными акваториями отсутствия корреляции – существуют статистически значимые и противоположно направленные солнечно-ледовые корреляции: усиление солнечной активности сопровождается фоновым увеличением ледовитости в Карском море и уменьшением в Восточно-Сибирском и Чукотском. Эта пространственная неоднозначность находит подтверждение в глобальных особенностях солнечно-земных связей в северном полушарии (Егоров, 2010).

2.3 Ледовые условия Карского моря

Формирование ледяного покрова происходит под действием термических и динамических атмосферных и океанических процессов различных масштабов. Ледяной покров является продуктом взаимодействия океана и атмосферы и служит естественным индикатором интенсивности этого взаимодействия. В работе (Зубакин Г.К., 1988) дано определение термина «состояние ледового покрова» как оптимальной совокупности его параметров, пространственно-временная изменчивость которых характеризует объект в конкретных физико-географических условиях. В первую очередь такими крупномасштабными параметрами состояния ледового покрова Карского моря для сезонных и междугодичных (а также вековых) колебаний являются его ледовитость и положение кромки льда (Карелин, Карклин, 2012).

Лёд в Карском море образуется как в самом море, так и поступает из Центрального Антарктического бассейна. В районе 80 с.ш. устойчивое ледообразование начинается в октябре с замерзания среди остаточных льдов в направлении с северо-востока на юго-запад. В последнюю очередь образование льда происходит в областях залива теплых соленых вод из Баренцева моря. В зимний период неподвижный лед бывает только вблизи берегов в виде припая. За припаем обычно располагаются плавучие льды, в большинстве случаев – это обширные ледяные поля. Нарастание толщины льда также начинается с северо-восточной части моря в юго-западном направлении. К началу сезона таяния толщина льда достигает до 2-х метров в северо-восточной части и до 120 см в юго-западной части.

В конце мая – начале июня начинаются процессы разрушения ледяных полей. В первую очередь таяние начинается в районе заприпайных полыней, откуда разрежение льдов распространяется вглубь ледяных массивов. Рубеж июля–августа совпадает с сезонным пиком площади редких и разреженных льдов (сплочённость 1–6 баллов) и соответствует периоду наибольшего разнообразия ледовых условий в Карском море. К концу августа акватория моря полностью очищается ото льда вплоть до восьмидесятих широт.

Глава III. Источники информации о ледяном покрове для создания стохастического генератора

Одной из задач данного исследования стал выбор источника данных для создания стохастического генератора ледяного покрова. В этой главе приводится описание формата векторного архива SIGRID-3 и обзор проекта Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI SAF), а также сравнение статистических характеристик информации проекта OSI SAF и ледовых карт SIGRID-3.

3.1 Формат SIGRID-3 и карты состояния ледяного покрова

SIGRID-3 – формат векторного архива морских карт. Данный формат разработан Всемирной Метеорологической организацией с целью создания ледового банка данных, который упростил процесс получения и обмена данными между пользователями. В отличие от матричных форматов, в которых характеристики располагаются в узлах сетки, векторные форматы представляют собой набор полигональных объектов. Ледовая карта SIGRID-3 – это связанный набор файлов ГИС формата «shapefile». Каждая карта содержит следующие данные по всем отдельным ледовым зонам: географические координаты ледовой зоны, её площадь и периметр, общую сплочённость, сплочённость каждой возрастной градации, формы льда и др. (Смоляницкий, 2004).

Для обозначения характеристик льда используется система символов, которая представлена в виде овала. Овальный символ характеризует отдельную ледовую зону (границы ледовой зоны обозначают области с одинаковыми характеристиками льда) – он является главным условным знаком на картах состояния ледяного покрова. Символ содержит значения общей и частной сплочённости для каждой возрастной градации. Значения сплочённости указываются в баллах.

Ледовые карты (рис.1) отображают формы плавучего льда в морях (припайный лёд, плавающие льдины, ледовые поля). На картах указывают возраст льдов, сплочённость, динамику и прочие характеристики. Оперативные карты ледовой обстановки предназначены для обеспечения навигации, их составляют по данным ледовой разведки и аэрокосмической съёмки. Также создаются обзорные карты (декадные, месячные, сезонные), которые используются в научных целях (Горкин, 2006).

Цветовыми градациями показана доля морской поверхности, занятой льдом (0 баллов – чистая вода, 10 баллов – сплошной лёд).

Информация ледовой карты трансформируется в сеточный формат через наложение сетки точек. Каждой точке сетки присваивается набор переменных и их

числовые значения, определенные для зоны, в которую попала данная точка. Хранение данных ледовых карт в векторном формате позволяет сохранить информацию в исходном состоянии, при этом карты могут быть перемасштабированы без потери информации. Также ледовые карты в формате SIGRID-3 занимают существенно меньший объем оперативной памяти и имеют большую скорость воспроизведения при визуализации на мониторах.

Анализируемые данные сплочённости и толщины ледяного покрова взяты с сайта государственного научного центра «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ААНИИ), который является лидером российской полярной науки. Сайт распространяет данные радиометра MODIS, которые передаются из космоса спутником дистанционного зондирования Terra в режиме «прямого вещания» (<http://www.aari.ru>).

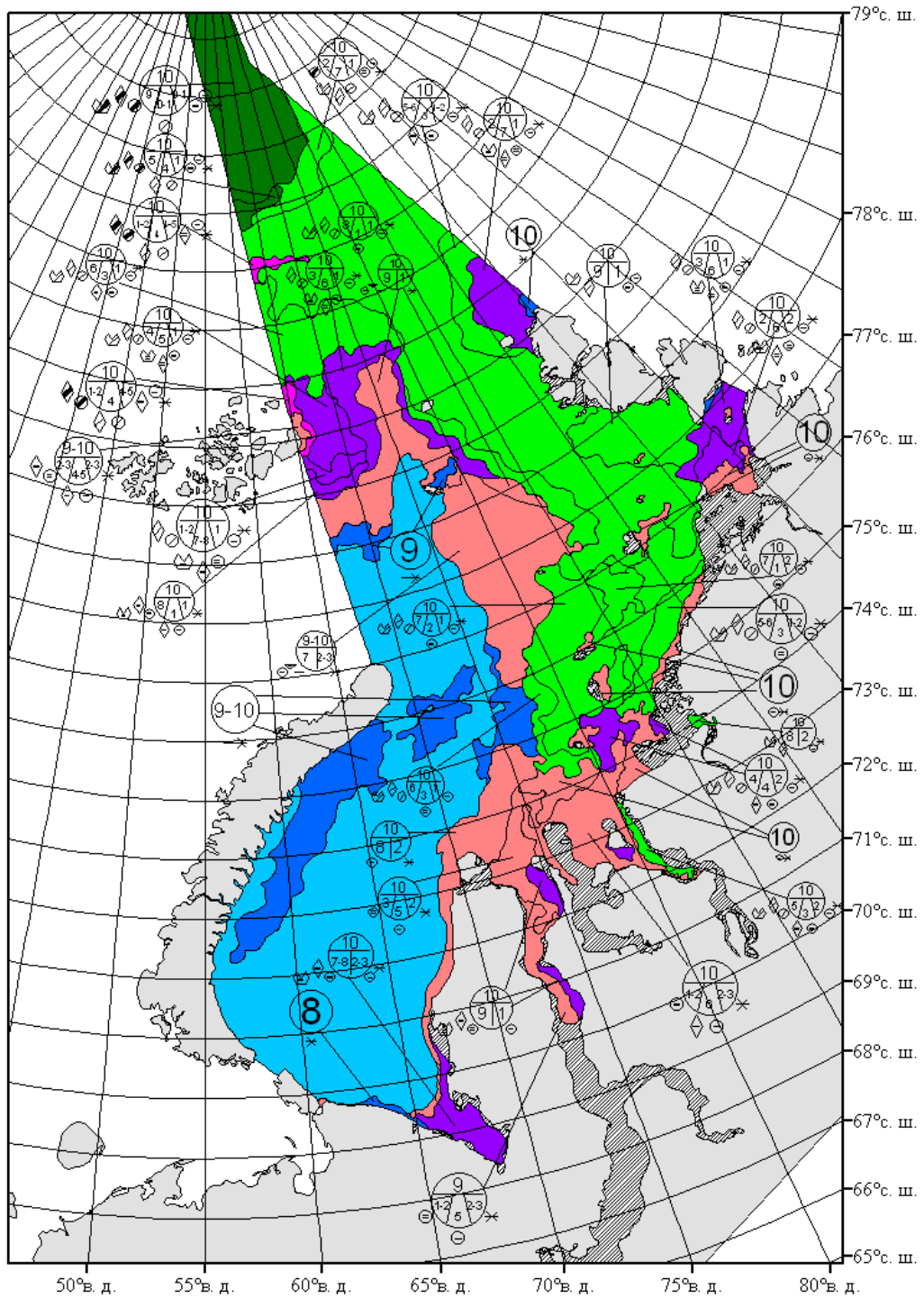


Рис.1 Генерализованная карта состояния ледового покрова Карского моря. 06.12.2011г.

3.2 Проект OSI SAF для обеспечения данными по морскому льду

Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI SAF) является подразделением Европейской организации спутниковой метеорологии (EUMETSAT), основная цель которой заключается в оперативном мониторинге климатических изменений с 1996 года. Основной задачей EUMETSAT является круглосуточный мониторинг и сбор данных о погоде климате и окружающей среде посредством спутниковых наблюдений. Деятельность проекта OSI SAF направлена на наблюдение за состоянием ледяного покрова морей и океанов, оценка параметров льда, таких, как концентрация, толщина и тип (возраст) ледяного покрова, а также предоставление данных о скорости и направления ветра, температуры поверхностного водного слоя и параметров радиационных потоков. Спутниковые наблюдения позволяют обеспечить непрерывный сбор информации физического и биологического состояния океана и параметров атмосферы, которые оказывают влияние на циркуляцию океана. С 2005 года проект OSI SAF выпускает ежедневные карты состояния ледяного покрова Земли по его различным параметрам.

Хранение данных осуществляется в формате NetCDF (Network Common Data Format), который включает в себя информацию о содержащихся данных, координатах полей сбора информации, пространственное и временное разрешение, а также единицы измерения. Это двоичный формат, который используется при обмене научными данными в областях метеорологии, климатологии и океанографии.

Одним из преимуществ формата является реализация параллельного доступа, суть которого в том, файл может быть открытым и при этом непрерывно пополняться новыми данными. Масштабируемость позволяет получать доступ к отдельным наборам данных без считывания всего файла, что значительно экономит время.

Помимо самих данных файл в формате NetCDF содержит в себе описание данных-метаданные. Данные проекта OSI SAF содержат информацию о полярных и декартовых координатах, значения концентрации морского льда, уровень достоверности этих значений, состояние концентрации льда, а также нефильТРованные данные.

Характеристики состояния ледяного покрова получают в результате обработки спутниковых снимков, полученных с помощью радиометра SSMIS. Датчик SSMIS представляет собой пассивный микроволновый радиометр с коническим сканированием. Данные OSI SAF (osisaf.met.no) представлены в узлах регулярной сетки с шагом 10 км и суточной дискретностью (Breivik L.-A., et all, 2001).

3.3 Статистический анализ характеристик ледяного покрова по данным формата SIGRID-3 за 2006-2016 гг.

Для оценки статистических параметров ледяного покрова Карского моря по данным формата SIGRID-3 использовались ледовые карты, которые соответствуют периоду с 2006 по 2016 год. Ледовые карты хранятся в Международном Центре Данных – Морской Лед (МЦД-МЛ) <http://wdc.aari.ru/datasets/>.

Алгоритм перевода характеристик ледовых зон во временные ряды параметров ледяного покрова данных в формате SIGRID-3 состоит из следующих шагов:

1. Открытие всех ледовых карт формата .shp.
2. Перевод характеристик ледовых зон в узлы заданной сеточной области (координатная сетка из данных проекта OSI SAF).
3. Извлечение значений времени наблюдений.
4. Перевод баллов толщины и сплочённости формата SIGRID-3 в баллы в соответствии со шкалами сплочённости и толщины.
5. Расчет характерных размеров ледовых зон по формуле 1:

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, [1]$$

где S – площадь ледовой зоны, $\pi=3,14$.

6. Создание трехмерных массивов характерных размеров ледовых зон, сплочённости и толщины.

7. Осреднение значений сплочённости, толщины и характерных размеров ледовых зон за каждый месяц за период с 2006 по 2016 года по формуле 2:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, [2]$$

где \bar{x} – среднее арифметическое, n – количество показателей, x_i – значение конкретного показателя.

8. Нахождение значений среднеквадратического отклонения сплочённости и толщины по формуле 3:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, [3]$$

где s – среднеквадратическое отклонение, n – количество показателей, x_i – значение конкретного показателя, \bar{x} – среднее арифметическое.

9. Построение ледовых карт с использованием осредненных значений и среднеквадратических отклонений сплочённости, толщины и характерных размеров ледовых зон.

3.4 Сравнение информации проекта OSI SAF с ледовыми картами SIGRID-3 за 2006-2016 гг.

Для сравнения данных по сплочённости ледяного покрова Карского моря за период с 2006 по 2016 года в качестве параметров используются корреляция, средние абсолютные и среднеквадратические ошибки. Информация проекта OSI SAF взята из архивов <ftp://osisaf.met.no/>.

Алгоритм, используемый для сравнения данных OSI SAF и SIGRID-3 для Карского моря за период с 2006 по 2016 гг. состоит из следующих шагов:

1. Чтение файлов проекта OSI SAF в формате NetCDF и извлечение данных о состоянии ледяного покрова.
2. Перевод сплочённости OSI SAF в баллы в соответствии со шкалами сплочённости.
3. Перевод информации данных SIGRID-3 в узлы координатной сетки данных проекта OSI SAF.
4. Извлечение из массива данных OSI SAF полей, приходящихся на даты ледовых карт SIGRID-3.
5. Создание массива данных OSI SAF, приходящихся на даты ледовых карт SIGRID-3, с осреднением за трое суток.
6. Осреднение значений сплочённости за каждый месяц за период с 2006 по 2016 года по формуле 2.
7. Нахождение значений среднеквадратического отклонения сплочённости по формуле 3.
8. Построение ледовых карт с использованием осредненных значений и среднеквадратических отклонений сплочённости по данным SIGRID-3 и OSI SAF.
9. Расчет корреляции (формула 4), средних абсолютных (формула 5) и среднеквадратических (формула 6) ошибок для каждой точки пространственно-временного массива:

$$correl = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 * \sum(y_i - \bar{y})^2}}, [4]$$

$$MAE = \frac{\sum |x_i - y_i|}{n}, [5], \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum (x_i - y_i)^2}{n}}, [6],$$

где x_i – значение сплочённости по данным OSI SAF, y_i – значение сплочённости по ледовым картам SIGRID-3, n – количество значений, \bar{x} и \bar{y} – среднее арифметическое (формулы 7-8) :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, [7], \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, [8]$$

10. Визуализация полученных значений корреляции, средних абсолютных и среднеквадратичных ошибок для территории Карского моря.

11. Расчет средних, максимальных и минимальных значений корреляции, MAE и RMSE для сезонного хода.

12. Построение графиков сезонного хода значений корреляции, MAE и RMSE.

3.5 Результаты сравнительного анализа ледовых карт SIGRID-3 и данных проекта OSI SAF

В результате реализации алгоритмов из разделов 3.3-3.4 получены карты пространственного распределения значений коэффициента корреляции, средней абсолютной и среднеквадратической ошибки для сплочённости по данным ледовых карт SIGRID-3 и информации проекта OSI SAF. Карты получены в результате сравнения значений сплочённости в каждой точке координатной сетки за каждую дату, которая соответствует дате SIGRID-3, так как ледовые карты являются еженедельными, а данные OSI SAF записываются ежедневно.

На картах выделяются прибрежная полоса и пространство вокруг островов. Для этих областей применены специальные «маски», которые исключают значения для снежного покрова на суше, которые могли быть приняты за ледяной покров. Поэтому осреднение и расчет значений корреляции и ошибок происходит без учета информации прибрежной полосы. Такие значения параметров в анализе не учитываются.

На рисунке 2 видно, что для всей территории Карского моря коэффициент корреляции между временными рядами изменения сплоченности по данным SIGRID-3 и OSI SAF варьируется от 0,8 до 1. Это говорит о том, что значения сплочённости SIGRID-3 и OSI SAF меняются синхронно – формирования и разрушения льда для обоих форматов характеризуется одинаковой тенденцией. Как было сказано выше, в анализе не рассматривается прибрежная зона. На некорректность определения покрова в этой

области указывают значения коэффициентов корреляции – разброс от 0 до 0.6 свидетельствуют слабой корреляции и отсутствию связи между данными.

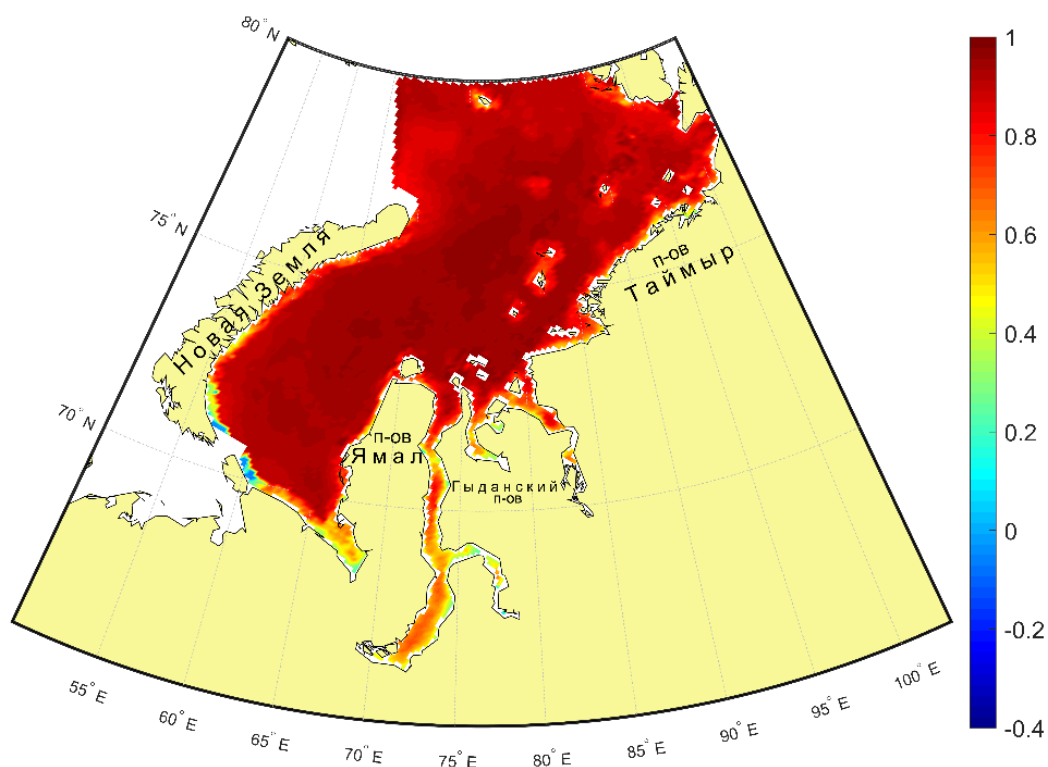


Рис.2 Пространственное распределение значений коэффициента парной корреляции между временными рядами изменения сплоченности по данным SIGRID-3 и OSI SAF

На картах пространственного распределения средней абсолютной (рис. 3) и среднеквадратической ошибок выделяются пространство рядом с мысом Желания и на юго-западной части моря, где отмечаются максимальные отклонения сплоченности по данным SIGRID-3 и OSI SAF. В этих районах в зимние месяцы фиксируется наибольшая изменчивость сплочённости. На большей части акватории Карского моря среднее абсолютное отклонение сплоченности по информации ледовых карт SIGRID-3 и базы данных OSI SAF не превышает 1 балла (рис 3).

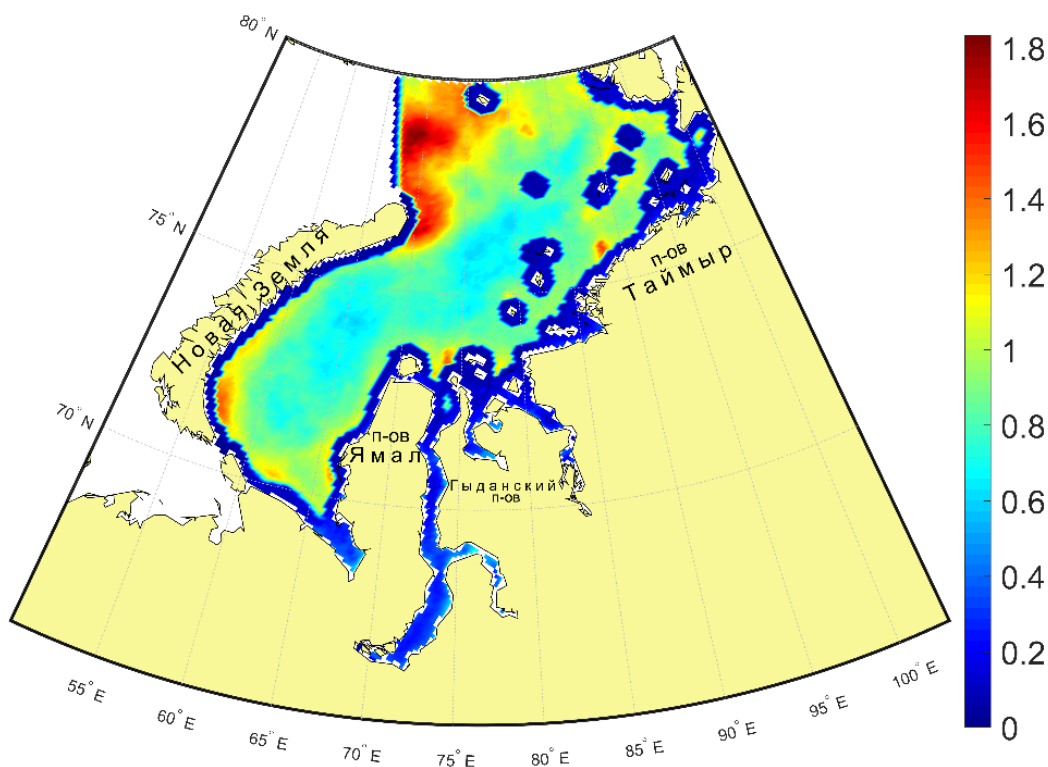


Рис.3 Пространственное распределение значений среднего абсолютного отклонения (MAE) между временными рядами сплоченности, полученными по информации ледовых карт формата SIGRID-3 и базы данных OSI SAF

На рисунке 4 показаны максимальные, минимальные и средние по полю значения коэффициента парной корреляции между временными рядами сплоченности, полученными по информации ледовых карт SIGRID-3 и базы данных OSI SAF. В зимне-весенний период (январь-апрель) отмечаются наименьшие значения корреляции (0,6-0,7) между временными рядами сплоченности ледовых карт SIGRID-3 и базы данных OSI SAF. Здесь же отмечается наибольшее расхождение значений коэффициента корреляции – от 0 до 1. То есть для зимне-весеннего сезона связь между данными формата SIGRID-3 и информации проекта OSI SAF минимальна по сравнению с другими сезонами.

