



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Промысловой океанологии и охраны природных вод

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

На тему Ледовитость моря Лаптевых в условиях меняющегося климата

Исполнитель Баёва Ксения Павловна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гордеева Светлана Михайловна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Ерёмина Татьяна Рэмовна
(фамилия, имя, отчество)

«19» июня 2017г.

Санкт-Петербург

2017



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Промысловой океанологии и охраны природных вод

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

На тему Исследование ледовитости моря Лаптевых в условиях изменяющегося
климата

Исполнитель Баёва Ксения Павловна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гордеева Светлана Михайловна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)
кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Ерёмина Татьяна Рэмовна
(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт–Петербург

2017

Содержание

Введение.....	3
1 Физико-географическое описание моря Лаптевых	5
1.1 Географическое положение	5
1.2 Климат	7
1.3 Гидрология моря.....	9
1.4 Ледовая обстановка	17
2. Методы исследования и исходные данные	20
2.1 Исходные данные	20
2.2 Статистические методы исследования	22
2.2.1 Анализ временного тренда	22
2.2.2 Вейвлет - анализ	24
2.2.3 Спектральный и гармонический анализ.....	26
2.2.4 Кластерный анализ	27
3 Исследование ледовитости моря Лаптевых в условиях изменяющегося климата	29
3.1 Разделение внутригодовой изменчивости ледовитости на летний и зимний сезоны.....	29
3.2 Среднее многолетнее состояние ледовитости моря Лаптевых в зимний сезон	32
3.3 Оценка временного тренда ледовитости моря Лаптевых в зимний сезон	35
3.4 Районирование моря Лаптевых по однородной изменчивости ледовитости в зимний период	38
3.4.1 Выделение и анализ тренда в классах	41
3.4.2 Спектральный анализ	43
3.4.3 Вейвлет-анализ	45
Заключение.....	48
Список используемых источников	50
ПриложениеА – Спектры разложения Фурье	52
Приложение Б. Результаты гармонического анализа	54

Введение

В настоящее время изменение климата является одной из важнейших проблем человечества. От климата зависят многие явления и процессы. В их числе особое место занимают льды Арктического региона. Изменение климатической системы Земли находит отражение в состоянии арктических льдов. Несмотря на то, что наука постоянно развивается, знания во многих сферах увеличиваются, данный географический регион все же мало изучен. Таким образом, сейчас целесообразно проводить исследования ледовитости Арктического региона, чтобы знания о природе и механизмах ледовых изменений стали более полными и точными. В данной работе объектом исследования представляется море Лаптевых, которое в настоящее время становится популярным и для отечественных, и для зарубежных исследований. Причиной такого ажиотажа является экономическая значимость региона моря. В особенности это касается шельфовой зоны, которая служит местом добычи полезных ископаемых. Более того, море Лаптевых является частью Северного Морского Пути, который является, своего рода, транспортной магистралью. Изменение климата в сторону глобального потепления позволит Северному Морскому Пути увеличить перспективы развития.

Существуют различные точки зрения по поводу дальнейшего изменения климата. Так некоторые предполагают, что к XXII веку, многолетние льды полностью растают – в этой гипотезе основным фактором является антропогенное воздействие на климат. Другие, основываясь на теории цикличности процессов (потепление сменяется похолоданием), считают, в скором времени моря Арктики снова будут изменяться в соответствии с предстоящим глобальным похолоданием.

По последним исследованиям выявлено, что в последние годы лето в море Лаптевых характеризовалось практически полным отсутствием льда.

Данная ситуация, в свою очередь, облегчает проход судов даже без ледокольного сопровождения. Следовательно, раз летом лёд тает, то исследователи предполагают малое нарастание льда в зимние месяцы. Другими словами, чем меньше льда образовывается зимой, тем быстрее летом море освободится от него [1].

Целью выпускной квалификационной работы является исследование ледовитости моря Лаптевых в условиях изменяющегося климата.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Изучение климатических особенностей моря Лаптевых по литературным источникам.
2. Анализ внутригодовой изменчивости ледовитости в море Лаптевых.
3. Исследование временной изменчивости ледовитости моря Лаптевых в зимний сезон.

1 Физико-географическое описание моря Лаптевых

1.1 Географическое положение

Море Лаптевых – материковое окраинное море. Оно расположено между Северной Землей и Таймырским полуостровом на западе и Новосибирскими островами на востоке. Относится к бассейну Северного Ледовитого океана. С запада соединяется с Карским морем через проливы Вилькицкого, Шокальского, Красной Армии. На востоке соединяется с Восточно-Сибирским морем через проливы Санникова, Этерикан и Дмитрия Лаптева. На юге море ограничено берегами евразийского материка от м. Челюскин до м. Святой с запада на восток.