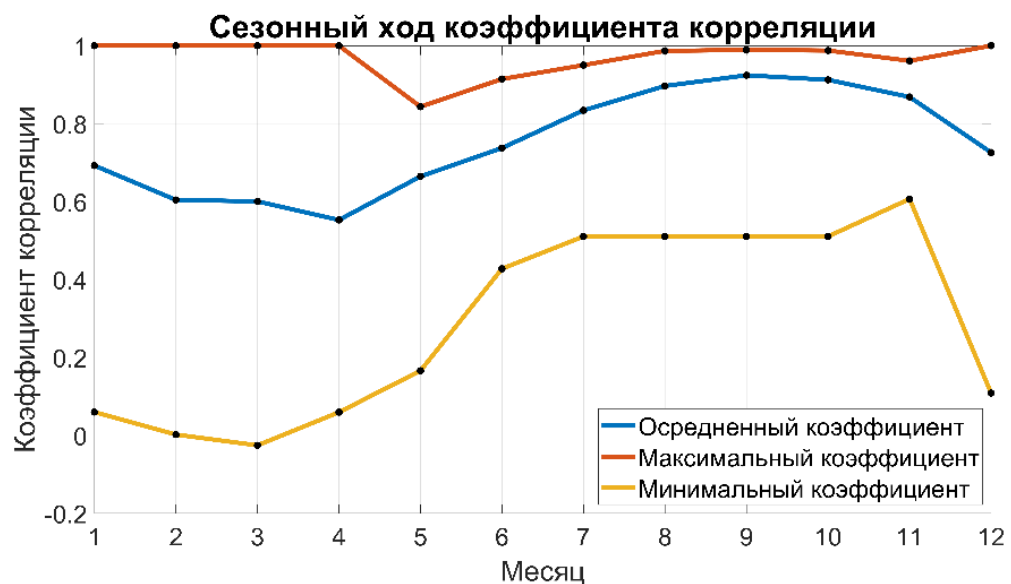


Рис.4 Сезонный ход максимального, минимального и среднего по полю коэффициента корреляции между временными рядами сплоченности, полученными по информации ледовых карт формата SIGRID-3 и базы данных OSI SAF

По графикам ошибок (рис.5,6) видно, что для с января по апрель значения MAE и RMSE являются минимальными. Стоит отметить, что для апреля характерны минимальные значения корреляции и отклонений. Это значит, что значения меняются несинхронно, но степень числовых расхождений является минимальным.

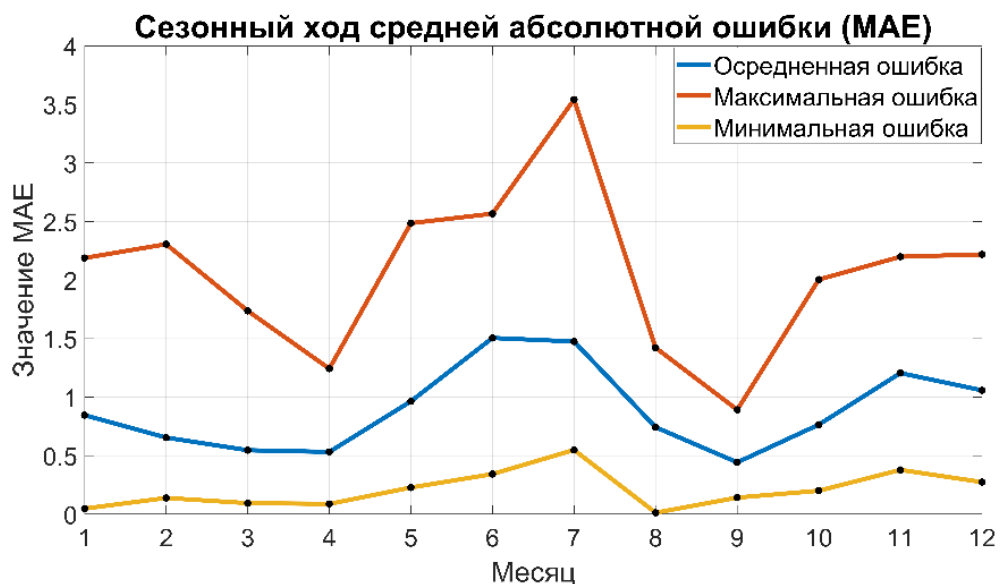


Рис.5 Сезонный ход среднего абсолютного отклонения (MAE) между временными рядами сплоченности, полученными по информации ледовых карт формата SIGRID-3 и базы данных OSI SAF

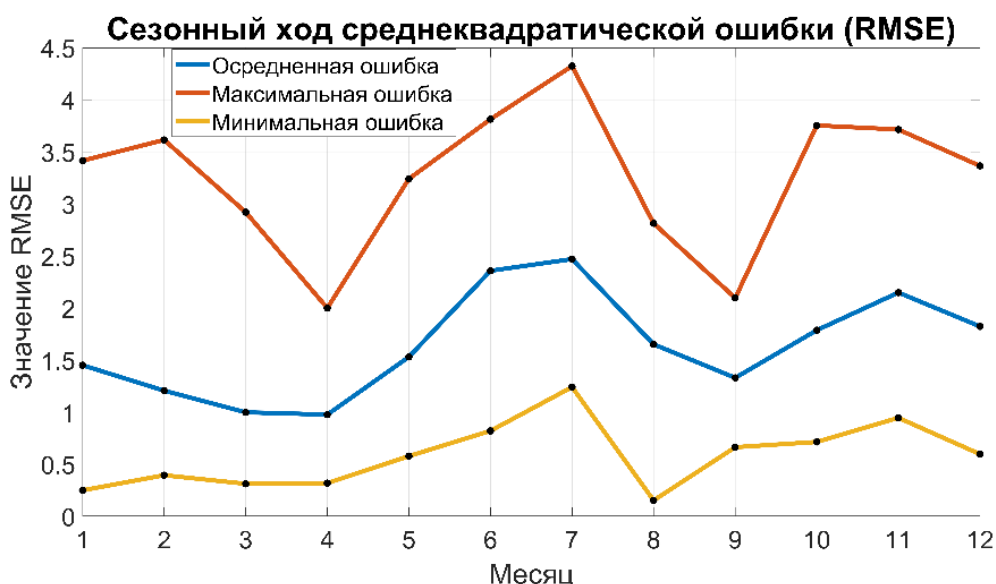


Рис.6 Сезонный ход среднеквадратической ошибки (RMSE) между временными рядами сплоченности, полученными по информации ледовых карт формата SIGRID-3 и базы данных OSI SAF

В июне и июле на графиках MAE и RMSE отмечаются максимальные значения ошибок (1,5 и 2,5 балла соответственно). Средний для Карского моря коэффициент корреляции приблизительно равен 0,8. Значения меняются синхронно, однако расхождения в числовых значениях максимальны. Данный период характеризуется активным таянием льда. Расхождения можно объяснить тем, что редкие флуктуации сплочённости до 1 балла не синхронны в рассматриваемых базах данных.

С августа по октябрь по линии средних по полю значений коэффициента корреляции фиксируется максимальное значение, равное 0,9. По графикам MAE и RMSE видно, что в этот период значения ошибок стремятся к 0. Это значит, что данные за эти месяца лучше соотносятся друг с другом.

Подводя итоги, можно сделать вывод, что наибольшие расхождения в данных характерны для периода с активным разрушением ледяного покрова. Помимо того, что у баз данных сплочённость до 1 балла идентифицируется по-разному, также играет большую роль то, что ледовые карты SIGRID-3 строятся с осреднением за несколько дней, а данные OSI SAF имеют суточную дискретность. Однако ежедневные данные OSI SAF позволяют фиксировать изменчивость состояния ледяного покрова за счет мелких масштабов.

Информация проекта OSI SAF позволяет учесть изменчивость сплоченности ледяного покрова за счет более мелких пространственно-временных масштабов. Поэтому для создания стохастического генератора изменения сплочённости ледяного покрова

лучше использовать данные OSI SAF. Возрастные градации льда, формы льда представлены только в электронных ледовых картах формата SIGRID-3

Таким образом, для корректного воспроизведения изменений сплочённости в стохастическом генераторе ледяного покрова нужно использовать данные проекта OSI SAF, а прочие параметры (толщина, размер льдин) – по ледовым картам формата SIGRID-3.

Глава IV. Режимные характеристики ледяного покрова Карского моря

4.1. Оценка математического ожидания режимных характеристик ледяного покрова

Сплочённость.

В данном разделе описывается сплочённость ледяного покрова по суточным и осредненным за несколько суток данным проекта OSI SAF и по ледовым картам формата SIGRID-3. Осреднение данных необходимо для дальнейшего сравнения информации OSI SAF с ледовыми картами SIGRID-3, так как ледовые карты содержат в себе осредненную информацию за 7 суток, а данные проекта OSI SAF имеют суточную дискретность. Данные OSI SAF создаются на указанные сутки автоматическим алгоритмом, а ледовые карты SIGRID-3 определяются экспертами путем осреднения за последние трое суток данных по спутниковым снимкам. Сравнение суточных и недельных данных позволяет увидеть изменчивость сплочённости за период сутки-неделя в то время, как на недельных картах такая изменчивость учитываться не будет.

Данные SIGRID-3 охватывают всю акваторию, включая прибрежную зону и территорию вокруг островов, а алгоритм записи данных проекта OSI SAF в этих областях не отличает морской лёд и снежный покров на суше. Чтобы получить объективную оценку сплочённости, необходимо наложить «маски» для удаления данных в тех областях, где покров мог быть неправильно идентифицирован. По этой причине вдоль всей береговой линии и территории вокруг островов отсутствуют значения сплочённости льда.

Максимальная сплочённость (10 баллов) наблюдается в северо-восточной части моря. Стоит отметить, что высокие значения отмечаются по всей акватории Карского моря (8-9 баллов) – это показывает, что в зимний период практически вся площадь моря занята сплошным льдом (рис. 7-8).

Минимальные значения отмечаются у пролива Карские Ворота и севернее мыса Желания. Новая Земля служит барьером на пути теплого атлантического воздуха и вод, поэтому Карское море климатически более сурово, чем арктическое Баренцево. В этих районах происходит смешение вод Карского моря с притоком вод из Баренцева моря, который являются более теплым за счёт того, что в Баренцево море поступают тёплые водные массы из Атлантического океана. По этой причине в местах встречи водных масс морей наблюдаются участки с низкой сплочённостью (5-6 баллов). Однако на карте оценки математического ожидания сплочённости по данным SIGRID-3 в юго-западной части моря минимальная сплочённость равна 7-8 баллам (рис.9).

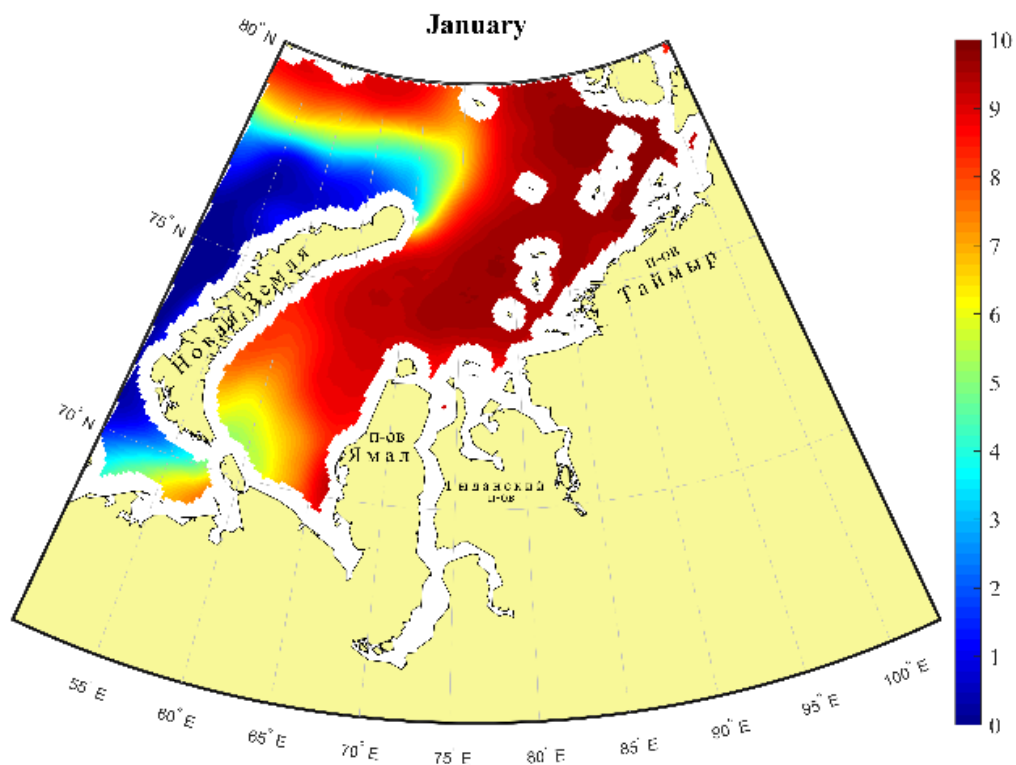


Рис.7 Оценки математического ожидания сплочённости ледяного покрова по ежедневным данным OSI SAF за январь 2006-2016гг (баллы)

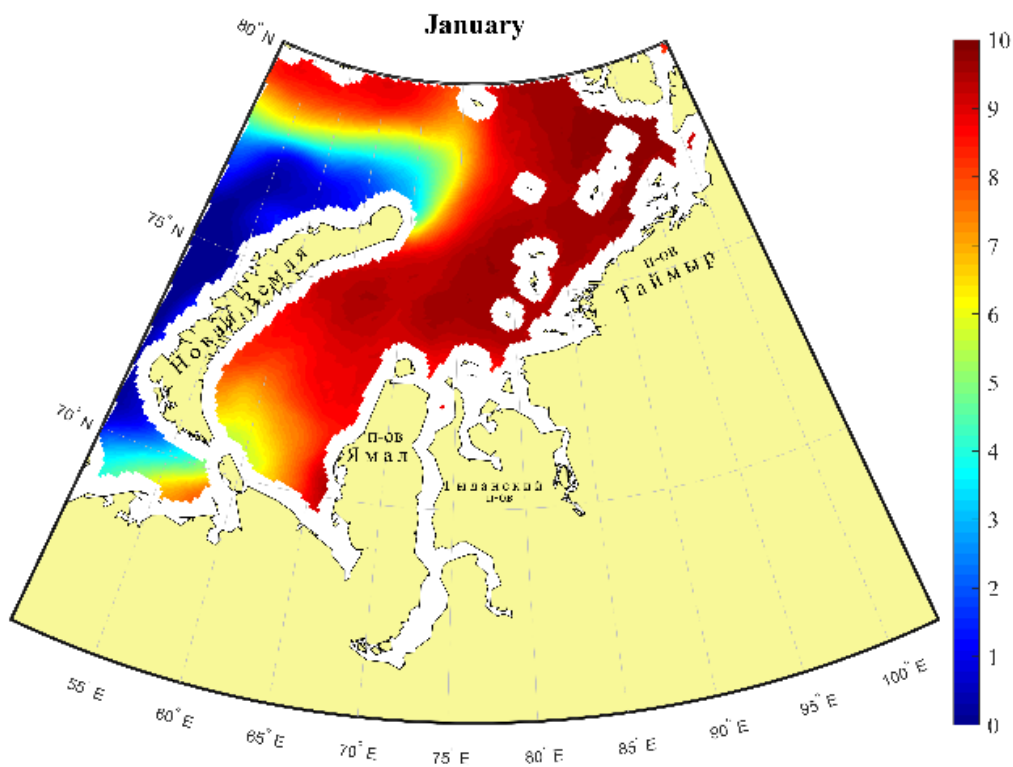


Рис.8 Оценки математического ожидания сплочённости ледяного покрова по недельным данным OSI SAF за январь 2006-2016гг (баллы)

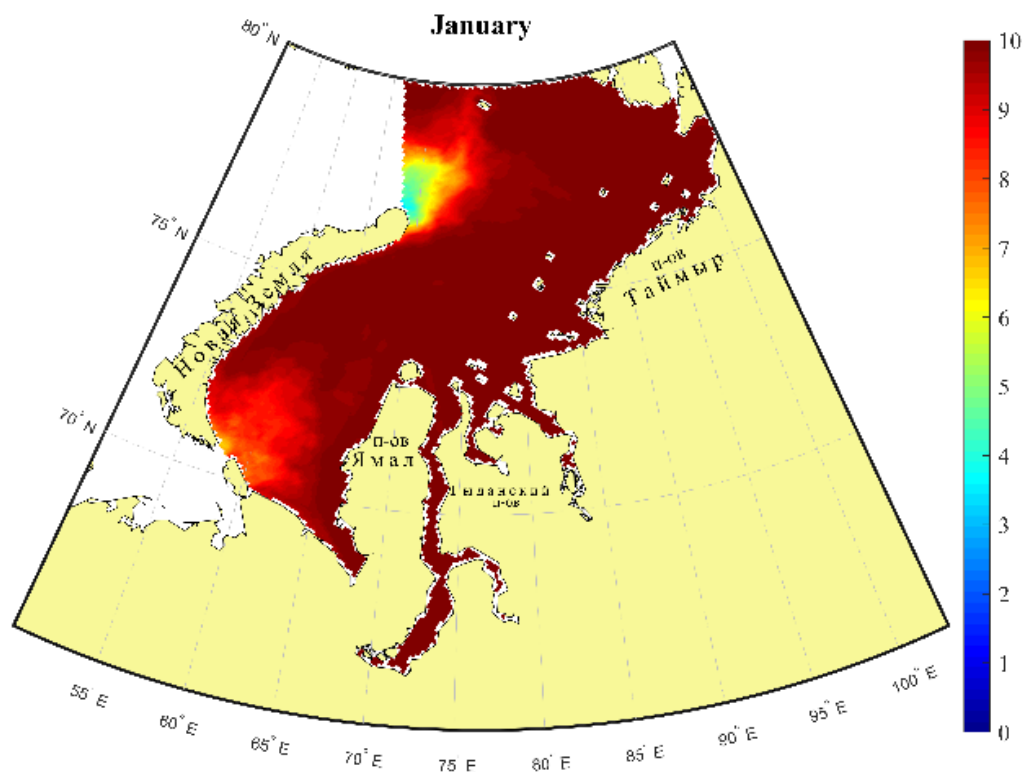


Рис.9 Оценки математического ожидания сплочённости ледяного покрова по данным SIGRID-3 за январь 2006-2016 гг.(баллы)

В мае начинается процесс разрушения ледяного покрова, который, в первую очередь, затрагивает прибрежную зону – математическое ожидание составляет 5-6 баллов (Приложение 1). Так как лёд образуется у берегов в последнюю очередь, толщина льда здесь минимальна (также учитывается образование полыней под действием отжимных ветров). Поэтому в результате повышения среднесуточной температуры лёд исчезнет быстрее, чем в центральной части моря. Также на процесс таяния у берегов влияет теплоотдача от суши. Наибольшие значения сплочённости соответствуют району полярного пака около архипелага Северная Земля и области, которая отождествляется Новоземельским массивом. В этих областях сплочённость оценивается в 9-10 баллов.

По сравнению с данным SIGRID-3, значения сплочённости по данным OSI SAF в некоторых районах меньше на 1-2 балла (Приложение 2). Но общая закономерность сохраняет свои тенденции.

За летние месяцы Карское море постепенно отчищается ото льда в направлении к архипелагу Северная Земля. По данным OSI SAF для июля сплочённость льда в центральной части моря принимает значения в 1-2 балла (Приложение 3), по картам SIGRID-3 – 3-4 балла (Приложение 4). Также отмечается, что на ледовых картах

максимальная сплочённость составляет 10 баллов, когда по информации OSI SAF сплочённость не превышает 6 баллов вблизи архипелага Северная Земля. В данном районе сплочённость максимальна – это связано с распространением многолетнего льда, который подвергается таянию, но незначительно вследствие большой толщины.

Таяние льда продолжается вплоть до октября – Карское море практически целиком отчищается ото льда. В октябре начинается формирование нового ледяного покрова – в первую очередь происходит нарастание новых слоев льда около архипелага Северная Земля (4-5 баллов по данным проекта OSI SAF и 5-7 баллов по ледовым картам формата SIGRID-3). Лёд, не успевший растаять за лето, который не относится к полярному паку, получает новый статус остаточного однолетнего льда. В области «открытых» вод возникают начальные формы льда, которые со временем образуют нилас, а нилас, в свою очередь, формирует молодой лёд, который занимает основную часть акватории. Фиксируются расхождения в 2 балла между значениями SIGRID-3 и OSI SAF (Приложения 5, 6).

Можно сделать общий вывод о том, что процессы формирования и разрушения льда для обоих источников данных имеют одинаковые тенденции, однако сами значения отличаются на 1-2 балла – ледовые условия по ледовым картам формата SIGRID-3 суровее, чем по информации проекта OSI SAF.

Толщина льда.

Согласно выводам из раздела 3.5, оценку толщины ледяного покрова оптимально проводить по данным ледовых карт формата SIGRID-3. В формате SIGRID-3 представлены возрастные градации льда, которые можно связать с диапазоном толщин. Средневзвешенную толщину льда можно оценить, учитывая частные сплоченности льдов различных возрастных градаций.

На представленной карте на рисунке 10 в январе максимальная толщина льда (около 160 см) наблюдается в районе архипелага Северная Земля. В этой области лёд формируется в первую очередь, а за счёт влияния отрицательных температур происходит нарастание новых слоёв льда. Наименьшая толщина льда (около 20-40 см) отмечается в прибрежной зоне и в области поступления водных масс из Баренцева моря. Общая закономерность распределения оценки математического ожидания толщины ледяного покрова: максимальные значения приурочены к северо-восточному району, минимальные – к юго-западному.

Нарастание новых слоев льда продолжается вплоть до середины апреля, за это время толщина льда увеличивается до 200 сантиметров в открытой части моря. В мае

толщина льда начинает уменьшаться под влиянием положительных температур воздуха (рис.11). Как и в случае со сплочённостью, наиболее интенсивные процессы отмечаются у побережий. В результате прогрева земли, происходит таяние снега на суше. Талая снеговая вода способствует увеличению скорости таяния льда у берега, поэтому толщина льда будет быстрее уменьшаться в этой области.

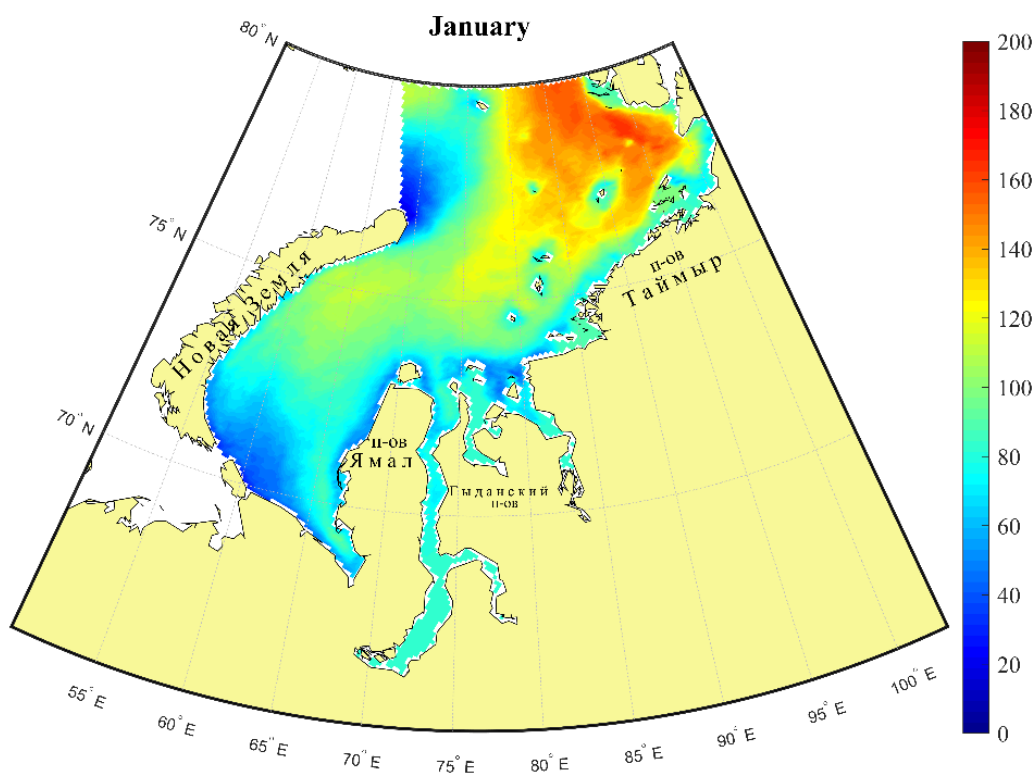


Рис.10 Оценка математического ожидания толщины ледяного покрова за январь 2006-2016 гг. (сантиметры)

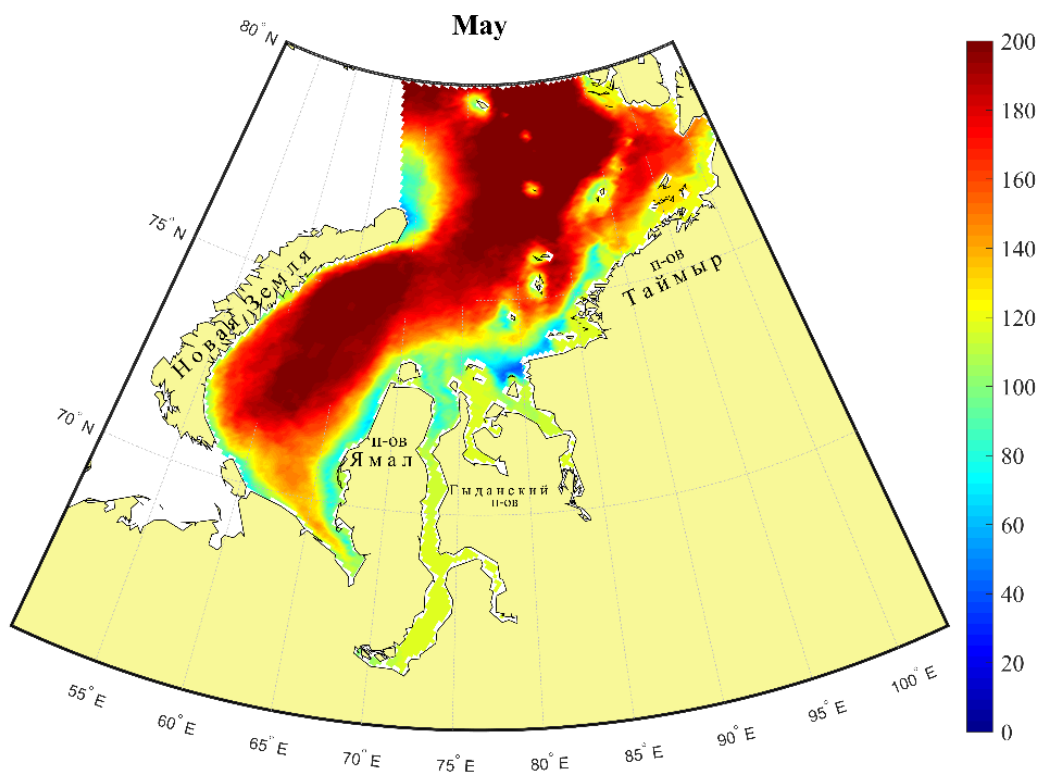


Рис.11 Оценка математического ожидания толщины ледяного покрова за май 2006-2016 гг. (сантиметры)

Летом в результате таяния уменьшается толщина ледового покрова по всей акватории моря. В северо-восточной части моря вблизи архипелага Северная Земля толщина льда не превышает 100-120 см. Полное исчезновение ледяного покрова наблюдается от берегов и до 80 широты, не затрагивая северо-восточную область (рис.12). Также лёд сохраняется в центральной части – в районе Новоземельского массива – 60-80 см.

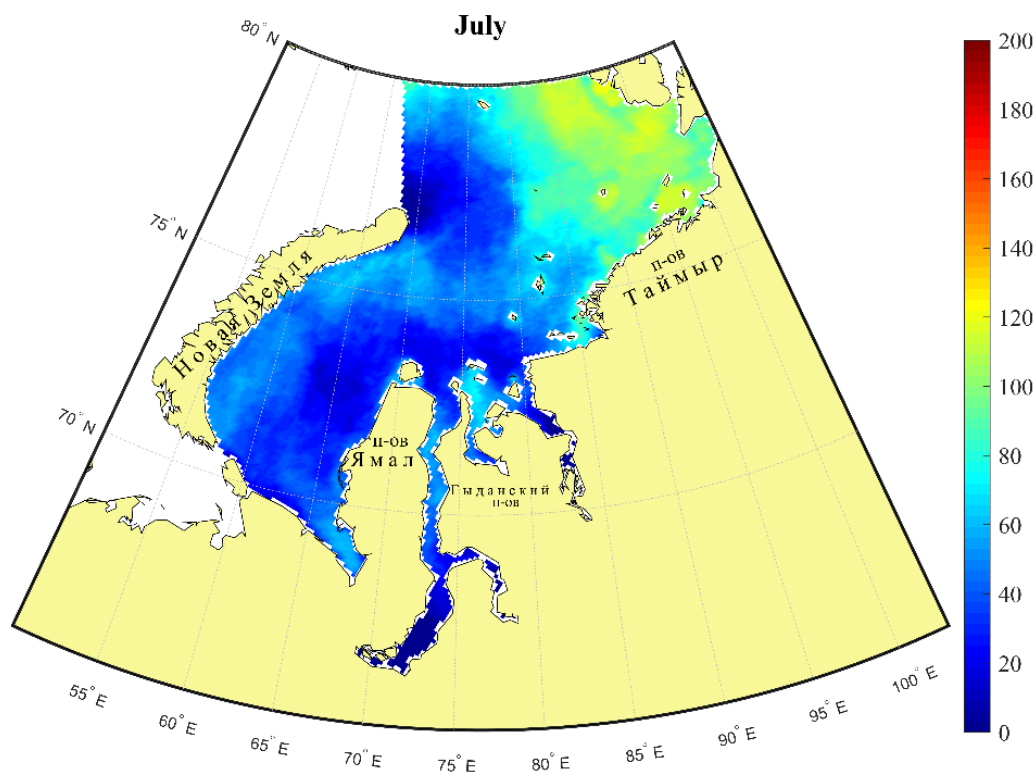


Рис.12 Оценка математического ожидания толщины ледяного покрова за июль 2006-2016 гг. (сантиметры)

Осенью толщина ледяного покрова увеличивается в том же направлении, что и сплочённость – с северо-востока на юго-запад. Остаточный однолетний лёд и полярный пак подвергаются повторному нарастанию льда, за счёт чего происходит увеличение толщины – на карте для октября толщина льда в районе распространения остаточного льда на северо-востоке моря соответствует 60-80 см (рис.13). В областях «чистой» воды происходит образование льда и закрытие водной поверхности.

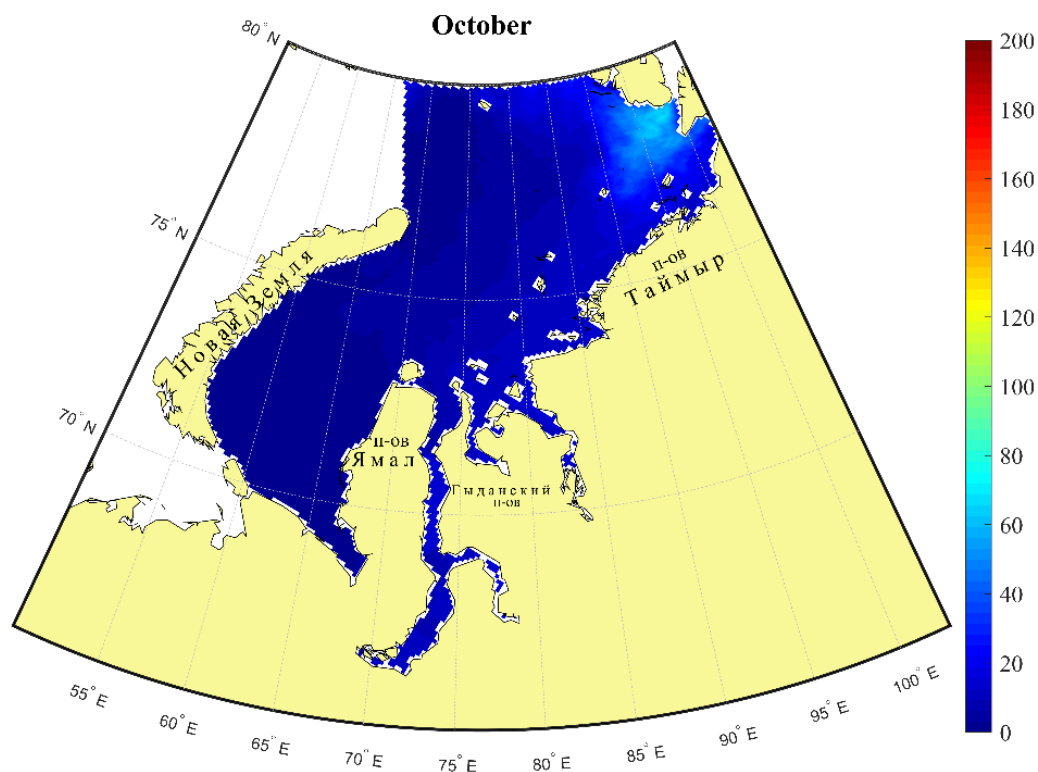


Рис.13 Оценка математического ожидания толщины ледяного покрова за октябрь 2006-2016 гг. (сантиметры)

Характерные размеры ледовых зон.

С помощью ледовых зон выделяются области ледяного покрова, которые имеют одинаковые характеристики – концентрацию, возраст и формы. На ледовых картах все ледовые зоны с одинаковой площадью обозначаются одним цветом. Ледовая информация, включая границы ледовой зоны, определенная экспертами, безусловно, в значительной степени является субъективной. Однако, насколько известно, до сих пор не существует автоматизированного алгоритма выделения ледовой зоны, поэтому на данный момент не существует альтернативы информации о размерах ледовых зон, предоставляемой форматом SIGRID-3.

Размер ледовой зоны – параметр, который может указывать на однородность пространственно-распределенных характеристик ледяного покрова. В частности, предполагается использовать оценки математического ожидания и дисперсии характерных размеров ледовых зон для пространственной фильтрации результатов стохастического моделирования параметров ледяного покрова, полученных для разрозненных ячеек сеточной области.

На рисунках 14-16 представлены среднемесячные значения характерных размеров ледовых зон. Отмечается увеличение площади ледовых зон с удалением от побережья, в юго-западной части Карского моря регистрируется увеличение площади ледовых зон, которое отождествляется с расположенным здесь Новоземельским ледяным массивом. Характерные размеры ледовых зон в этой области соответствуют 160-180 км в декабре, в январе-феврале происходит уменьшение характерных размеров до 140-160 км в центральной части. Выделяется участок, южнее архипелага Северная Земля, а также береговая линия вдоль полуострова Таймыр – здесь в течение всей зимы наблюдаются наименьшие характерные размеры ледовых зон – около 40 км.

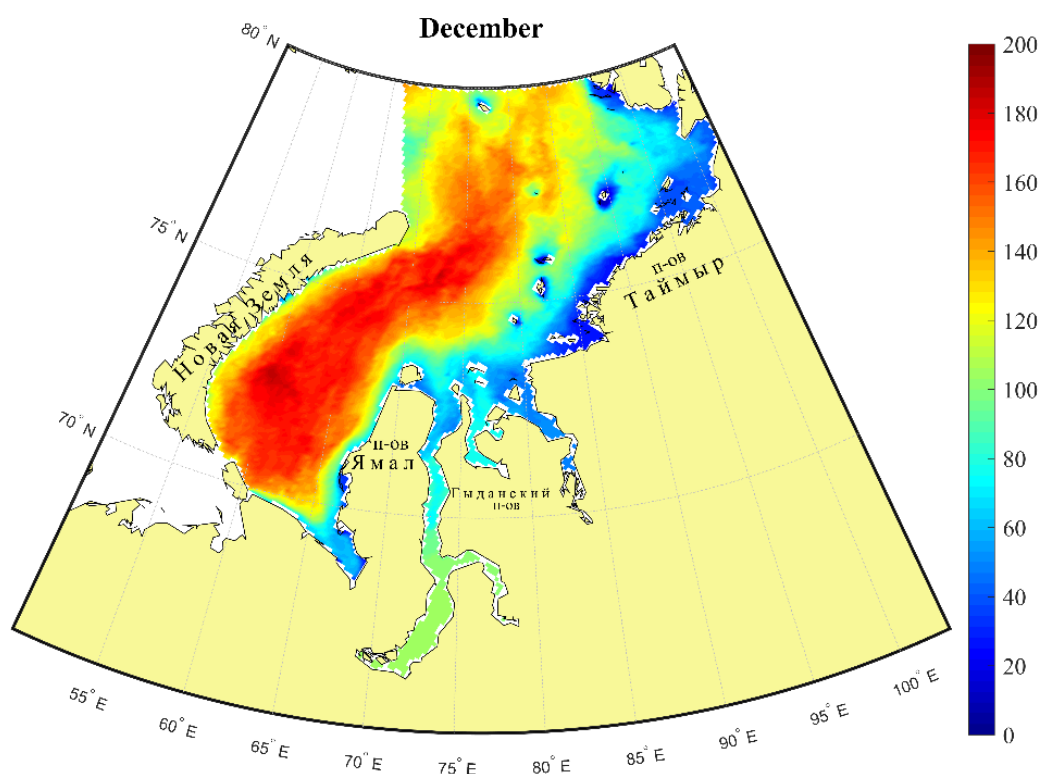


Рис.14 Оценки математического ожидания характерных размеров ледовых зон за декабрь 2006-2016 гг. (км)

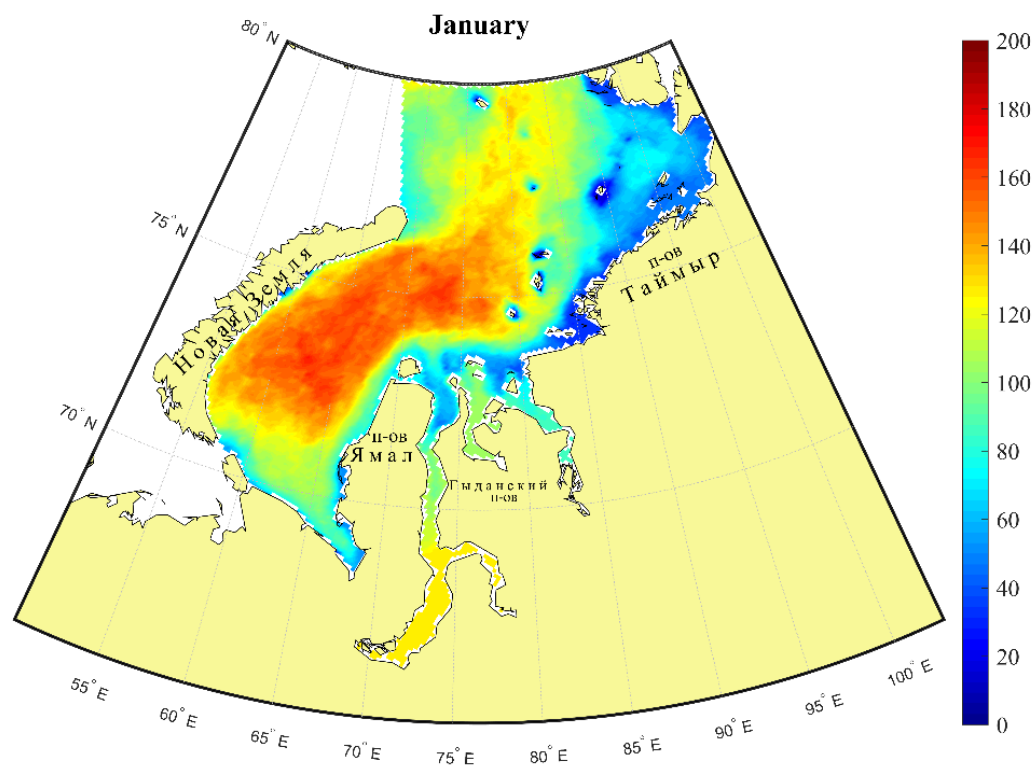


Рис.15 Оценки математического ожидания характерных размеров ледовых зон за январь 2006-2016 гг. (км)

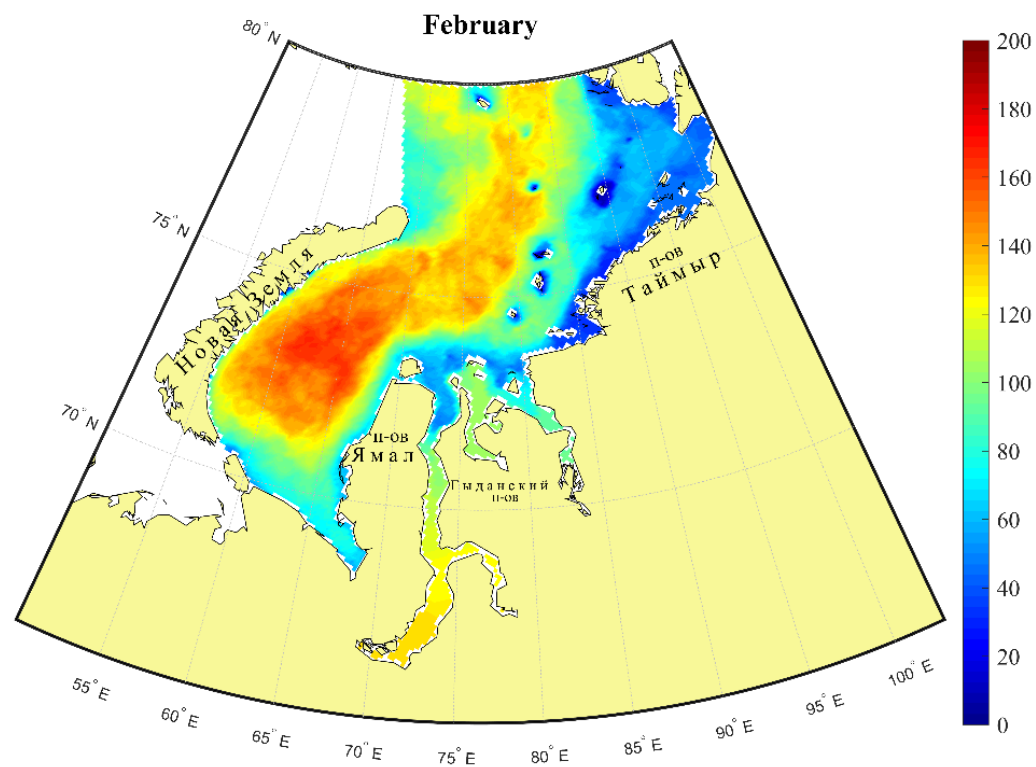


Рис.16 Оценки математического ожидания характерных размеров ледовых зон за февраль 2006-2016 гг. (км)

4.2. Оценка изменчивости характеристик ледяного покрова

Сплочённость.

На картах оценки среднеквадратического отклонения значений сплочённости за январь по данным проекта OSI SAF ярко выражены районы наибольшей изменчивости (3,5-4 балла). Это связано с теплообменом с Баренцевым морем, которое получает тепло из Атлантики (рис.17-18). На карте SIGRID-3 этот процесс выражен сильнее – до 4,5 баллов (рис.19).

Для восточной части акватории моря характерно полное отсутствие отклонений от среднемесячных значений – это говорит о том, что ледяной покров в этой области статичен, лёд непрерывен и однороден.

Географическое положение – это один из факторов, который определяет интенсивность разрушения льда. В весенний период процесс таяния льда интенсивнее протекает в береговой зоне-на это оказывает влияние теплоотдача от суши и минимальная толщина ледяного покрова. Карты среднеквадратического отклонения подтверждают очередность таяния льда – максимальные значения приурочены в береговой зоне – в этой области значение среднеквадратического отклонения достигает 3 балла по данным проекта OSI SAF и 4-4,5 балла по данным ледовых карты формата SIGRID-3 (Приложения 7,8). В центральной части акватории и на северо-востоке минимальные значения соответствуют 1 баллу по данным OSI SAF и 0,5 по данным формата SIGRID-3.