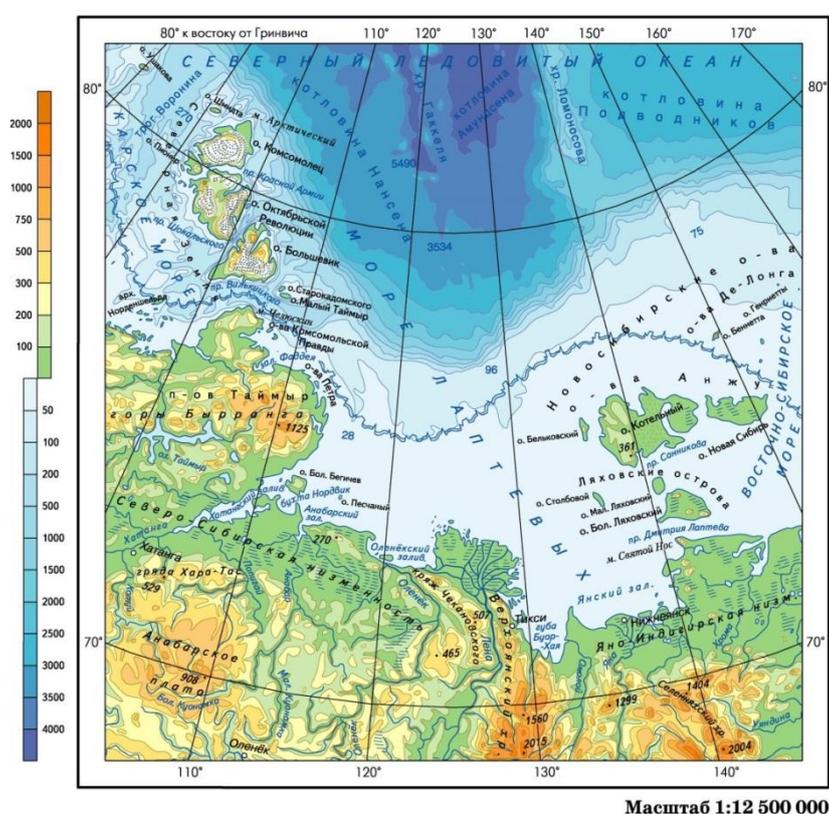


Рисунок 1.1 – Географическое положение моря Лаптевых[2]

Общие сведения: площадь моря – 664 тыс. км²; объем – 353 тыс.км³; наибольшая глубина – 3385 м; средняя глубина – 533 м. Распределение

глубины по частям моря: южная часть – мелководная (до 50 м); к востоку от пролива Вилькицкого глубина заметно возрастает и достигает примерно 200 метров, а вот на севере, на шельфе, отмечается наибольшая глубина – желоб Садко (3385 м).

В море много островов, большая часть из которых располагается на западе. Присутствуют как группы островов (Вилькицкого, Фаддея и Комсомольской Правды), так и одиночные острова (Малый Таймыр, Песчаный, Столбовой и Бельковский).

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

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

Рельеф и строение побережья разнообразно на разных участках, все дело в различных морфологических типах берегов: абразионных и аккумулятивных, а также местами ледяных.

Море Лаптевых полностью занимает шельф, часть материкового склона и ложа океана. Следовательно, рельеф дна можно назвать равниной. На ней находятся желоба, банки (Семёновская, Васильевская) и возвышенности. Большая часть моря мелководная (25-50 м), а на севере становится глубже (100-2000м)[3].

Для моря Лаптевых характерно следующее:

- большая удаленность от Атлантического и Тихого океана;
- высокоширотное положение;
- самое суровое море среди арктических морей, из-за влияния близости азиатского материка и льдов.

1.2 Климат

Климат моря относится к континентальному, с морскими чертами. Это выражается в больших годовых колебаниях температуры воздуха. Так как море обладает большой протяженностью с юго-запада на северо-восток, то это создает климатические различия от места к месту, выраженные по сезонам [3]. В целом, климат можно охарактеризовать как суровый. Это объясняется следующими факторами:

- расположение моря в высоких северных широтах;
- специфика циркуляции атмосферы в исследуемом районе;
- радиационный баланс;
- особенности подстилающей поверхности.

Зима холодная с редкими штормами, но с метелями. В целом, всю зиму стоит морозная погода с малой облачностью и высокой относительной влажностью воздуха. Для лета нередки туманы, поэтому погода стоит холодная и сырая[4].

Ветровой режим. Зависит от расположения барических полей и градиентов давления и от их проявлений в различные сезоны года. Повышенные средние скорости ветра характерны для центральной части моря, причем, наблюдаются они практически круглый год. Их значения составляют 6-7 м/с. Пониженные средние скорости наблюдаются в северо-восточной части моря и иногда над материком, равны 5 м/с. Интенсивность ветра меняется незаметно, переходя от сезона к сезону, а годовая амплитуда достигает только 2 м/с. Основным фактором, который влияет на усиление ветра в проливах, является рельеф [5].

Температурный режим моря определяется следующими факторами:

- континентальный климат;
- отдаленность моря от Исландского и Алеутского минимумов;
- преобладающее воздействие Сибирского антициклона зимой.