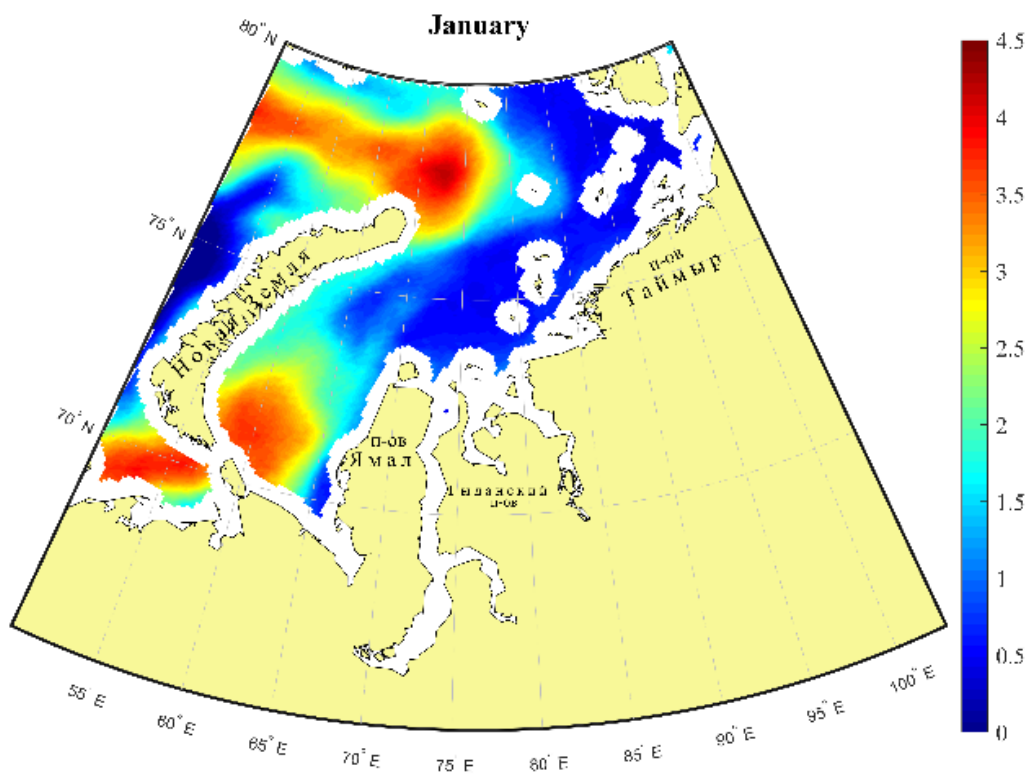


Рис.17 Оценка среднеквадратического отклонения сплошности ледяного покрова по ежедневным данным OSI SAF за январь 2006-2016гг (баллы)

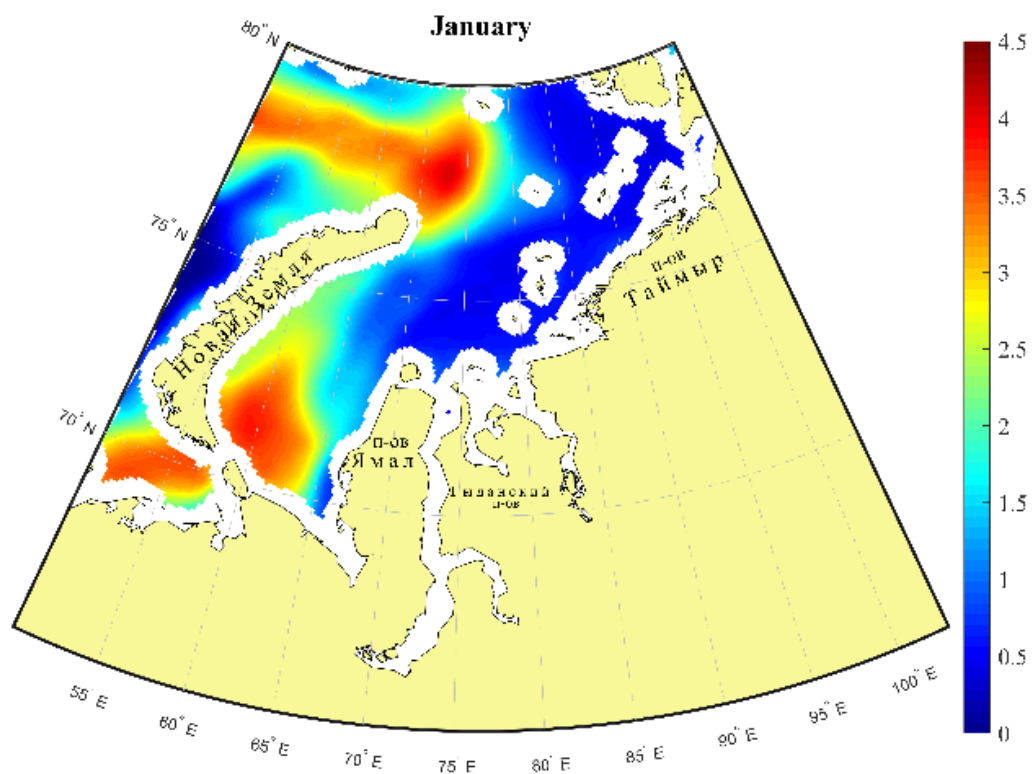


Рис.18 Оценка среднеквадратического отклонения сплошности ледяного покрова по ежедневным(сверху) и недельным(снизу) данным OSI SAF за январь 2006-2016гг (баллы)

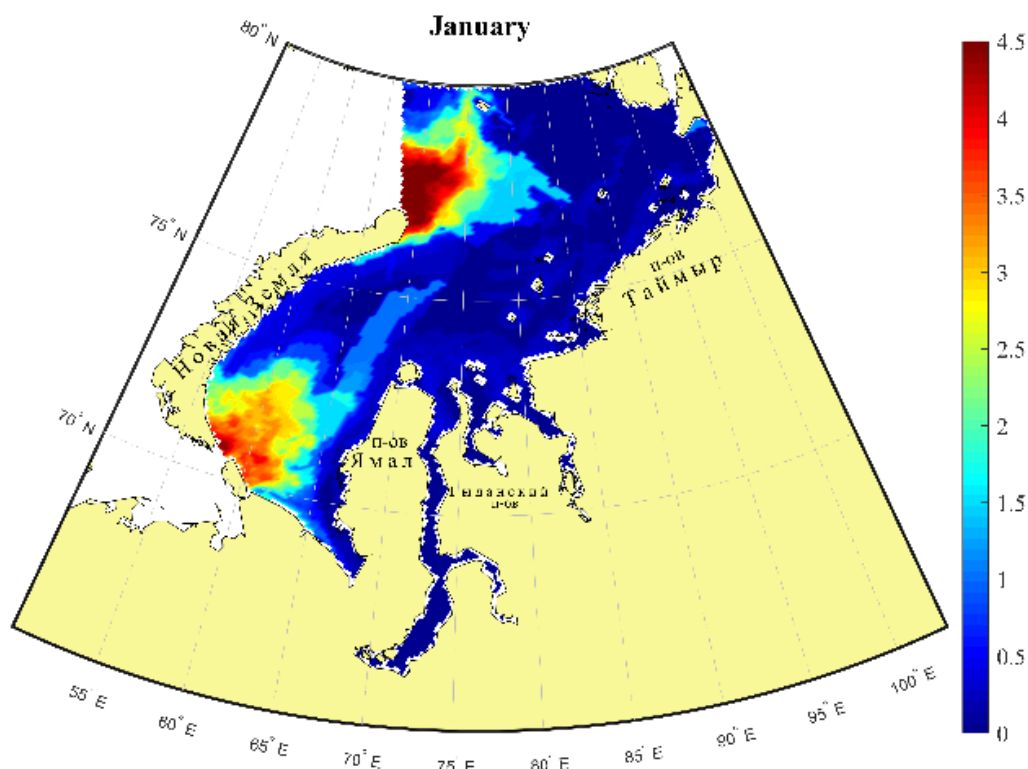


Рис.19 Оценка среднеквадратического отклонения сплошности ледяного покрова по данным SIGRID-3 за январь 2006-2016 гг. (баллы)

В июле отмечаются интенсивные процессы рядом с архипелагом Северная Земля, а также разброс значений в 2,5-3 балла (Приложение 9) вдоль острова Новая Земля. Данная территория отождествляется с расположенным здесь Новоземельским ледяным массивом. Разброс значений до 4,5 баллов наблюдаются по картам SIGRID-3 (Приложение 10) также для Новоземельского массива и области Северной Земли.

После полного очищения ото льда вплоть до архипелага Северная Земля, в октябре начинается процесс формирования ледяного покрова в юго-западном направлении. Области максимальной интенсивности формирования льда по картам SIGRID-3 и данным OSI SAF совпадают, однако имеются расхождения в 1 балл (Приложения 11,12). По картам распределения среднеквадратического отклонения значений сплошности ледяного покрова за октябрь видно, что в последнюю очередь лёд в Карском море начинает формироваться в юго-западной части.

Толщина льда.

Значения среднеквадратического отклонения в области рядом с мысом Желания объясняются взаимодействием вод Карского моря с Баренцевым, водные массы которого теплее относительно водных масс Карского моря. Значения СКО в этом районе соответствуют 60-70 см (рис.21). Также отмечаются территории вблизи о. Новая Земля и южнее архипелага Северная Земля – значения СКО толщины льда составляют 40-50 см. Для центральной части моря значения СКО толщины ледяного покрова соответствуют 30 см.

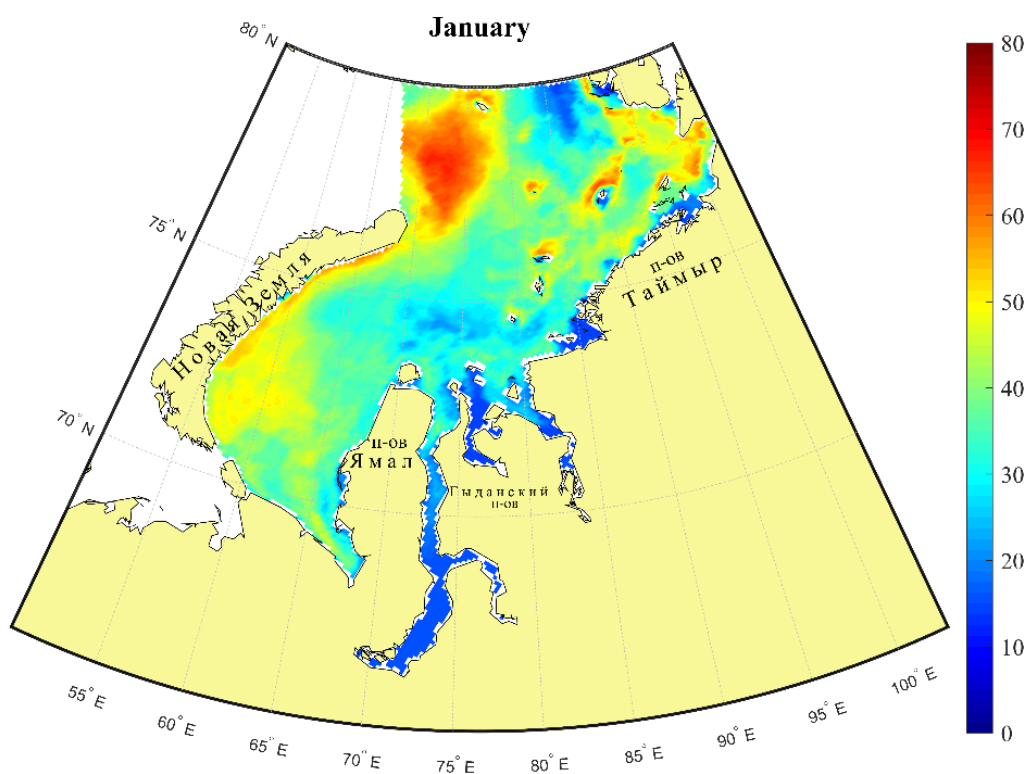


Рис.20 Оценка среднеквадратического отклонения толщины ледяного покрова за январь 2006-2016 гг. (сантиметры)

В связи с тем, что ледовые карты в формате SIGRID-3 составляются экспертами путем анализа спутниковых снимков, то процессы, которые протекают у побережья и вблизи островов, обладают бóльшей достоверностью, по сравнению с данными проекта OSI SAF. Поэтому оценка тенденций во взморье по данным SIGRID-3 является надежной. В мае начинаются интенсивные процессы разрушения льда, которые раньше всего затрагивают прибрежную зону (рис.21). Значения СКО толщины у берега достигают 80 см, в открытой части моря- около 30 см. Температура воздуха над удаленной от берега частью моря намного ниже, невозможен теплообмен с сушей, поэтому в открытом море

формируются ледяные массивы, которые обладают максимальной толщиной на протяжении всего периода ледообразования и разрушения ледяного покрова. На рисунке 21 такие области соответствуют Новоземельскому массиву и полярному паку.

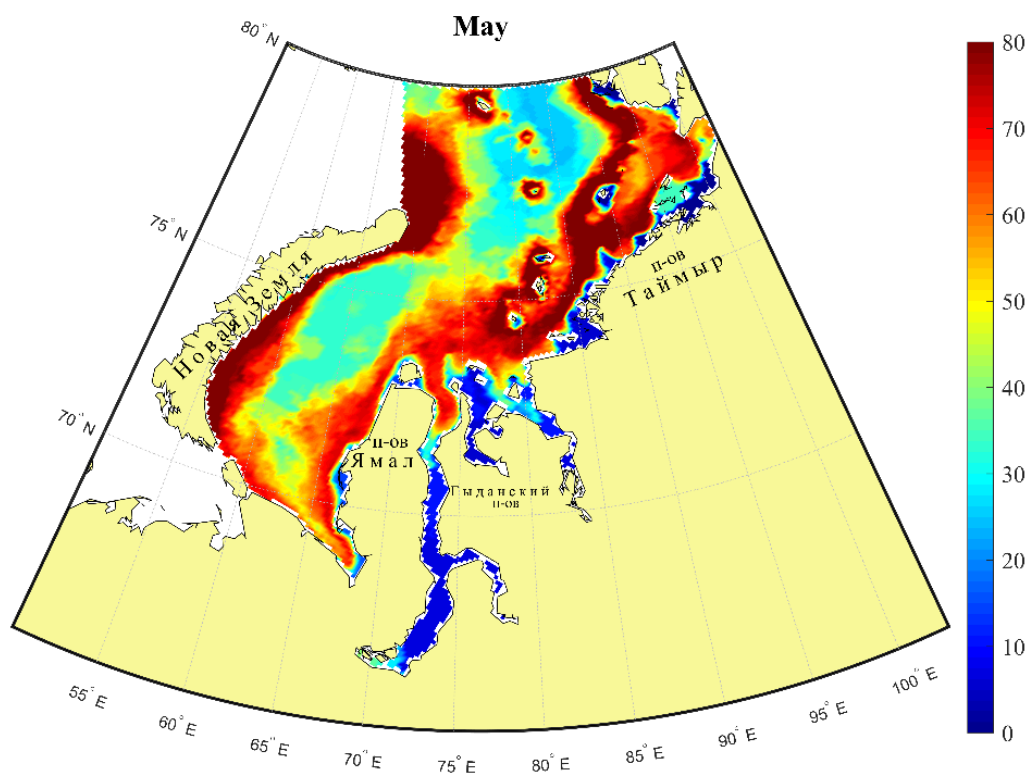


Рис.21 Оценка среднеквадратического отклонения толщины ледяного покрова за май 2006-2016 гг. (сантиметры)

Повсеместное изменение толщины в июле характеризует колебания среднего квадратичного отклонения: 40 см около полуострова Ямал и 70 см для открытой части моря и побережья. Можно отметить, что несмотря на то, что ледяной покров на всей акватории Карского моря имеет различную толщину в разных областях (максимальная на северо-востоке и минимальная на юго-западе), значения среднеквадратического отклонения имеют одинаковый порядок – около 50-60 см. Такая картина оценки среднеквадратического отклонения сохраняется до августа вплоть до полного очищения акватории моря ото льда.

При анализе среднего квадратичного отклонения толщины в осенний период можно отметить, что наиболее интенсивные процессы нарастания льда протекают на северо-востоке моря около архипелага Северная Земля (60 см) (рис.22). Наименьшие значения отклонения от математического ожидания соответствуют области «чистой воды» на юго-западе, где формирование ледяного покрова начинается в последнюю очередь.

В заключении данного раздела можно отметить, что сплочённость и толщина ледяного покрова Карского моря тесно связаны друг с другом – ход нарастания и уменьшения толщины льда соответствует тенденциям распространения значений сплочённости ледяного покрова. Синхронность наблюдается в течение всех сезонов, характер и направление изменения значений математического ожидания и среднеквадратической ошибки имеют один ход.

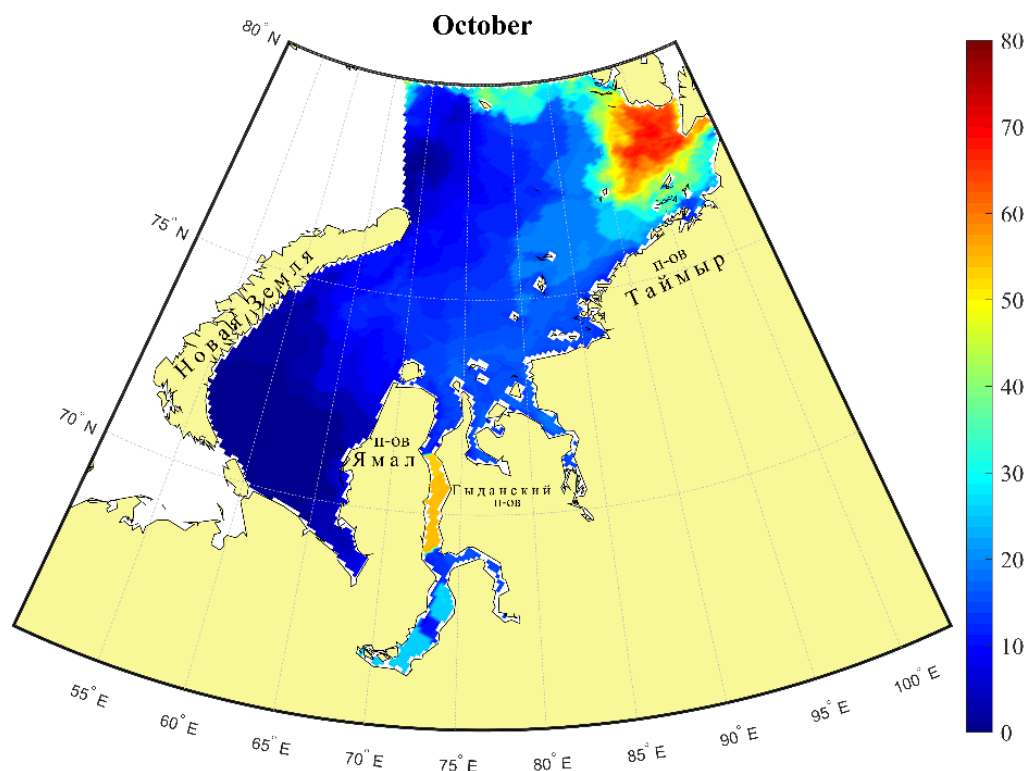


Рис.22 Оценка среднеквадратического отклонения толщины ледяного покрова за октябрь 2006-2016 гг. (сантиметры)

4.3 Пространственно-временная связанность сплочённости

Как альтернатива статистическим параметрам размеров ледовых зон, для оценки связанности ледяного покрова по пространству и времени по данным проекта OSI SAF для каждого месяца определены интервал и радиус корреляции (рис. 23). Радиус корреляции показывает пространственные масштабы области, где параметры синхронно меняются во времени. Интервал корреляции показывает, на каком отрезке времени сохраняется временная взаимосвязь протекающего процесса.

Используется следующий метод оценки радиуса корреляции. В каждой ячейке сеточной области проводился расчет коэффициента корреляции между временным рядом сплочённости в этой ячейке с рядами в ячейках, отстоящих от рассматриваемой ячейки на

расстояние l . Количество рядов (количество ячеек), с которыми сравнивается ряд в центральной ячейке, увеличивается с увеличением l . При достижении минимального значения из набора коэффициентов корреляции равной ε , значение l записывалось в матрицу значений радиуса корреляции. Интервал корреляции определялся как сдвиг во времени, при котором нормированная автокорреляционная функция пересекает значение ε . Для радиуса и интервала корреляции мы приняли $\varepsilon = 0,5$.

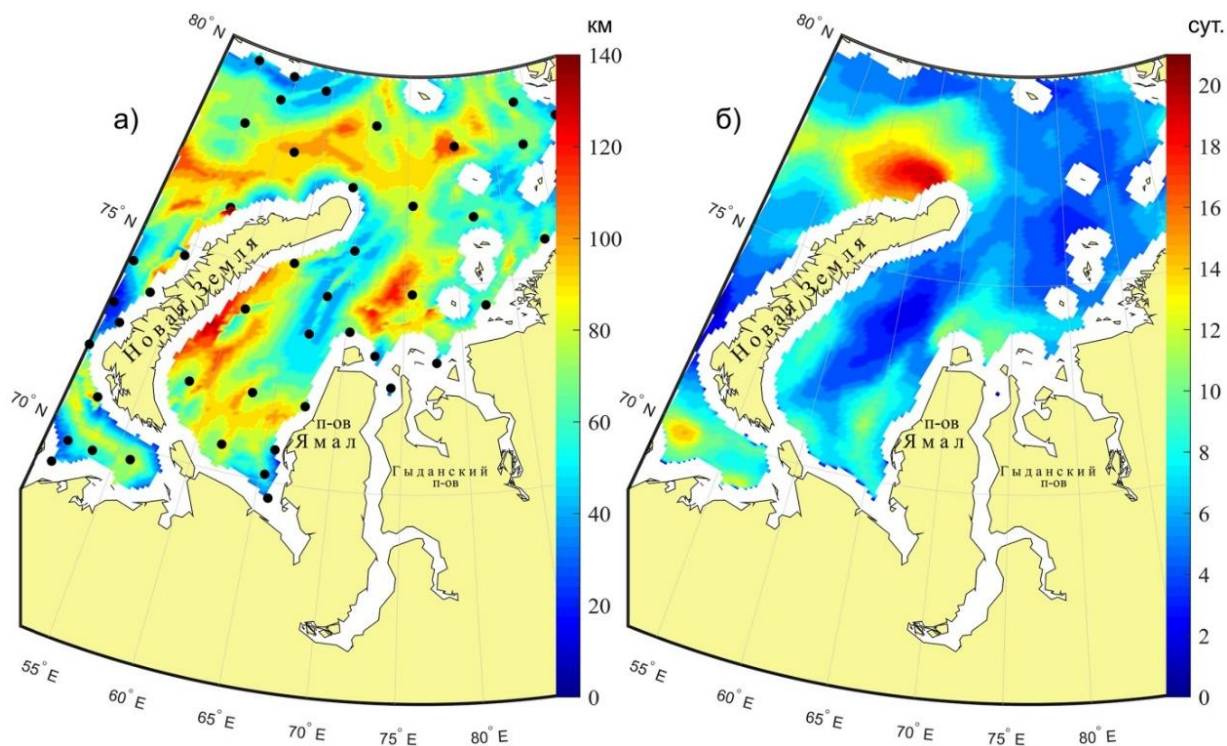


Рис.23 Параметры пространственно-временной инертности изменения сплочённости в Карском море для мая по данным проекта OSI SAF: а) радиус корреляции (км), б) интервал корреляции (сутки), точками показаны узлы нерегулярной сетки, созданной по значениям радиуса корреляции.

Как видно из рисунка 23а корреляция между ячейками прослеживается на расстоянии до 140 км (или 14 ячеек сеточной области). Можно отметить, что в центральных районах акватории, удаленных от береговой линии, радиус корреляции имеет большее значение. Это можно объяснить тем, что в прибрежной части происходит динамика кромки льда (образование и закрытие полыней) и сильная изменчивость сплочённости. Интервал корреляции можно интерпретировать как параметр, оценивающий временную инерцию или изменчивость рядов сплочённости. Как видно из рисунка 23б, нормированная автокорреляционная функция достигает значения 0,5, на большей части рассматриваемой акватории на сдвигах менее чем 2 недели.

Глава V. Стохастическое моделирование ледяного покрова

5.1. Понятие «стохастический генератор ледяного покрова»

Как уже было сказано выше, термин «генератор погоды» был применен К. Ричардсоном к разработанной им стохастической модели WGEN (Weather Generator), которая описывает совместный временной ход нескольких среднесуточных метеорологических величин (Richardson, 1981). Термин «генератор погоды» стал нарицательным, он используется для обозначения стохастических моделей, основанных на методе Монте-Карло. Такие модели позволяют получать многолетние искусственные ряды метеорологических параметров с суточной дискретностью, статистические характеристики которых близки к характеристикам фактических значений (Гельфан, 2014).

Генератор погоды NEWGEN (Nested Weather Generator), созданный А. Гельфаном, в своей структуре содержит систему «вложенных генераторов», которые описывают последовательности метеорологических переменных с временным осреднением за год «Y», месяц «M» и сутки «D». Отличительная черта нового генератора – процесс дезагрегации параметров, т.е. переход от независимо определяемых параметров генератора погоды «Y» к параметрам генератора «M», а от них к параметрам генератора «D» с включением сезонной изменчивости. Данная структура позволяет учесть низкочастотные (сезонную и межгодовую) составляющие изменчивости метеорологических параметров (Dubrovský, et all, 2004).

По принципу ранее созданных вероятностных моделей, разработанный комплекс процедур, воспроизводящих искусственные параметры льда, мы можем назвать «генератором ледяного покрова» (Май, 2018; Молодыхина, 2019).

Основное требование, предъявляемое к результатам стохастического моделирования, – совпадение статистических параметров результатов моделирования и наблюдений за природной обстановкой. Соответствие реальной картине возможно достичь путем включения в моделирование, помимо исходных данных о режимных характеристиках льда, также и климатические параметры, сезонную и межгодовую изменчивость.

5.2 Схемы стохастического моделирования изменения сплочённости

5.2.1. Схема Бернулли

Схемой Бернулли называется последовательность независимых испытаний, при этом, результат на новом шаге не зависит от результата на предыдущем шаге.

На первом этапе в каждой ячейке сеточной области по данным проекта OSI SAF были оценены математическое ожидание, дисперсия, функции распределения вероятностей, автокорреляционные функции временных рядов изменения сплочённости. для всех точек сеточной области базы данных OSI SAF. При этом для учета сезонного хода параметров льда, временные ряды были разбиты по месяцам. На основе этих данных можно воспроизводить изменение сплочённости: генератором случайных чисел для каждой ячейке и каждого момента времени задается случайная вероятность, по которой, используя функции распределения вероятностей, определяется квантиль – значение сплочённости. Такие значения не связаны ни по пространству, ни по времени – новые значения сплочённости не зависят от предыдущих.

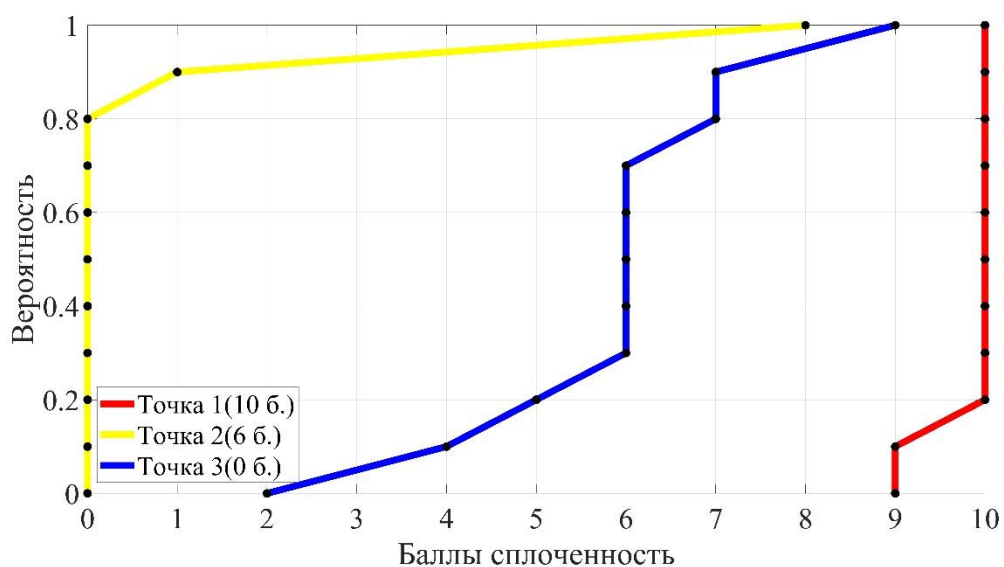


Рис.24 Пример функции распределения вероятностей: эмпирические функции распределения вероятностей для трех точек с разной средней сплочённостью

На рисунке 24 показаны функции распределения вероятностей для трех точек с разной средней сплочённостью: точка 1 соответствует максимальной средней сплочённости – 10 баллов, точка 2 – средней сплочённости 6 баллов, точка 3 – средней сплочённости близкой к «чистой воде» – 0 баллов. Выбранные точки показаны на рисунке 25.

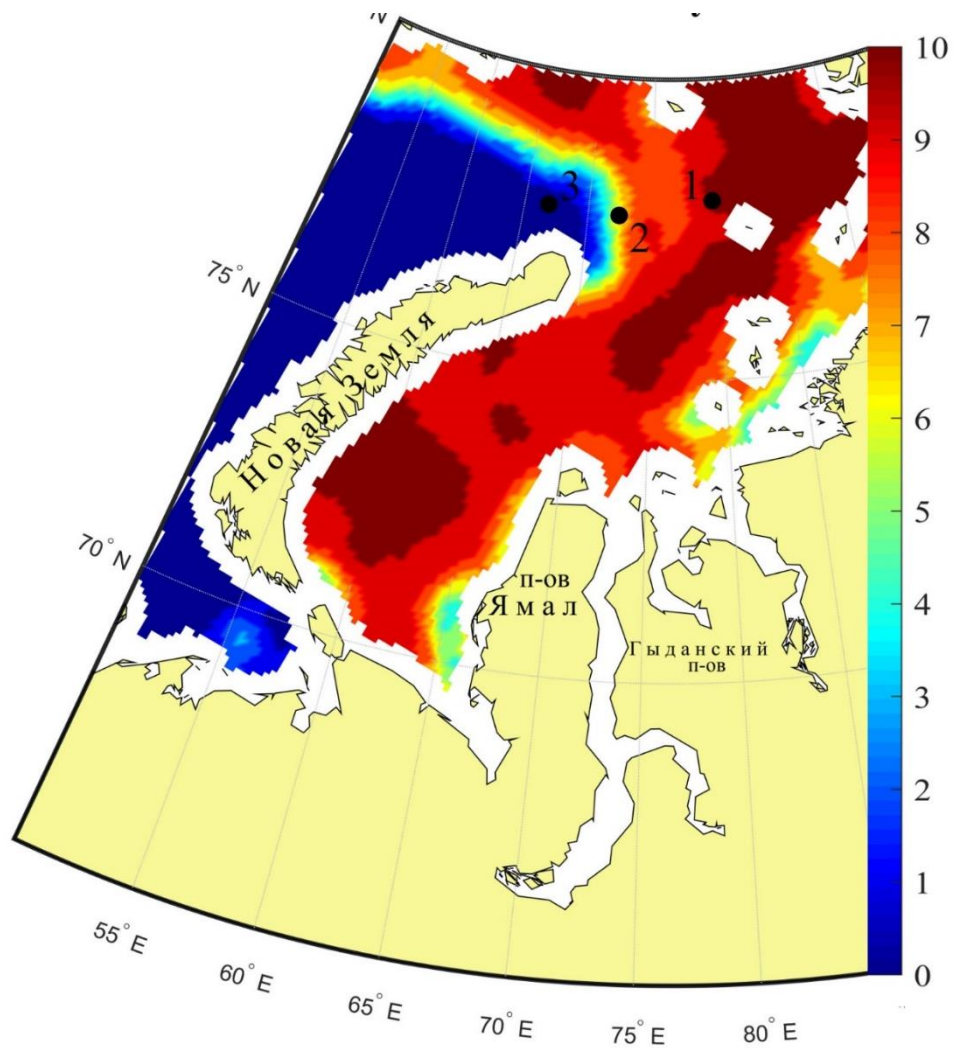


Рис.25 Средняя сплочённость ледяного покрова (баллы) по данным проекта OSI SAF за май 2006-2016 гг.

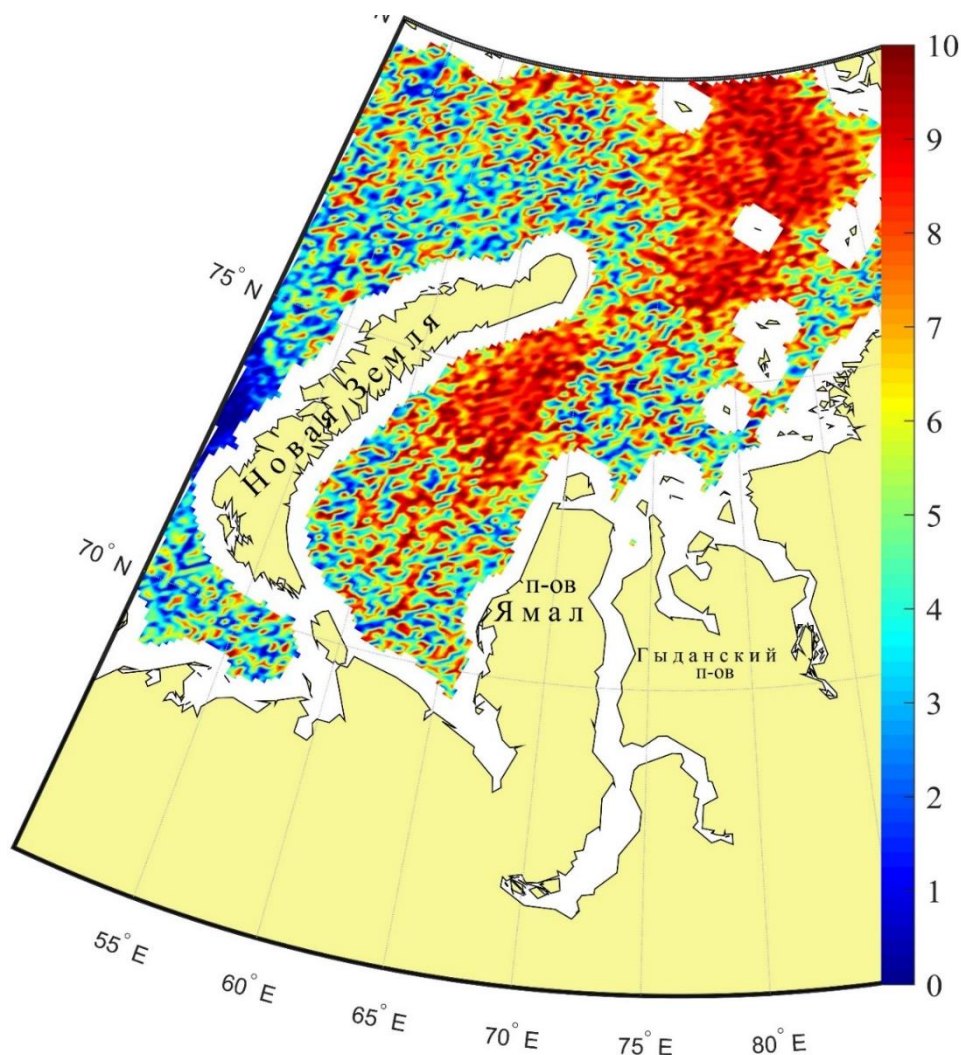


Рис.26 Пример мгновенного поля сплочённости (баллы) для мая, воспроизведённое методом Монте-Карло по схеме Бернулли за май 2006-2016 гг.

Вероятностные характеристики – математическое ожидание (рис. 27) и среднеквадратическое отклонение (рис. 28) результатов стохастического генератора по схеме Бернулли недостаточно хорошо согласуются с аналогичными параметрами исходных данных проекта OSI SAF (рис. 25). Так как ледяному покрову свойственна еще пространственно-временная связанность, то, следует признать, что схема Бернулли некорректно воспроизводит эволюцию сплочённости ледяного покрова (Приложение 13). Необходимо применить алгоритмы, которые соответствовали бы основному требованию к генератору – воспроизведение режимных характеристик ледяного покрова в соответствии с реальной картиной.

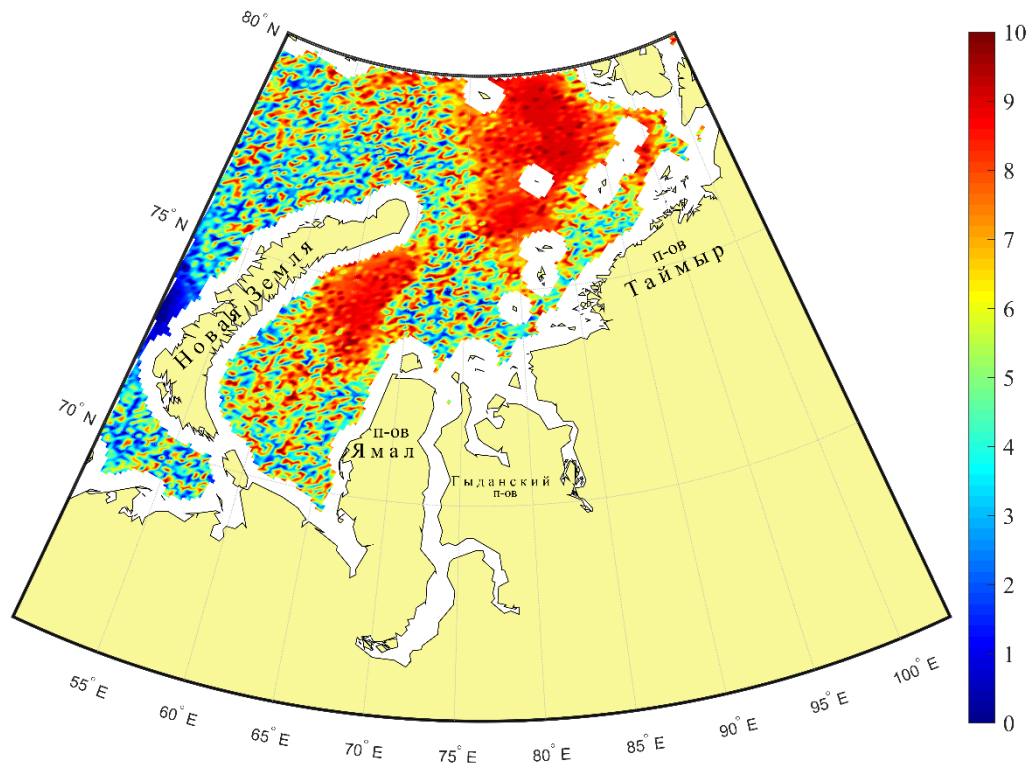


Рис.27 Пространственное распределение оценки математического ожидания для смоделированных полей методом Монте-Карло по схеме Бернулли за май 2006-2016 гг.

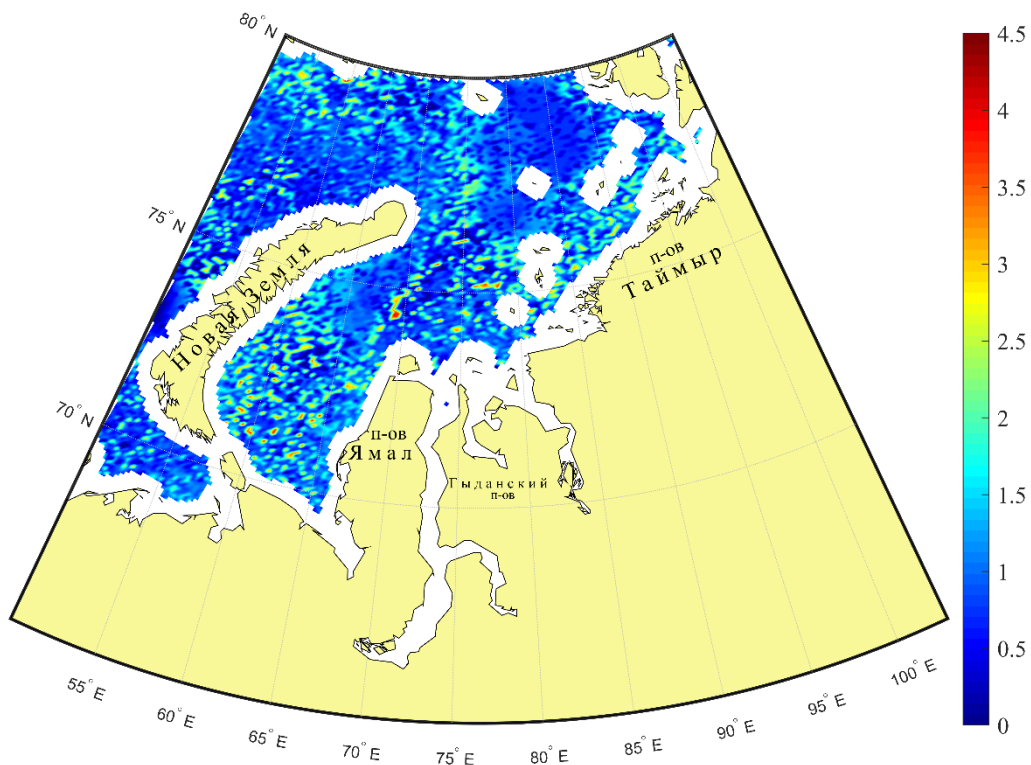


Рис.28 Пространственное распределение оценки среднеквадратического отклонения для смоделированных полей методом Монте-Карло по схеме Бернулли за май 2006-2016 гг.

5.2.2. Цепи Маркова

Цепь Маркова — это последовательность случайных событий с исходом, где вероятность наступления каждого события зависит от состояния, достигнутого на предыдущем шаге. Временную связанность при моделировании ледяного покрова может обеспечить применение цепей Маркова, которые позволят учесть вероятности перехода между различными состояниями во времени (рис. 30). Для каждой ячейки сетки рассчитывались матрицы переходных вероятностей (рис. 29). Каждую строку такой матрицы можно представить в виде функции распределения условных вероятностей.

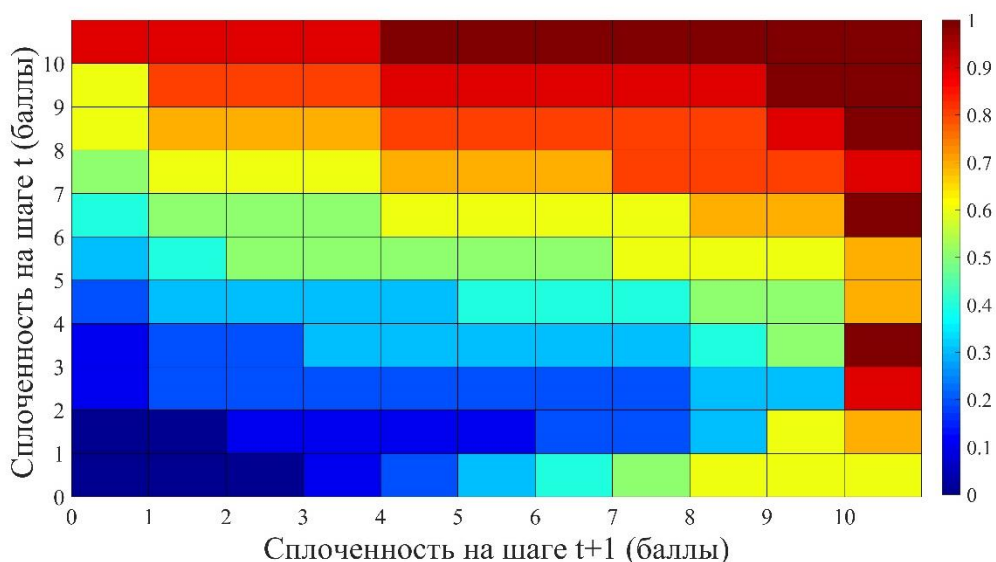


Рис.29 Графическое представление матрицы переходных вероятностей изменения сплочённости

Стохастическое моделирование с помощью цепей Маркова выполняется путем повторения следующих шагов:

- 1) по значению начальной сплочённости выбирается строка матрицы переходных вероятностей;
- 2) выбранная строка матрицы переходных вероятностей трансформируется в функцию распределения условных вероятностей;
- 3) генератором случайных чисел определяется значение вероятности;
- 4) по функции распределения условной вероятности определяется квантиль, который представляет собой сплочённость на следующий временной шаг.

Далее шаги 1-4 повторяются заданное количество раз.

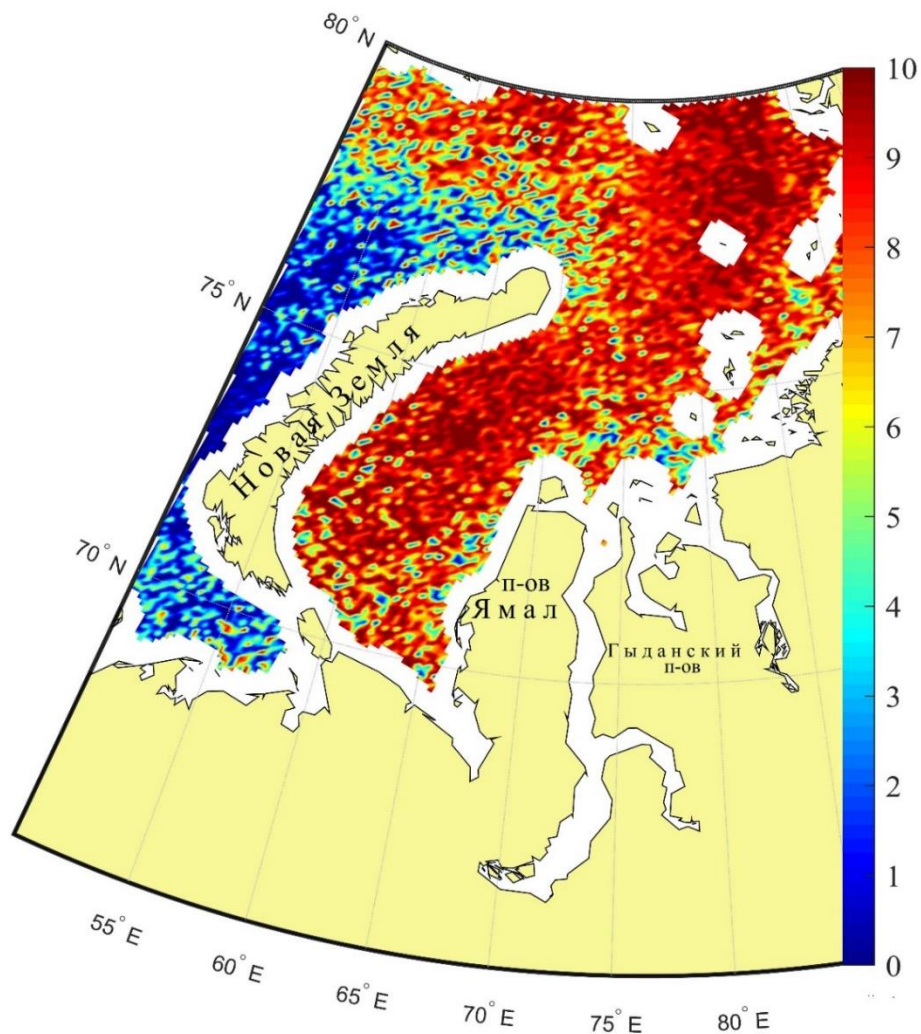


Рис.30 Пример смоделированных полей сплочённости методом Монте-Карло по цепям Маркова для мая: моделируемые значения связаны только по времени

5.2.3. Стохастический генератор, основанный на цепях Маркова с пространственно-связанным полем случайной вероятности

Описанный алгоритм в разделе 5.2.2 связывает значения только по времени. Для обеспечения связанности значений, как по времени, так и по пространству используется следующий подход. Реализуется тот же алгоритм из 4 действий, только в пункте 3 вместо генератора случайных чисел, в каждой ячейке сетки задается пространственно-связанное поле вероятностей. Это поле вероятностей находится следующим образом. Создается нерегулярная сетка, узлы которой, располагаются в пространстве в зависимости от значений радиуса корреляции (рис 23а). В узлах нерегулярной сетки генератором случайных чисел на каждый временной шаг задаются случайные значения, равномерно

распределённые от 0 до 1. Эти значения интерполируются в ячейки матрицы стохастического генератора.

Таким образом, на каждый временной шаг модели создается пространственно-связанное поле случайной вероятности. Значения этого поля случайных вероятностей используются для определения квантиля в пункте 4. Представленный алгоритм дает возможность реализовать связанные по пространству и времени поля сплочённости (рис. 31).