Поэтому в море Лаптевых величины годовых колебаний среднемесячных температур воздуха могут составлять 40-42°C на юге и 30°C на севере. Однородная температурная ситуация происходит зимой, так как различия температуры воздуха составляют не более 4°C. Для территории моря характерны аномалии температуры воздуха в период с ноября по март: теплее бывает на севере моря, а холоднее, наоборот, на юге. С января по февраль вблизи берегов температура воздуха может достигать 32°C. При движении на север температура меняется мало и становится равна -29°C. В апреле наступает весна, происходит активное действие солнца, происходит повышение количества поступающей солнечной радиации. Температура воздуха возрастает с севера на юг, меняясь от -22°C до -19°C. Летом материк хорошо прогрет и температура может достигать 8°C на побережье, что касается акватории моря, то температура воздуха близка к нулевой отметке. Раньше всего теплеет в Янском и Оленекском залива, это происходит в июне. А переход температуры воздуха через 0°C на севере моря приходится на июль.

Зимой преобладает область высокого давления. Летом она заменяется низким давлением. В одинаковой степени преобладают северные и южные ветра, причем, они не имеют конкретного направления, несильные и порывистые. Хотя температура воздуха понемногу увеличивается, но все равно сохраняется холодная погода. При наступлении лета погода становится пасмурной с осадками в виде дождя, это происходит из-за действия циклонов. Превалирующий ветер – северный, со скоростью до 4 м/с. Обычно сильных ветров не бывает летом. Максимальная температура воздуха приходится на август и меняется от 1°С до 5°С [5]. Иногда отмечались аномальные значения температуры воздуха, так в период с января 2005 года по май 2017 была зафиксирована максимальная температура воздуха 30,4°С в посёлке Тикси (5 июля 2005 года). Минимальная температура воздуха была зафиксирована 7 ноября 2008 года и составила -58,9°С [6].

1.3 Гидрология моря

Огромное значение на влияние гидрологического режима моря Лаптевых оказывают следующие факторы:

- суровость климата;
- свободный водообмен с СЛА;
- отсутствие тепляющего воздействия из-за отдаленности от Тихого и Атлантического океанов;
- наличие льдов почти весь год на большей части территории моря (частичное отсутствие льда в августе и сентябре);
- влияние Сибирского антициклона, при его действии происходит охлаждение воздуха: в зимние месяцы температура воздуха может достигать от -26 до -29 °С, ветровой режим при этом спокойный;
- большой материковый сток.

Температура воды в течение года стремится к температуре замерзания, это определяется длительным наличием низких температур воздуха. Величины температур повышаются с запада на восток и с севера на юг[2].

Рассмотрим рисунок 1.2, на котором показано распределение температуры воды в поверхностном слое моря в зимний период.

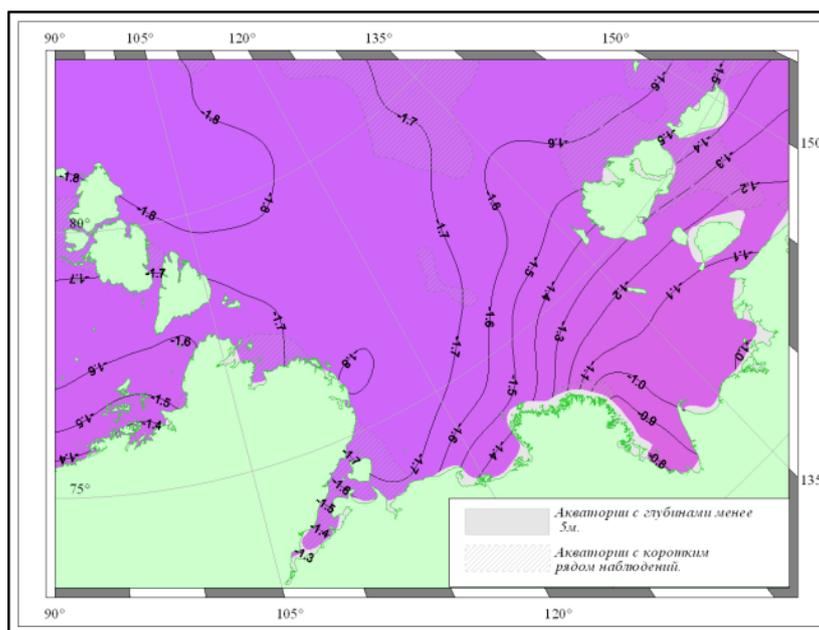


Рисунок 1.2 – Распределение температуры поверхности моря Лаптевых в зимние месяцы [7]

Из рисунка 1.2 видно, что зимняя температура поверхности моря меняется в пределах от $-0,8$ до $-1,8^{\circ}\text{C}$ от южных берегов, где располагаются устья таких рек как Хатанга, Лена, до северо-западной оконечности моря. В прибрежной зоне температура воды колеблется от -1°C до $1,2^{\circ}\text{C}$.