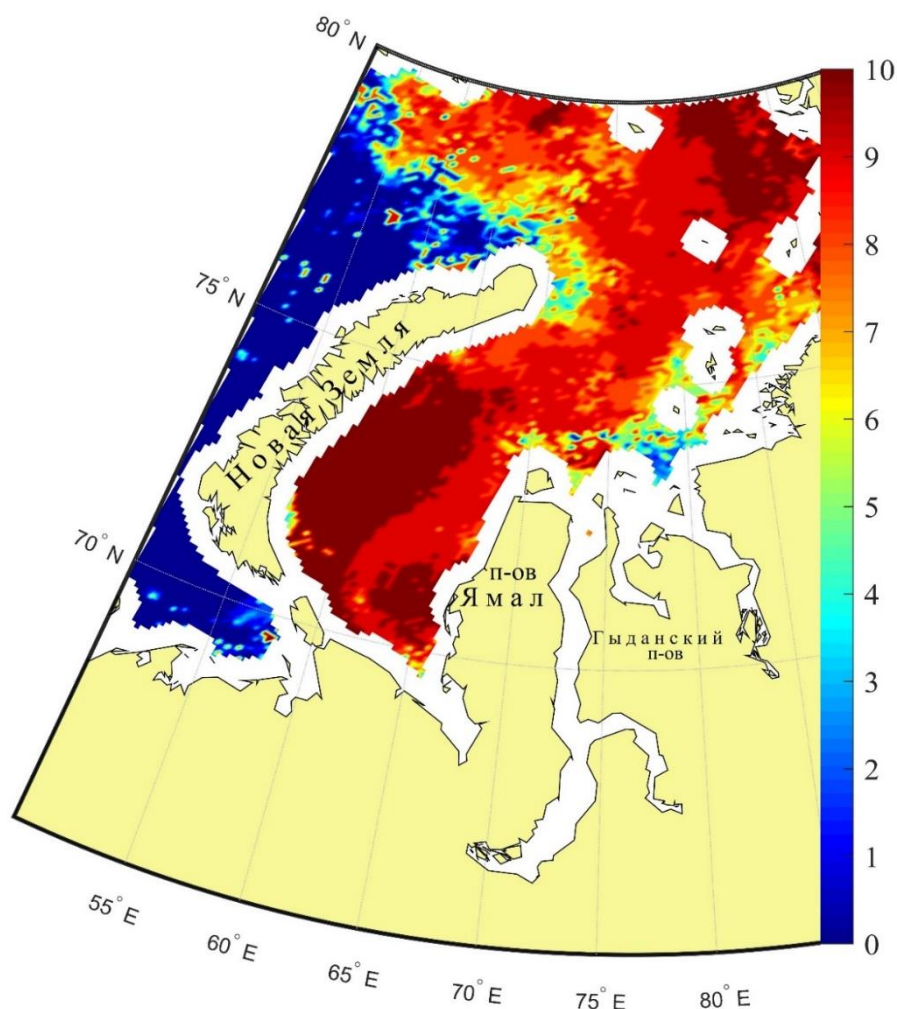


Рис.31 Пример смоделированных полей сплочённости методом Монте-Карло по цепям Маркова для мая: моделируемые значения связаны по времени и по пространству

Оценка математического ожидания и дисперсии сплочённости льда исходных данных проекта OSI SAF (Приложение 13) хорошо совпадают с аналогичными параметрами, рассчитанными по стохастическим моделям как по алгоритму только по цепям Маркова (рис. 32, 33), так и при использовании радиусов корреляции (рис. 34, 35). Сравнение автокорреляционных функций результатов моделирования с

автокорреляционными функциями исходных данных показало приемлемые результаты только для моделирования с помощью цепей Маркова. Таким образом, для стохастического генератора ледяного покрова приемлемо использование алгоритмов, которые основываются на методе Монте-Карло с использованием цепей Маркова и учете радиусов корреляции. Однако реализованный алгоритм также необходимо дополнить условиями, которые оказывают влияние на эволюцию ледяного покрова, такие, как возрастные градации льда, сезонная и климатическая изменчивость.

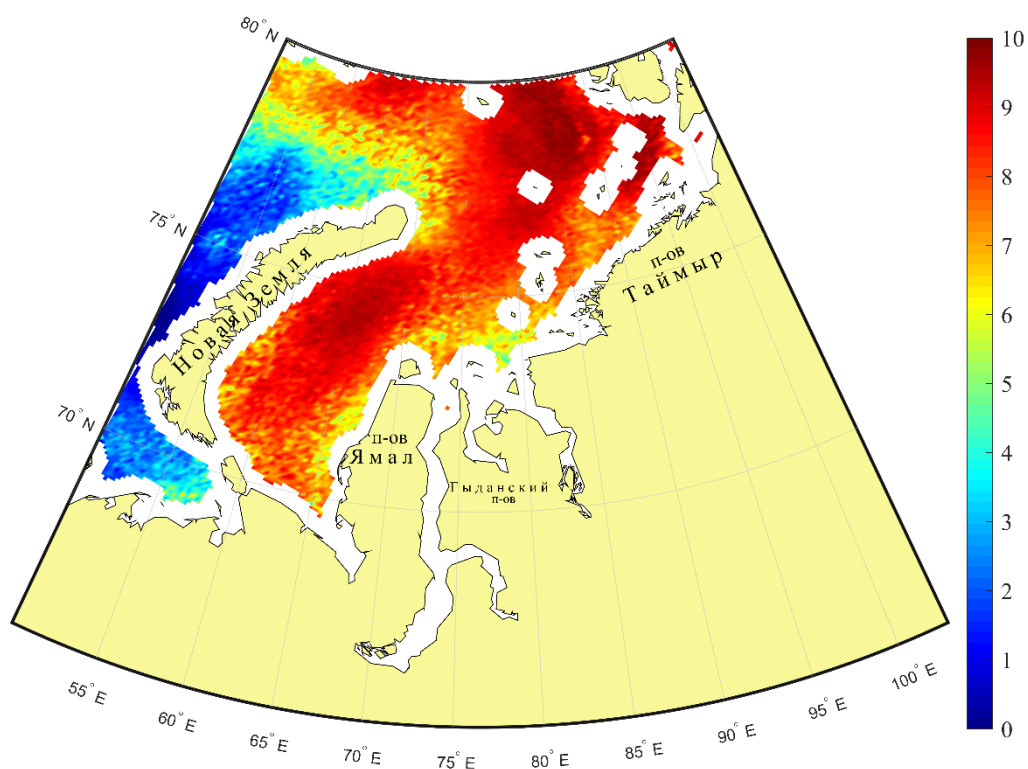


Рис.32 Оценка математического ожидания для смоделированных полей методом Монте-Карло с использованием цепей Маркова для мая

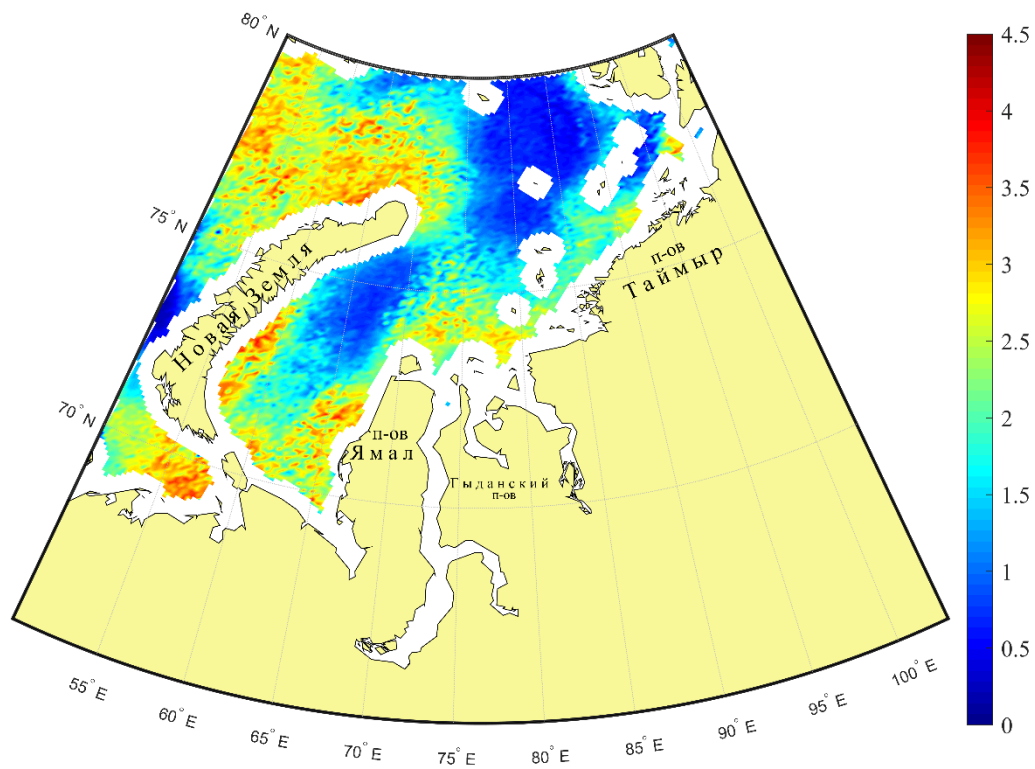


Рис.33 Оценка среднеквадратического отклонения для смоделированных полей методом Монте-Карло с использованием цепей Маркова для мая

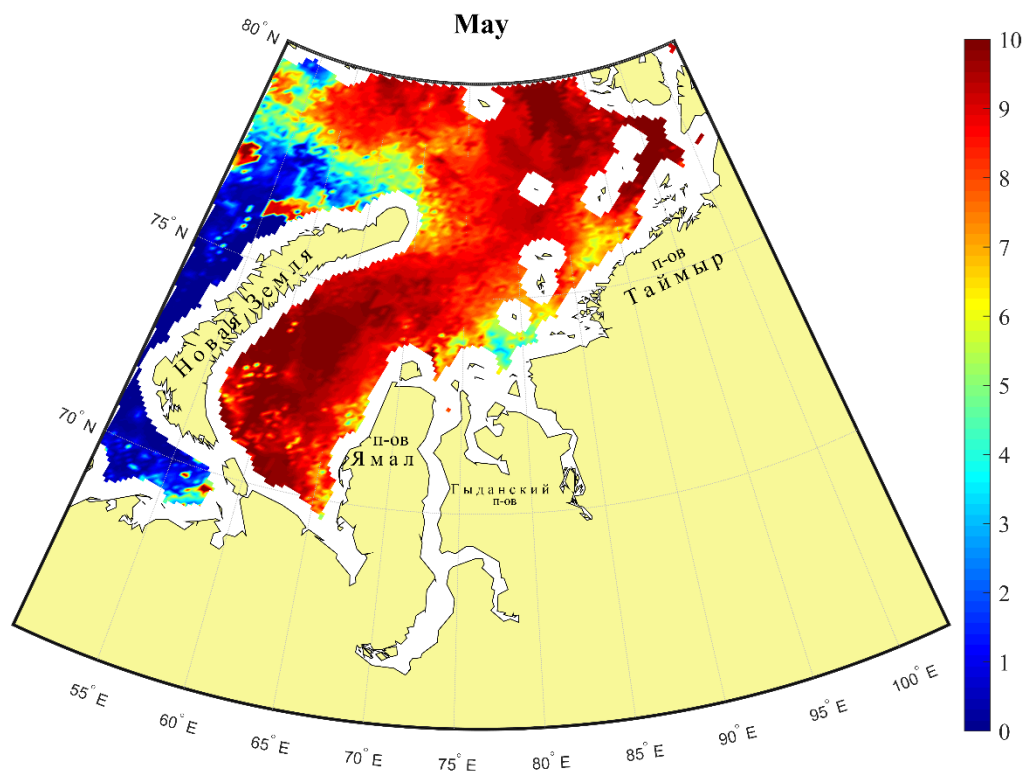


Рис.34 Оценка среднеквадратического отклонения для смоделированных полей методом Монте-Карло с использованием цепей Маркова и радиусов корреляции для мая

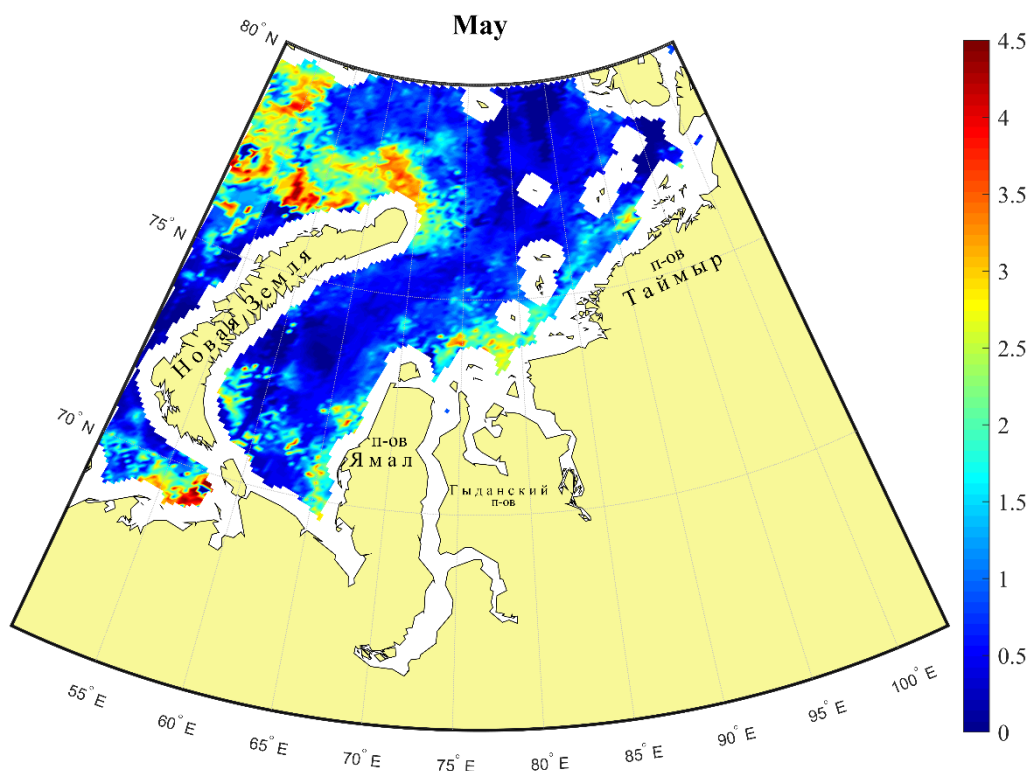


Рис.35 Оценка среднеквадратического отклонения для смоделированных полей методом Монте-Карло с использованием цепей Маркова и радиусов корреляции для мая

5.3 Перспективы развития стохастического генератора

На данном этапе стохастический генератор ледяного покрова возможно использовать только для моделирования изменения сплочённости. Следует отметить, что в природе в изменении сплочённости Карского моря отмечаются выраженные детерминистические связи и оппозиционная тенденция изменения сплочённости на противоположенных берегах Карского моря – образование и закрытие полыней, вызванных воздействием ветра. Это явление в описанной модели может быть учтено с помощью дополнительных регрессионных соотношений между векторной величиной (ветер) и скалярной величиной (сплочённость).

Доработка генератора также должна включать рассмотрение и добавление возрастных градаций льда, сезонной изменчивости и климатической изменчивости. Для учета сезонной изменчивости необходимо использовать алгоритм расчета матриц переходных вероятностей для различных месяцев. В самом стохастическом генераторе сезонное изменение сплоченности льда будет достигаться интерполяцией матриц

переходных вероятностей между сезонами. При исследовании климатической изменчивости требуется учесть отличия матриц переходных вероятностей сплоченности льда в зависимости типа года (теплый, умеренный и холодный год). Подобные зависимости можно применить к прогностическим оценкам климатической изменчивости (например, к данным IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change), <https://www.ipcc.ch>), что позволит воспроизвести предполагаемые климатические изменения в ледяном покрове на десятилетия вперед).

Учет в стохастическом генераторе возрастных градаций, форм льда, сжатия, разрушенности, торосистости существенно расширит круг задач использования синтетической информации о ледяном покрове.

Добавление новых алгоритмов в разработанный для данной работы стохастический генератор ледяного покрова позволит воспроизвести методом Монте-Карло с использованием цепей Маркова и радиусов корреляций искусственные многолетние ряды данных характеристик ледяного покрова. Разработка такой стохастической модели позволит с приемлемой точностью рассчитать с суточной дискретностью статистические характеристики с межгодовой изменчивости ледяного покрова на рассматриваемой территории, при этом длина реализаций ансамблей состояний ледяного покрова может существенно превышать продолжительность имеющихся баз данных о состоянии ледяного покрова при необходимости вероятностного моделирования характеристик льда на длительные отрезки времени.

Заключение

На сегодняшний день исследованию ледяного покрова уделяется особое внимание в связи с развитием проектов по добыче полезных ископаемых в шельфовой зоне Северного Ледовитого океана, а также развитием транспортной инфраструктуры Северного морского пути.

Для некоторых задач требуются расчеты, основанные на имитационном моделировании пространственно-временных полей характеристик ледяного покрова. В ходе работы разработан алгоритм вероятностного моделирования ледяного покрова, которое соответствует реальной картине формирования и разрушения льда. Созданная модель воспроизведения режимных характеристик ледяного покрова получила название «стохастический генератор ледяного покрова».

В результате анализа источников информации было выявлено, что для корректного воспроизведения стохастическим генератором сплоченности ледяного целесообразно использовать данные проекта OSI SAF, так как данные этого источника имеют суточную дискретность, в отличие от ледовых карт формата SIGRID-3, которые составляются по осредненным данным за несколько дней. То есть при использовании информации проекта OSI SAF возможно фиксировать изменчивость состояния ледяного покрова за счет мелких временных масштабов. Однако при моделировании эволюции толщин ледяного покрова и размера льдин (формы льда) рационально использовать ледовые карты формата SIGRID-3 в качестве источника информации для зависимостей, заложенных в стохастическом генераторе. Для обеспечения пространственной связанности полей характеристик ледяного покрова оценивались статистические параметры ледовых зон в формате SIGRID-3 и радиусы корреляции изменения сплочённости проекта OSI SAF.

В дипломной работе успешно реализована основная цель исследования – создание стохастического генератора ледяного покрова, который воспроизводит реалистичные закономерности изменения характеристик ледяного покрова. Установлено, что для реализации алгоритма, который бы учитывал пространственно-временные закономерности изменения ледовых характеристик, эффективно использовать метод Монте-Карло с использованием цепей Маркова и радиусов корреляции. Статистические характеристики параметров льда, воссозданные таким стохастическим генератором, соответствуют статистическим характеристикам исходных данных проекта OSI SAF. Расчеты генераторов, основанных на использовании схемы Бернулли и простых цепей Маркова без учета радиусов корреляции, как и ожидалось, показали неприемлемый результат.

Список литературы

1. Алексеев Г.В., Заблотский Г.А., Макштас А.П. О постановке наблюдений за потоками тепла и влаги, таянии и нарастании льда на поверхности разводьев и молодых льдов в Арктическом бассейне. СПб.: Гидрометиздат, 1975, с. 143-147
2. Блошкина Е.В., Махотин М.С., Волков Д.Л., Колдунов Н.В. Сравнение распределения термохалинных характеристик в северном ледовитом океане по данным измерений и по результатам расчета региональной конфигурации модели Mitgcm // СПб.: Океанология, №43,2016, с. 67-88
3. Борочаев, В.Е. Льды Карского моря // СПб.: Гидрометиздат, 1998, 182 с.
4. Бушуев А.В., Волков Н.А., Лоцилов В.С. Атлас ледовых образований // СПб.: Гидрометеиздат,1974, 141 с.
5. Васильев А.Н. Взаимодействие речных и морских вод в Обской устьевой области // СПб.: Тр. ААНИИ, 1976, т. 314, с. 183–196
6. Волков Н.А. Руководства по производству ледовой авиаразведки // СПб.: ААНИИ,1981,240 с.
7. Гельфан А.Н., Морейдо В.М. Динамико-стохастическое моделирование формирования снежного покрова на Европейской территории России // Лёд и Снег, 2014, №2, с. 44-52.
8. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации» // СПб.: РГГМУ, 2010, 74с.
9. Горкин А.П. География. Современная иллюстрированная энциклопедия//Росмэн-Пресс, 2006, 624с.
10. Горшков С. Г., Алексеев В. Н., Рассохо А. И., Фалеев В. И., Хаатов Г. М., Серегин М. П. Атлас океанов. Северный ледовитый океан // М.: ГУНИО МО, 1980, 190 с.
11. Государственный научный центр "Арктический и антарктический научно-исследовательский институт" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aari.ru> (Дата обращения: 06.06.2019)
12. Дмитриев А.А. Динамика атмосферных процессов над морями Российской Арктики // СПб.: Гидрометиздат, 2000, 233 с.
13. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР // Издательство "Мысль", 1965, 350 с.
14. Егоров А.Г. Пространственное распределение сплочённости ледяного покрова и методы долгосрочных ледовых прогнозов в арктических морях России // Автореферат, 2010, 36 с.

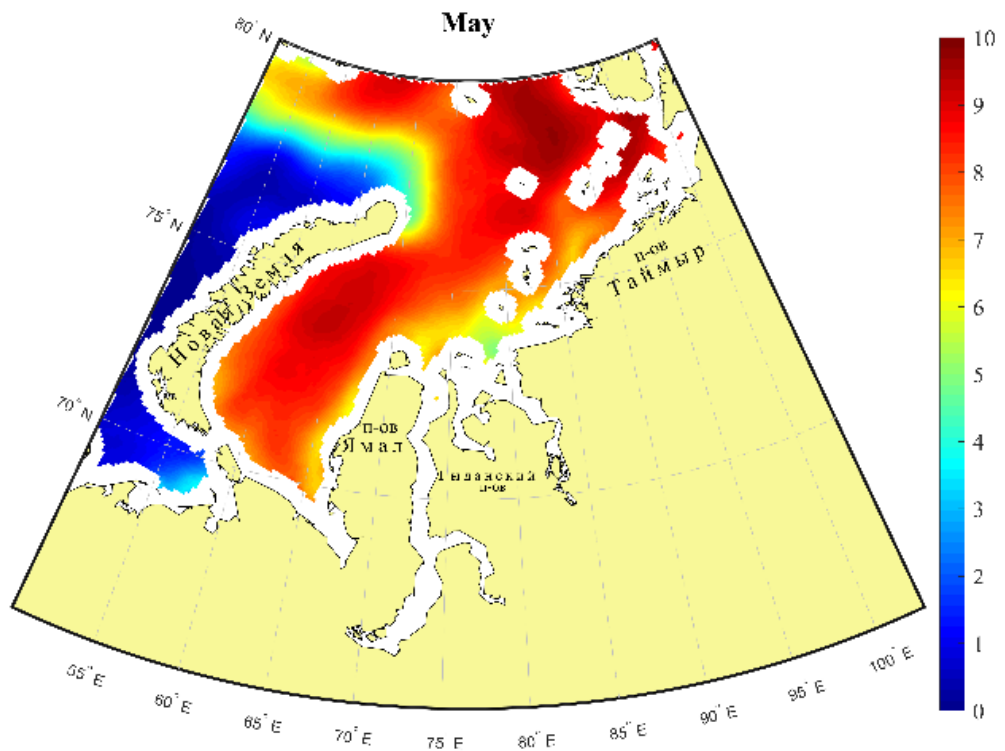
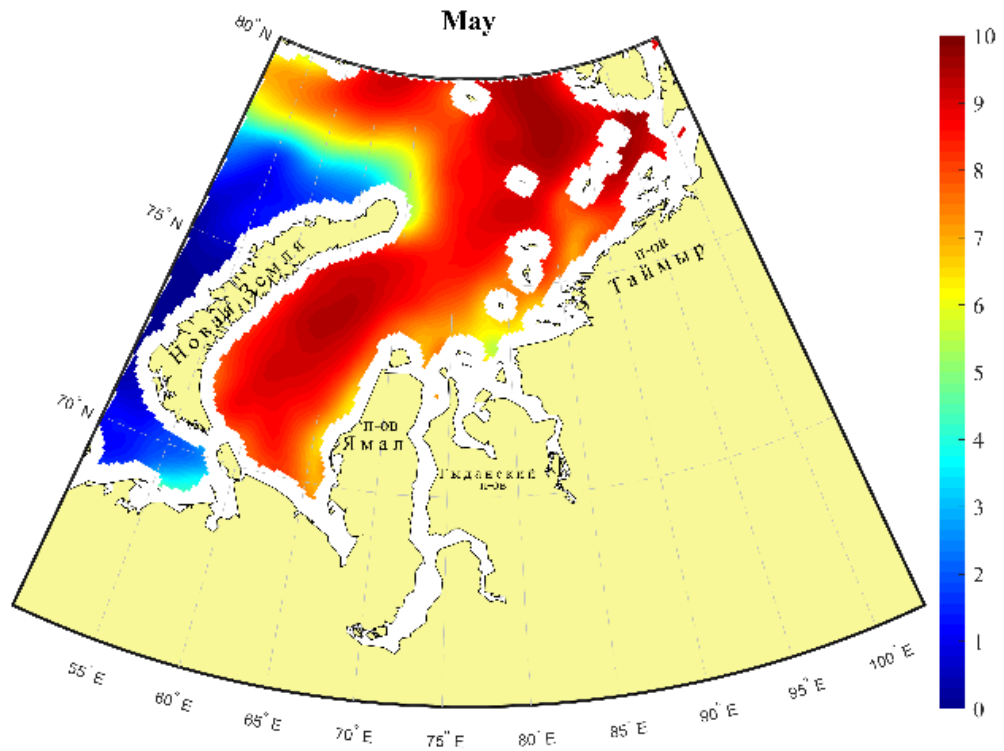
15. Зубакин Г.К. Ледяной покров морей Северо-Европейского Бассейна (крупномасштабная изменчивость) // Дисс. докт. геогр. наук, 1988, 343 с.
16. Зубакин Г.К. Ледяные образования морей западной Арктики // СПб : ААНИИ, 2006, 272 с.
17. Карелин И.Д., Карклин В.П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XI века // СПб.: ААНИИ, 2012. 180 с.,
18. Карклин В.П. Квазидвухлетние влияния в изменениях ледовитости арктических морей // СПб.: Тр. ААНИИ, 1976, т. 341, с. 119–142.
19. Май Р.И., Таровик О.В., Топаж А.Г. Моделирование морской погоды как входного сигнала имитационных моделей транспортных и экологических систем в арктическом регионе // Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем, 2018, т. XXIX. № 3, с. 20-38
20. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации // СПб.: РГГМУ, 2008, 404 с.
21. Миронов Е.У. Наблюдения за ледовой обстановкой // СПб.: ААНИИ, 2009, 360 с.
22. Молодыхина С.В., Гузенко Р.Б., Май Р.И. Стохастический генератор полей характеристик ледяного покрова. Моря России: фундаментальные и прикладные исследования // Тезисы всероссийской научной конференции, Севастополь, 2019, с. 248-250
23. Русанов В.П., Яковлев Н.И., Буйневич А.Г. Гидрохимический режим Северного Ледовитого океана // СПб.: Тр. ААНИИ, т. 355, 1979, с. 114
24. Сергеевский Б.А. Гидрографические исследования юго-восточной части Карского моря. Обь-Енисейский район // Л.: Главсевморпути, 1936, 416 с.
25. Смоляницкий В.М., Щербаков Ю.А., Порубаев В.С. и др. SIGRID-3: A vector archive format for sea ice charts // СПб.: ААНИИ, 2004, 24 с.
26. Тимофеев В.Т. Поступление атлантической воды и тепла в Арктический бассейн // СПб.: Океанология, 1961, т.1, вып 3, с. 407-411.
27. Фролов И.Е. Информационные базы, модели и прогноз состояния ледяного покрова арктических морей // Автореф. дис. д-ра геогр. наук., 1998, 36 с.
28. Фролов И.Е., Гаврило В.П. Морской лёд. Сбор и анализ данных наблюдений, физические свойства и прогнозирование ледовых условий // СПб.: Гидрометиздат, 1997, 402 с.
29. Breivik L.-A., Eastwood S., Godøy Ø., Schyberg H., Andersen S. & Tonboe R. Sea Ice Products for EUMETSAT Satellite Application Facility // Canadian Journal of Remote Sensing, 2001, pp. 403-410

30. Buishand, T.A. Some remarks on the use of daily rainfall models // *Journal of Hydrology* 36, 1978, c. 378-396
31. Chin, E. H., Modeling daily precipitation occurrence process with Markov chain // *Water Resour. Res.*, 13(6), 1977, p. 949-956
32. Dubrovský M., Buchtele J., Žalud Z. High-frequency and lowfrequency variability in stochastic daily weather generator and its effect on agricultural and hydrologic modeling // *Climatic Change*, 2004, № 63, c. 145–179.
33. Gabriel, R., and J. Neuman, A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv, Israel // *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 88, 1962, p. 90-95
34. May R.I., Fedyakov V.E., Frolov S.V., Tarovik O.V., Topaj A.G. Method to optimize ship route in ice-covered waters based on vector polygons // *Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, 2019, pp. 878-885
35. May, R.I., Rubchenia, A.V., Smolyanitskiy, V.M., Tarovik, O.V. Typification of sea ice conditions in the Arctic based on voyage times of ships on optimized routes // *Proc. of 18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*, pp. 515-528
36. Richardson C.W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation // *Water Resources Research*, 1981, № 17, c. 182–190

Приложения

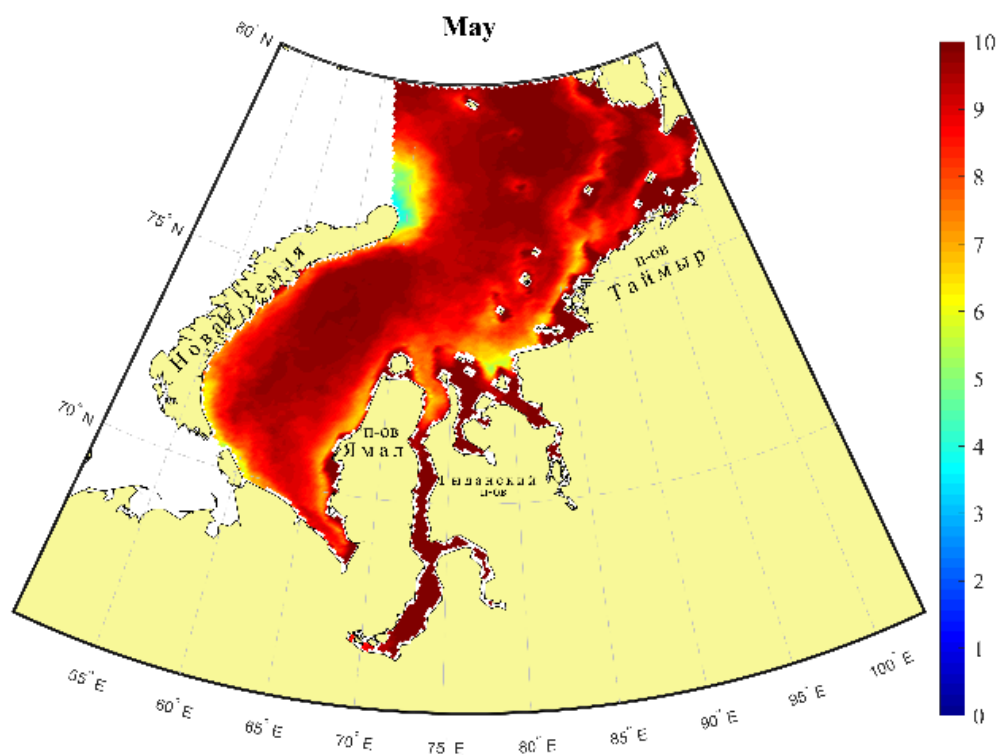
Приложение 1

Оценки математического ожидания сплочённости ледяного покрова по ежедневным(сверху) и недельным(снизу) данным OSI SAF за май 2006-2016 гг. (баллы)



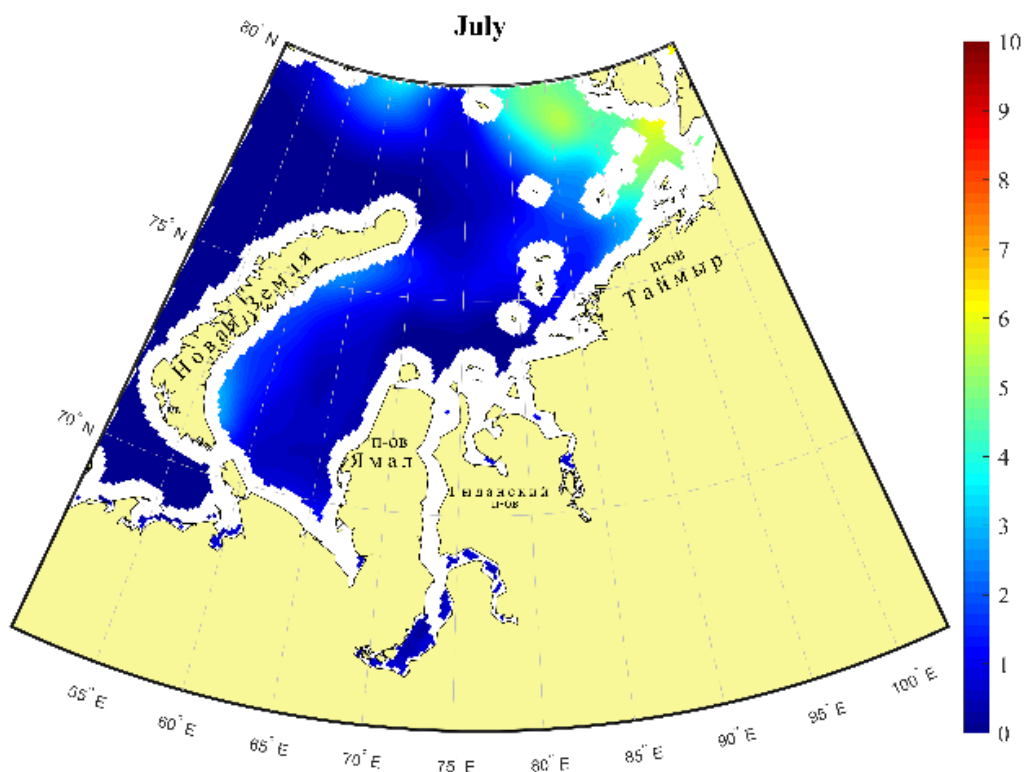
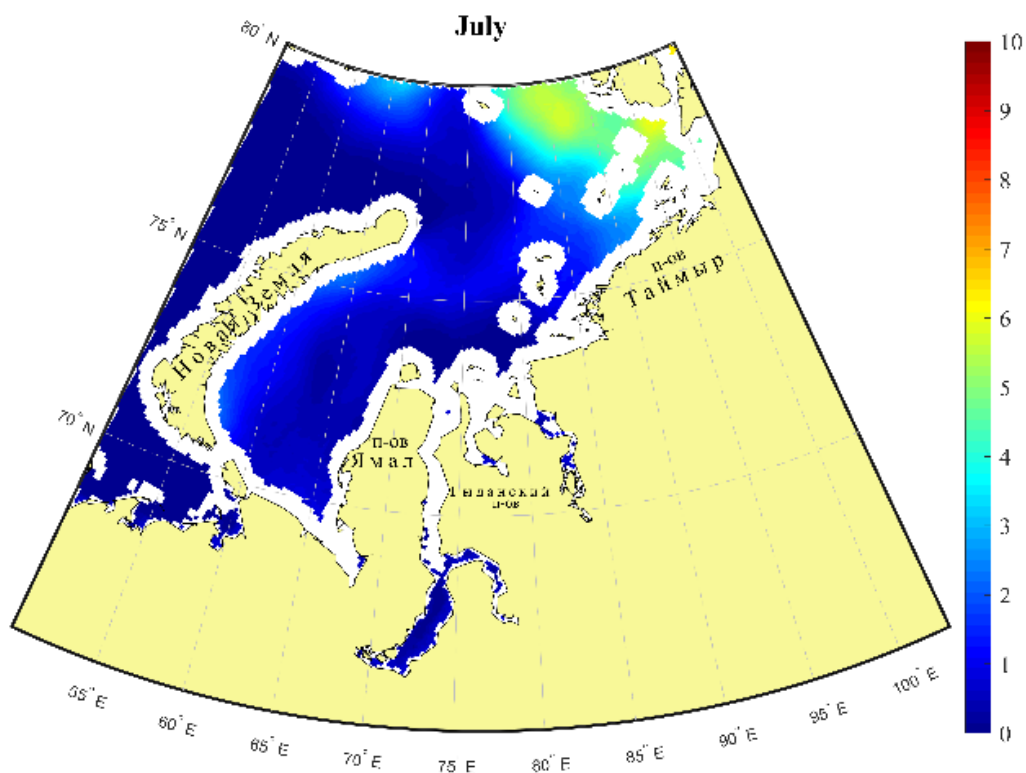
Приложение 2

Оценки математического ожидания сплочённости ледяного покрова по данным SIGRID-3 за май 2006-2016 гг. (баллы)



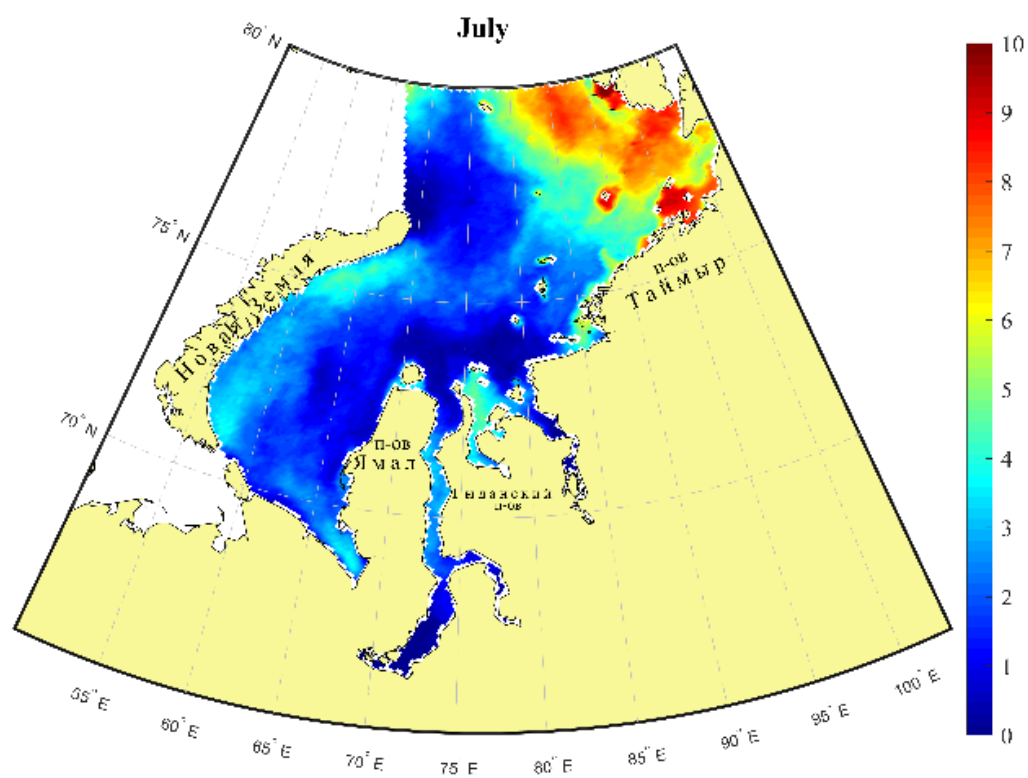
Приложение 3

Оценки математического ожидания сплочённости ледяного покрова по ежедневным(сверху) и недельным(снизу) данным OSI SAF за июль 2006-2016 гг. (баллы)



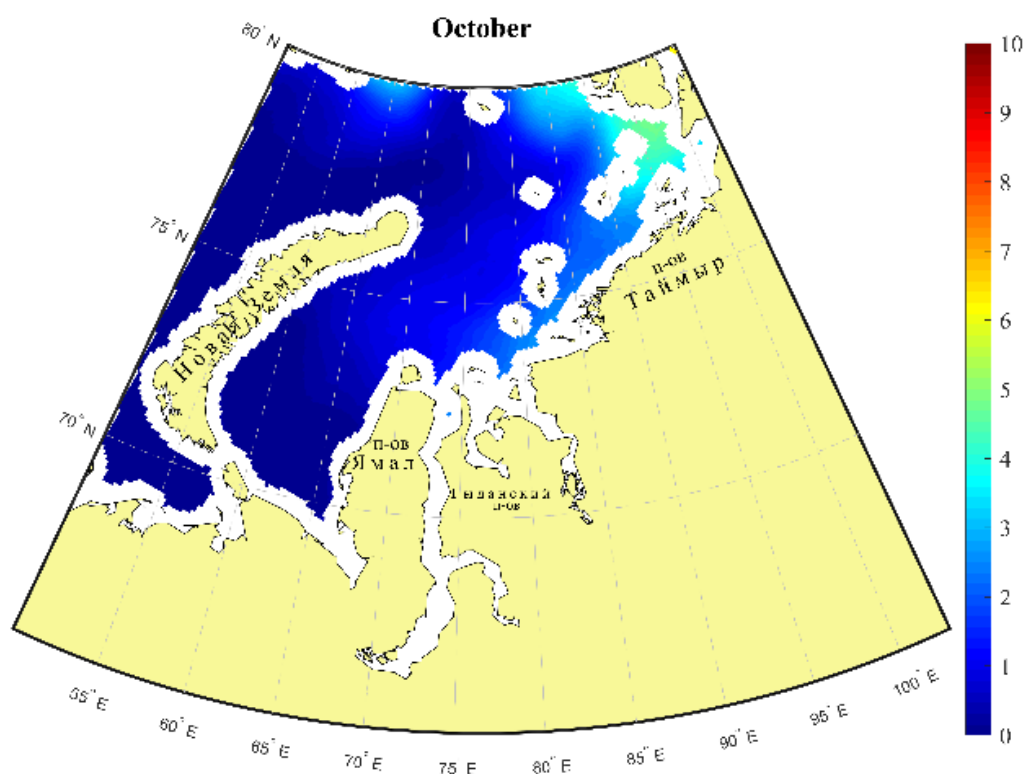
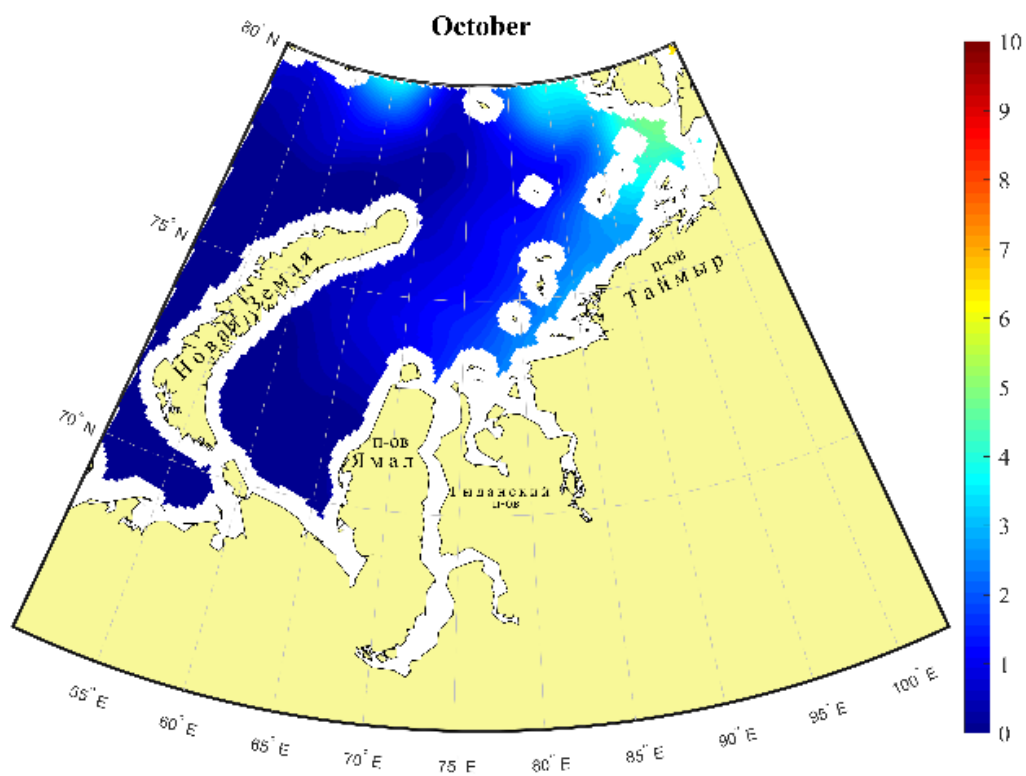
Приложение 4

Оценки математического ожидания сплочённости ледяного покрова по данным SIGRID-3 за июль 2006-2016 гг. (баллы)



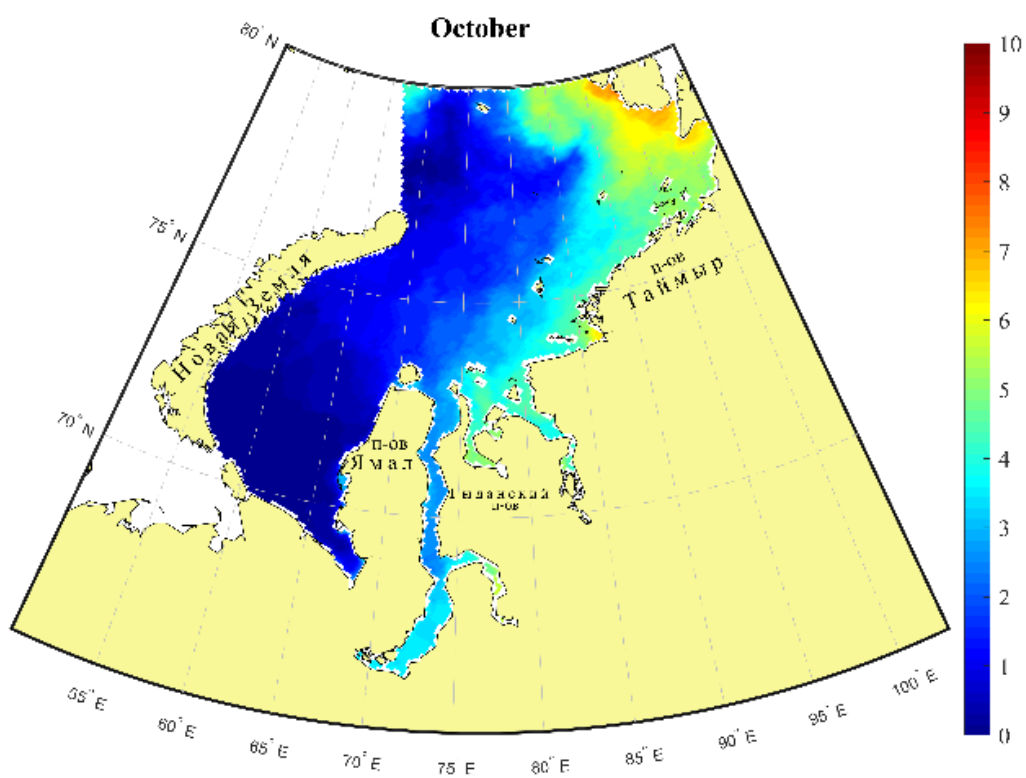
Приложение 5

Оценки математического ожидания сплочённости ледяного покрова по ежедневным(сверху) и недельным(снизу) данным OSI SAF за октябрь 2006-2016 гг. (баллы)