Что касается материковой отмели, вода в придонном слое в открытом море обладает температурой $-1,6^{\circ}\text{C}$. А что касается глубоководных районов, которые находятся на северо-западе, наименьшая температура воды у дна составляет $-0,7^{\circ}\text{C}$ [7].

Летом температура воды во многом определяется расположением кромки льда. Ведь последняя будет указывать на площадь моря, которая нагревается в летние месяцы.

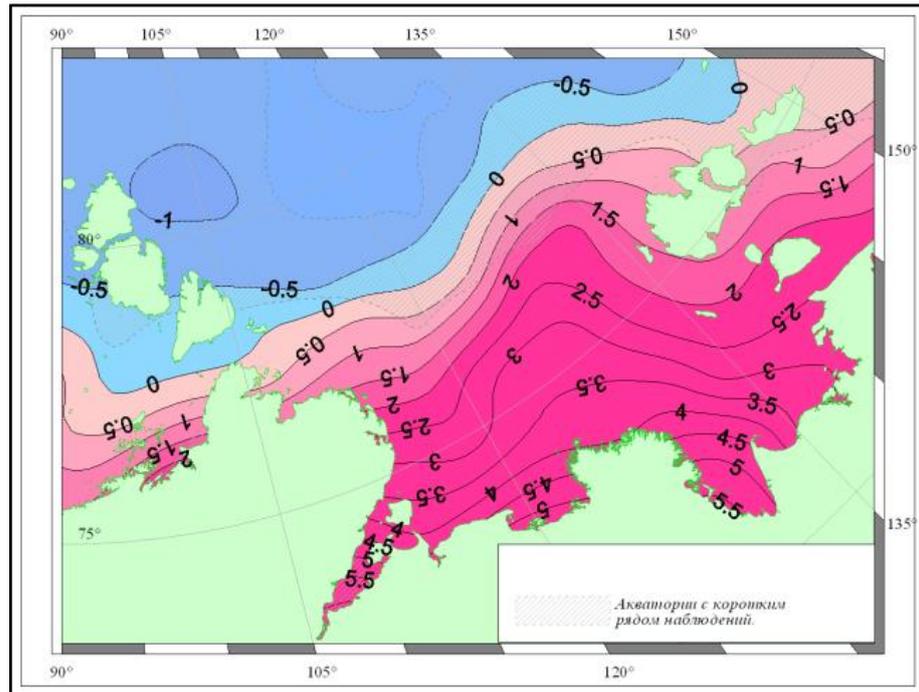


Рисунок 1.3 – Распределение температуры поверхности моря Лаптевых в летние месяцы [7]

Опираясь на рисунок 1.3 можно сделать ряд умозаключений относительно распределения поверхностной температуры моря в летние месяцы. Во-первых, температура воды на поверхности моря на севере низкая в сравнении со всей акватории моря, так как северная часть моря по большей степени покрыта льдом (следовательно, этот участок обладает большой отражательной способностью: до 70% поступающей солнечной радиации отражается в атмосферу обратно). Здесь температура поверхности может прогреться до 2-3°C, но только в образовавшихся полыньях между льдами. Во-вторых, в центральных районах температура воды в поверхностном слое достигает 3-4°C. В-третьих, на хорошо прогретой территории моря, на юго-востоке, температура воды может достигать 6-7 °C.

Также можно наблюдать прогрев температуры воды в поверхностном слое от 5°C до 10°C на восточных берегах полуострова Таймыр и архипелага Северная земля. В этих местах отмечается наличие заприпайных полыней, а

именно в них накапливается большое количество солнечной энергии, что и влечет за собой прогрев этих частей моря. В устьях рек летняя температура воды равна 6-7°C, у кромки льда 0°C, а в открытом море, безо льда, 2-4°C[7].

Солёность(S). Значения этой характеристики в море Лаптевых неодинаковы: 1-35‰. В целом, воды можно охарактеризовать как опресненные ($S = 20-30‰$). Солёность увеличивается с юго-востока на север и северо-запад. Информация о её изменении по сезонам года и частям моря представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 –Распределение значений солёности в летний и зимний сезон в разных частях моря Лаптевых [5]

Часть моря	Значения солёности, ‰	
	лето	зима
Юго-восток	10-20	20-30
Северо-запад и север	26-30	31-33
Заприпайные полыньи	более 34	
Придонный слой	32-34.5	

Низкие летние значения солёности на юго-востоке объясняются значительным речным стоком рек Лена и Хатанга(см. рисунок 1.4). Для этой области моря в данный сезон характерны высокая температура поверхности моря и низкая солёность, к этому выводу можно прийти, если сравнить рисунки 1.4 и 1.5.