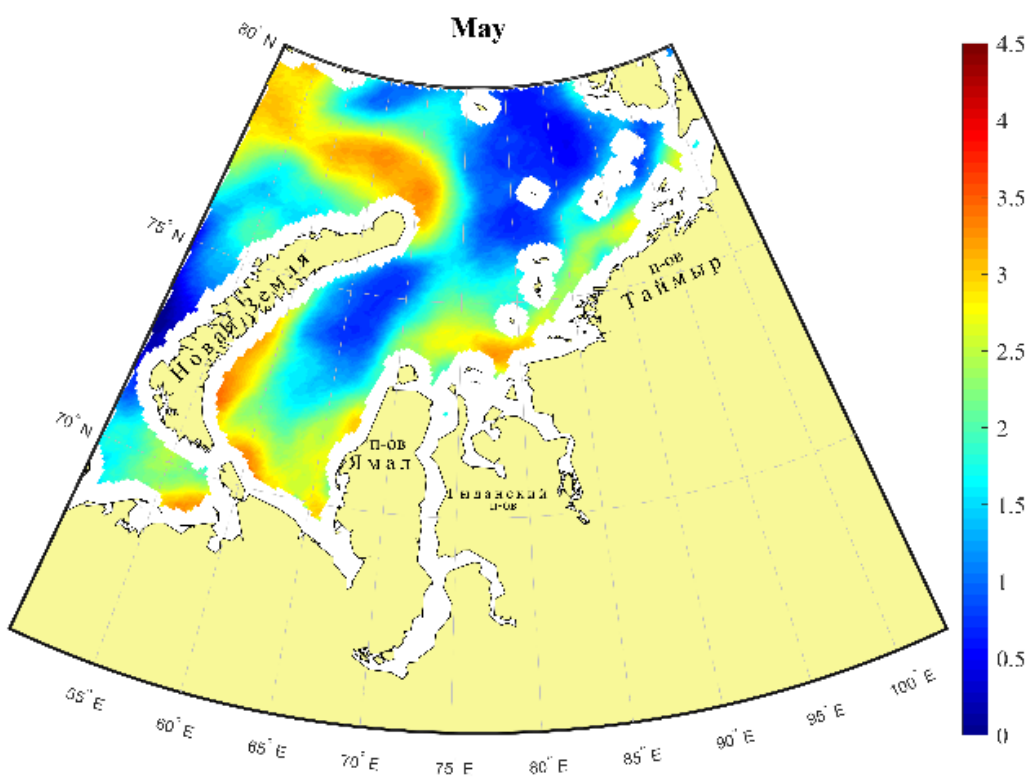
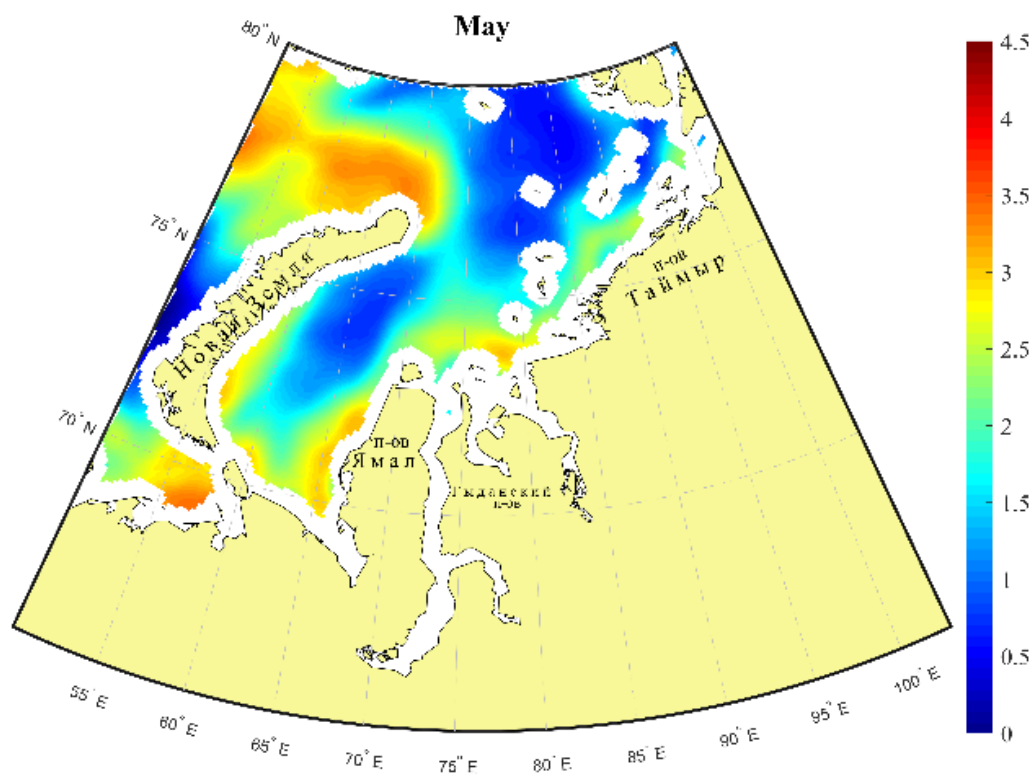
Приложение 6

Оценки математического ожидания сплочённости ледяного покрова по данным SIGRID-3 за октябрь 2006-2016 гг. (баллы)



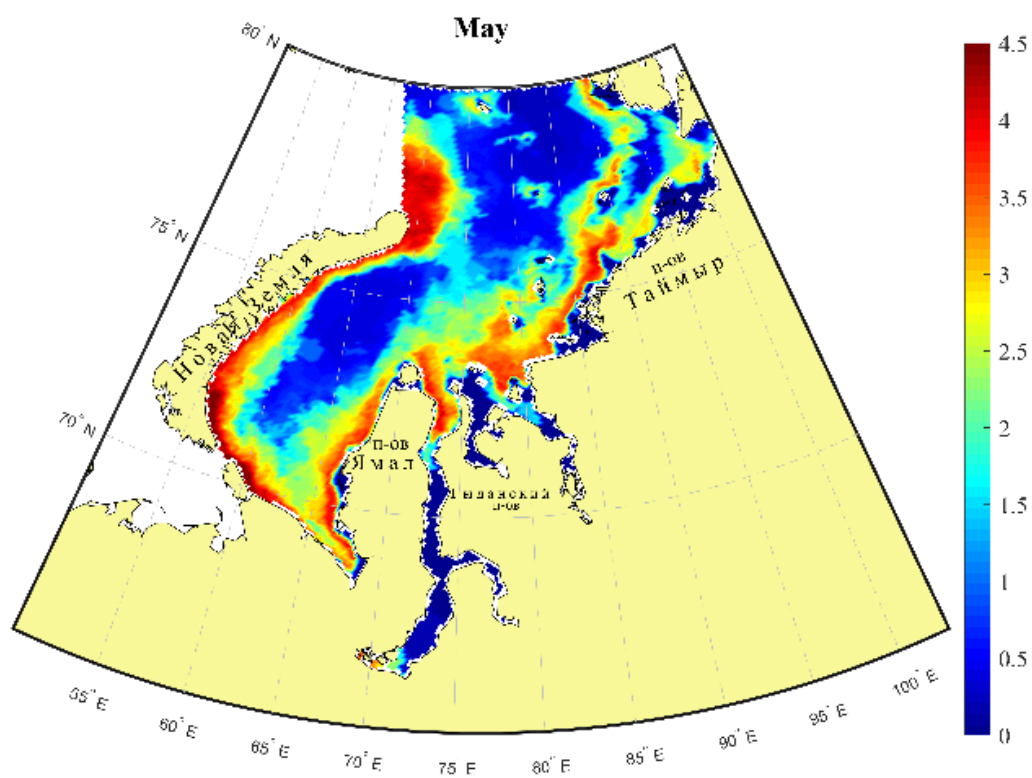
Приложение 7

Оценка среднеквадратического отклонения сплочённости ледяного покрова по ежедневным(сверху) и недельным(снизу) данным OSI SAF за май 2006-2016 гг. (баллы)



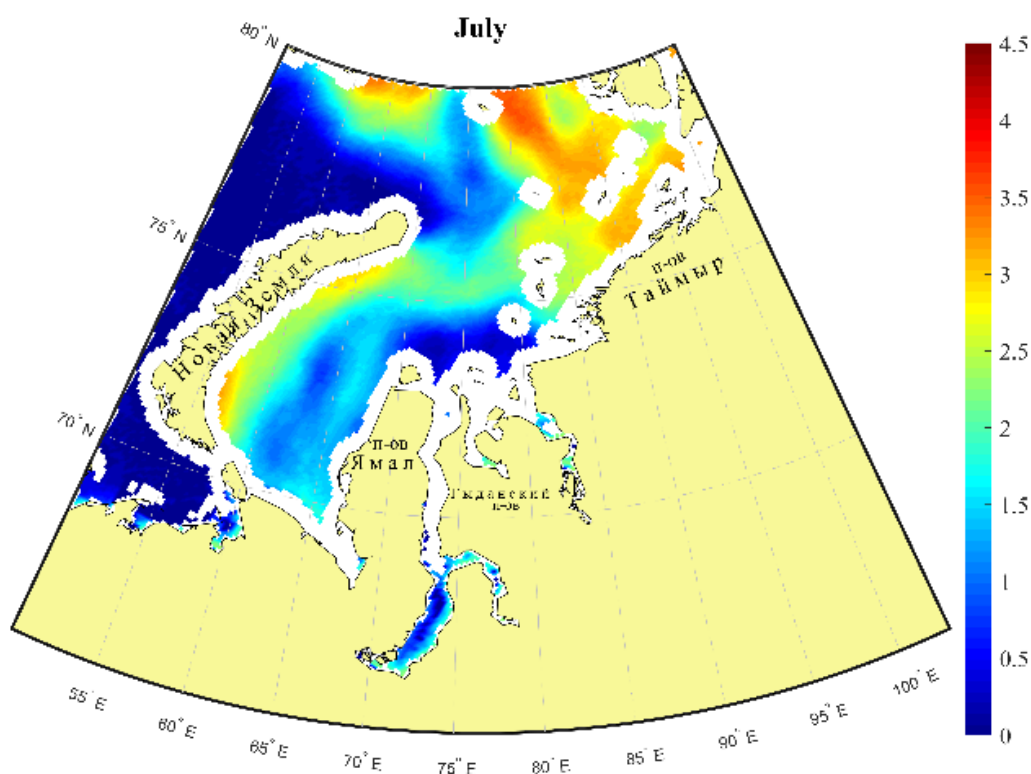
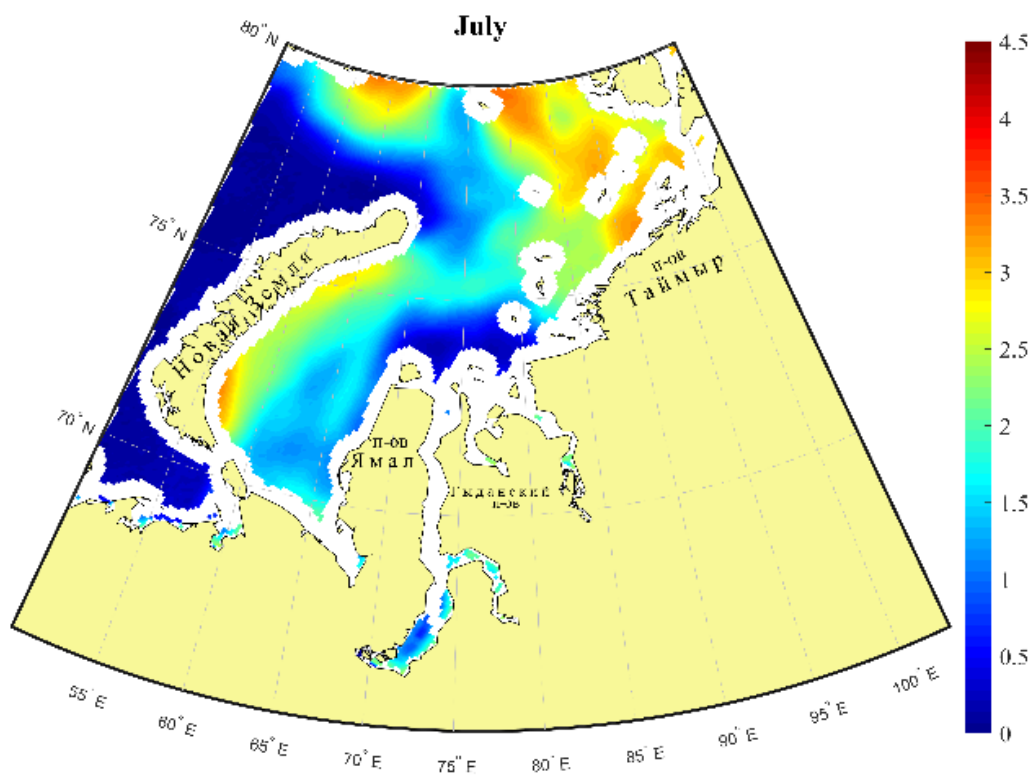
Приложение 8

Оценка среднеквадратического отклонения сплочённости ледяного покрова по данным SIGRID-3 за май 2006-2016 гг. (баллы)



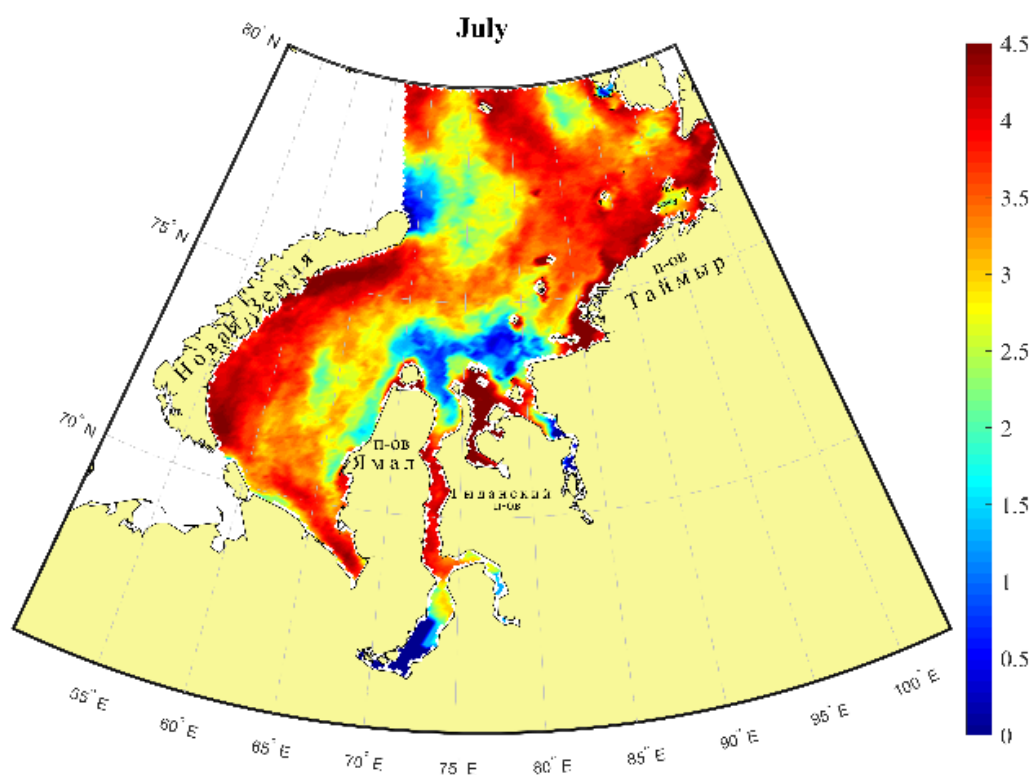
Приложение 9

Оценка среднеквадратического отклонения сплочённости ледяного покрова по ежедневным(сверху) и недельным(снизу) данным OSI SAF за июль 2006-2016 гг. (баллы)



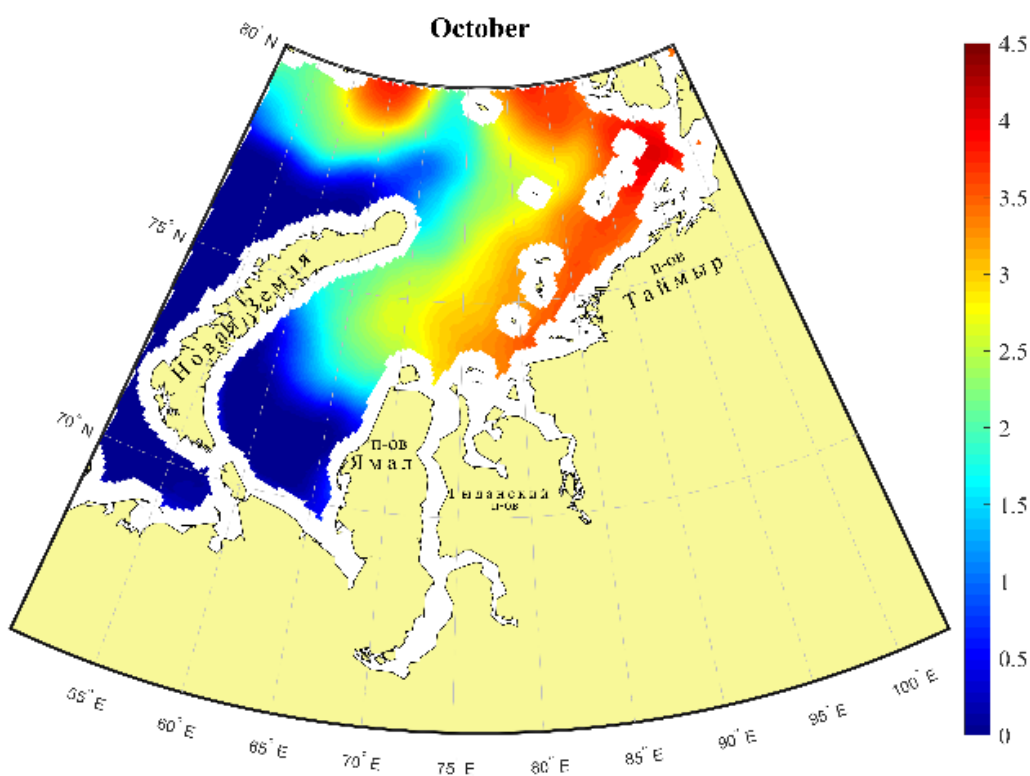
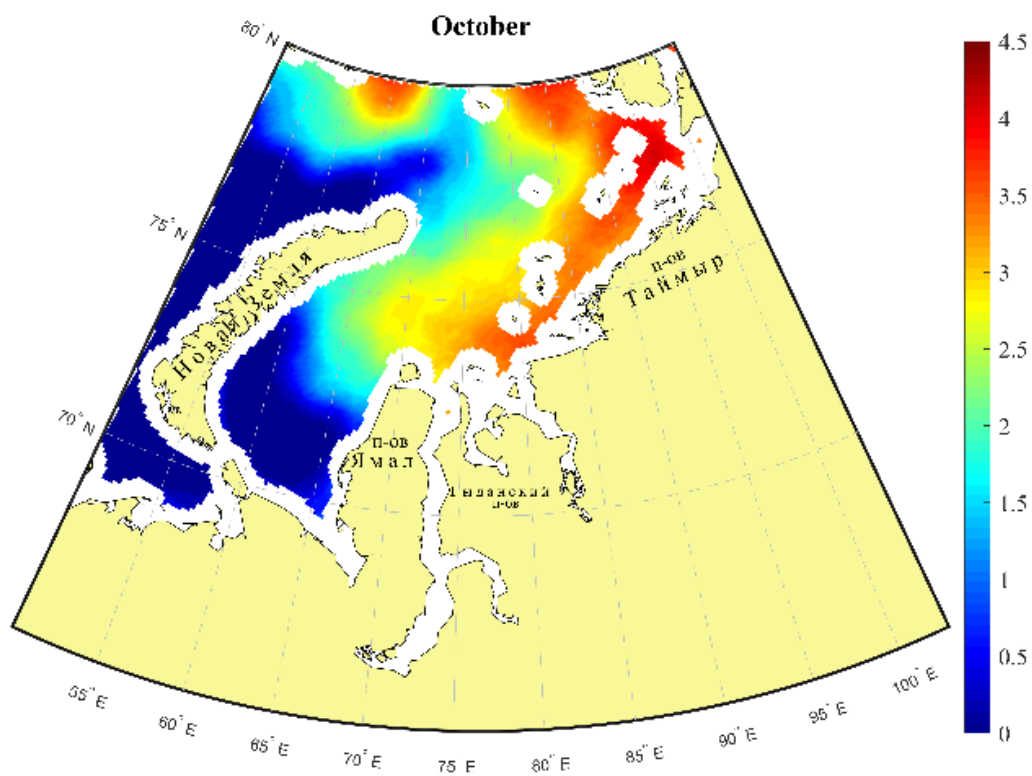
Приложение 10

Оценка среднеквадратического отклонения сплочённости ледяного покрова по данным SIGRID-3 за июль 2006-2016 гг. (баллы)



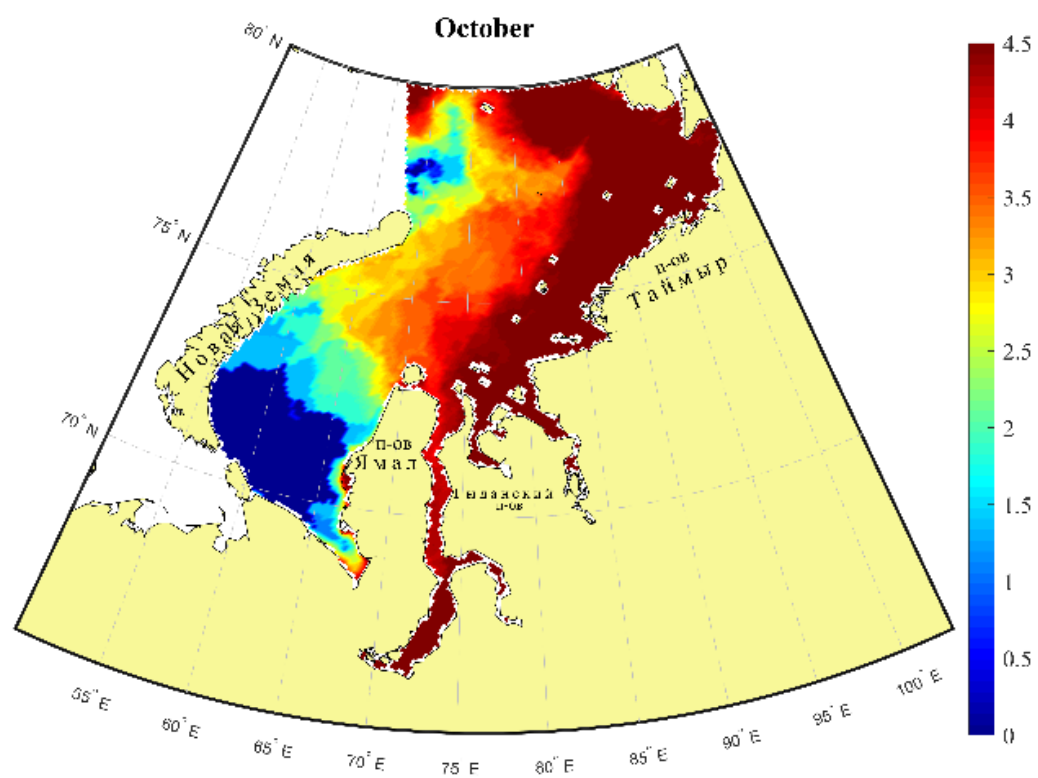
Приложение 11

Оценка среднеквадратического отклонения сплочённости ледяного покрова по ежедневным(сверху) и недельным(снизу) данным OSI SAF за июль 2006-2016 гг. (баллы)



Приложение 12

Оценка среднеквадратического отклонения сплочённости ледяного покрова по данным SIGRID-3 за октябрь 2006-2016 гг. (баллы)



Приложение 13

Пространственное распределение оценок математического ожидания (сверху) и среднеквадратического отклонения (снизу) по исходным данным проекта OSI SAF за май 2006-2016 гг. (баллы)