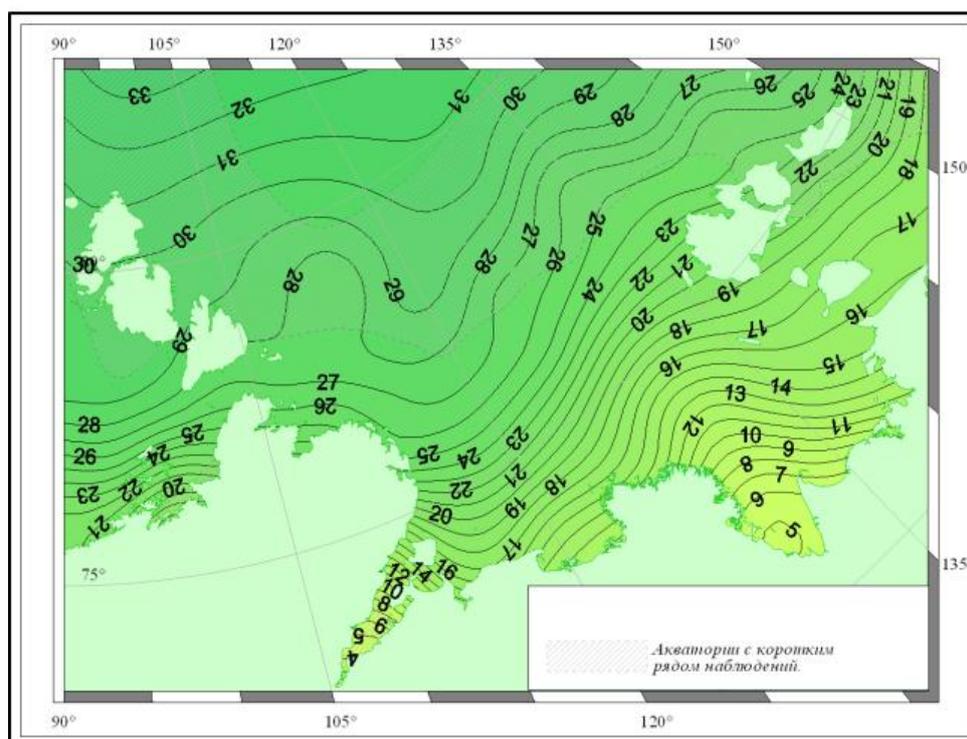


Рисунок 1.4 – Распределение солёности на поверхности моря Лаптевых летом [7]

Говоря о распределении солёности зимой, не стоит забывать о значении выделения солей при льдообразовании. Следовательно, когда образуется лёд, то солёность понижается. В районах стока речных вод, где летом море освобождается ото льда, зимой происходит интенсивное замерзание льда. А это приводит к повышению значений солёности до 22-25‰ (см. рисунок 1.5). Если же сравнивать значения летом и зимой в центральной части моря, то можно заметить что происходит изменения характеристики в пределах 5‰.

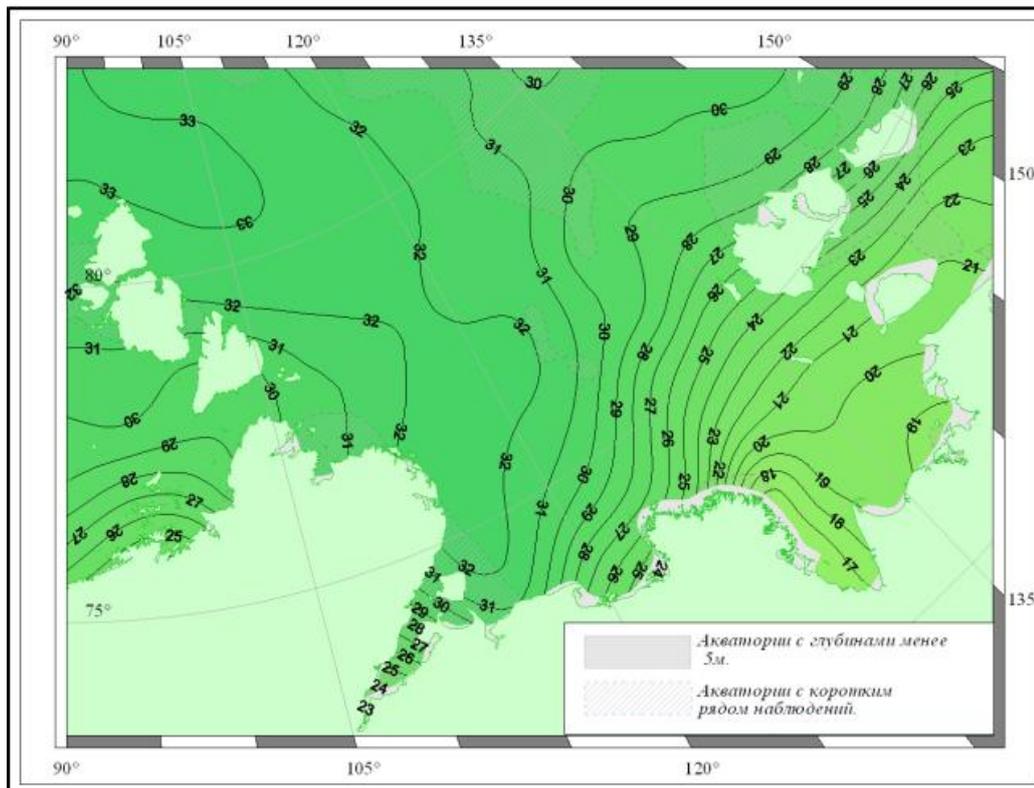
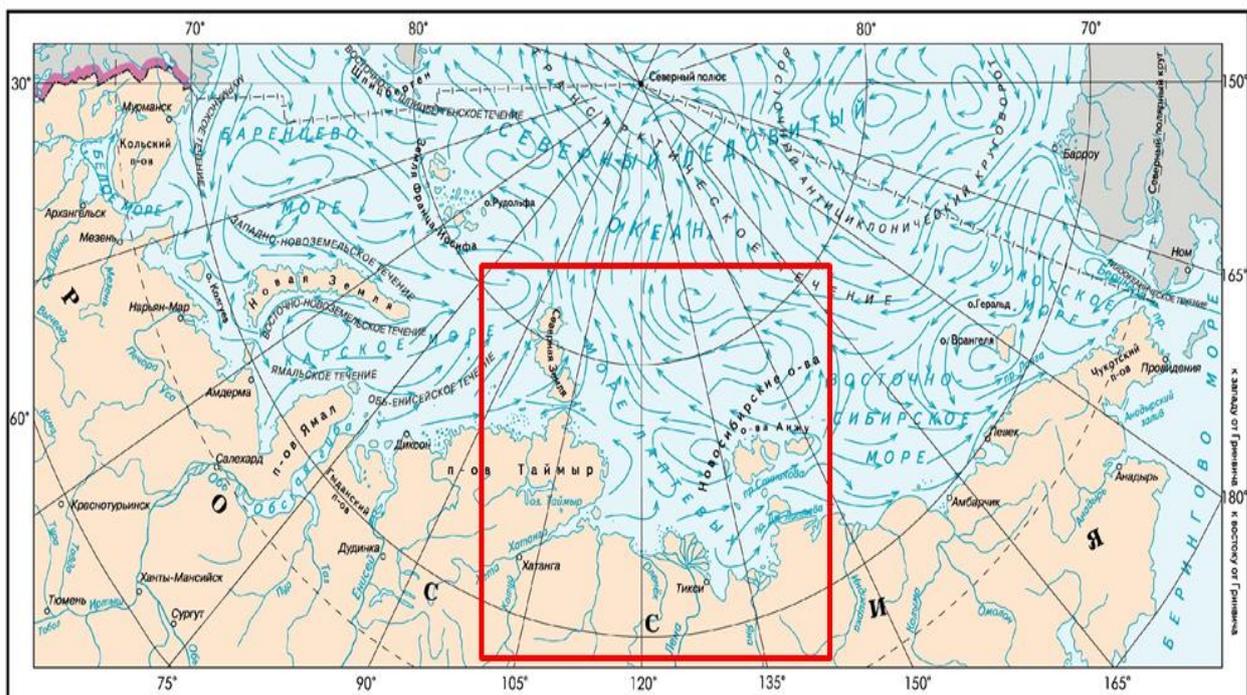


Рисунок 1.5 –Распределение солености на поверхности моря Лаптевых зимой [7]

Течения. Для моря Лаптевых характерен циклонический круговорот (против часовой стрелки). При этом происходит перенос вод поверхностного слоя с запада на восток вблизи береговой линии (усиливается Ленским течением) [8]. Около восточных берегов поток вод отклоняется на север и северо-запад, становится Новосибирским течением, попадает в Северно-Ледовитый океан. Далее соединяется с Трансарктическим течением в арктических водах, от него около северной части Северной Земли поверхностные воды ответвляются на юг в виде Восточно-таймырского течения [9]. Последнее движется вдоль востока Северной Земли и полуострова Таймыр на восток, таким образом, круговорот смыкается (рисунок 1.6). Некоторый объем вод южной части моря переходит в Восточно-Сибирское море через проливы Санникова и Лаптева [3].



Масштаб 1:25 000 000

Рисунок 1.6 – Циркуляция вод на поверхности в Российском секторе Арктики (красный квадрат – море Лаптевых)[8]

В целом скорости течений не превышают 2 см/с. Из рисунка 1.6 видно, что центр круговорота находится в северной части моря, но иногда может смещаться к Северной Земле. Из-за этого могут возникнуть ответвления от главных потоков. Необходимо принимать во внимание нарушение постоянных течений приливами[3].

Приливы образованы приливной волной из Атлантики, которая движется с севера к берегам евразийского материка. В большинстве своем приливы полусуточные, за исключением Северной Земли, части п-ва Таймыр и Эбеляхской губы с островом Бол. Ляховский [8]. В этих местах преобладает неправильный полусуточный прилив (рисунок 1.7).

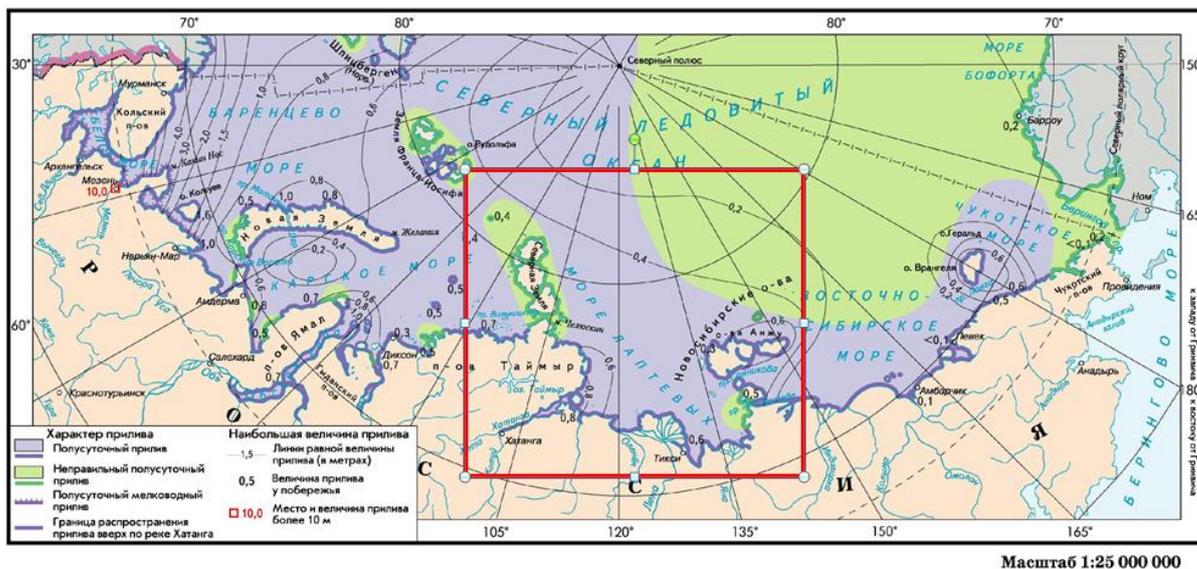


Рисунок 1.7 – Характер и наибольшая величина прилива в Российском секторе Арктики (красный квадрат – море Лаптевых) [8]

Из рисунка 1.7 видно, что величина прилива невелика: 0,5-0,8 м. Причем, минимальный прилив отмечается в дельте реки Лена, так как из-за наличия большого количества протоков прилив будет угасать, волна теряет свою энергию.

В Хатангском заливе бывают приливы выше 2 метров в сизигии. Это происходит из-за того, что форма залива изменяется: ширина постепенно сужается, а глубина уменьшается. Приливная волна в таком случае распространяется очень далеко по реке Хатанга[3].

Для моря Лаптевых характерно наличие сезонных и стонно-нагонных колебаний уровня. Информация о них представлена в таблице 1.2.

В целом, море Лаптевых можно охарактеризовать как спокойное, так как ветры слабы, глубина моря невелика, а на территории моря находятся постоянные льды[3]. В среднем волнение составляет 2-4 балла при высоте волн 1 м. Максимальные волны (4-6м) преобладают осенью[5].

Таблица 1.2– Колебания уровня в море Лаптевых [5]

Сезонные	Сгонно-нагонные
<ul style="list-style-type: none"> • Незначительны • Преобладают на юго-востоке моря • Встречаются в областях около устьев рек • Размах колебаний всего 40 см • Максимальная высота в летний период • Минимальная высота в зимний период 	<ul style="list-style-type: none"> • Наблюдаются на всей территории во все сезоны года • Значимые колебания находятся в юго-восточной части моря • От них напрямую зависят максимальные и минимальные колебания уровня • Размах колебаний между сгонами и нагонами до 2 м • В бухте Тикси размах равен 2.5 м • Чаще всего сгонно-нагонные колебания происходят осенью при сильных и устойчивых ветрах • Обычно при северном ветре происходит нагон, а при южном – сгон • На юго-востоке нагоны образуют западные и северо-западные ветра. •

1.4 Ледовая обстановка

С октября по май море покрыто льдами различного возраста и толщины. Процесс льдообразования берет начало в конце сентября и распространяется на всю территорию моря. Зимой на востоке – обширный припай до 2 м. В западной и северо-западной части моря припай небольшой либо вообще отсутствует. Площадь припая составляет 30% площади всего моря [3]. Взлом припая приходится на июль, в первую очередь это происходит в устьях рек Лена и Хатанга[8].

На море отмечаются значительные пространства полыней и молодого льда. Ширина составляет от десятков до нескольких сотен километров. К ним относятся Восточно-Североземельская, Таймырская, а Ленская и Новосибирская летом даже становятся центром очищения моря ото льда. Более того их площадь увеличивается и может достигать тысячи квадратных километров. Лед начинает таять в июне-июле. В августе море освобождается ото льдов. В летний период кромка льда меняет свое положение из-за действия течений и ветров.

Восточная часть моря менее ледовитая, чем западная. В море встречаются тяжелые многолетние льды, вдоль восточного берега полуострова Таймыр, так как здесь в море спускается отрог океанического Таймырского ледяного массива. Он сохраняется до нового льдообразования и может двигаться и к югу, и к северу, все зависит от деятельности ветров. Из припайного льда образуется локальный Янский ледяной массив. Этот массив обычно стаивает к третьей декаде августа, либо если не растает до конца, то уносится выше, на север за пределы моря[3].

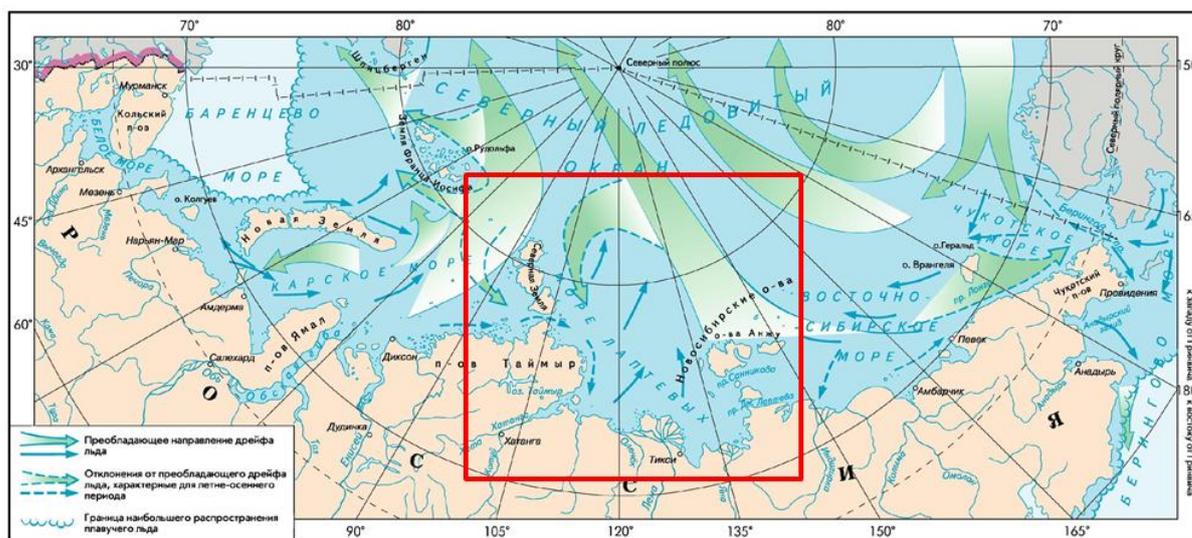


Рисунок 1.8 – Движение льда в Российском секторе Арктики [8]

Опираясь на рисунок 1.8 можно пронаблюдать, как происходит движение льда по всей акватории моря. Преобладающее направление дрейфа

льда – северное, но в летне-осенний период происходит отклонение от основного потока движения льда в юго-западную часть моря, к берегам Северной Земли. Так же ответвление происходит вдоль восточных берегов полуострова Таймыр по направлению к южной оконечности материка.

2. Методы исследования и исходные данные

2.1 Исходные данные

Источник исходных данных: международный Тихоокеанский научно-исследовательский центр при школе технологии, наук о земле и океана Гавайского университета в Маноа. Эта организация сфокусирована на изучении и исследовании Азиатско-Тихоокеанского региона. Главная цель центра заключается в обеспечении международного исследования окружающей среды для того, чтобы улучшить представление человечества о природе, изменении климата и дальнейшее его предсказание, а также использование инновационных путей использования полученных знаний на благо общества. В этом центре создана база данных Asia-PacificData-ResearchCenter (APDRC) – Азиатско-Тихоокеанская база данных и исследовательский центр – обеспечивает простой доступ к огромному количеству климатических данных по нескольким серверам и еще проводит ряд исследований для их улучшения [10]. Использовался сервис LAS, который предоставляет доступ к данным с географической привязкой и формирует сетку данных

Данные по ледовитости моря Лаптевых были взяты из базы данных OISST, расположенной по адресу: http://apdrc.soest.hawaii.edu/dods/public_data/NOAA_SST/OISST.

Тип данных: ежемесячные значения концентрации льда (%) в сетке $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Данные получены со спутника NOAA при использовании метода оптимальной интерполяции. Временной промежуток: январь 1982 года по июль 2016 года.

Местоположение: Россия, море Лаптевых. Координаты квадрата данных: 81.5°с.ш., 96.5°в.д. – 70.5°с.ш., 96.5°в.д. – 70.5°с.ш., 139.5°в.д. – 81.5°с.ш., 139.5°в.д. Карту исходных данных можно увидеть на рисунке 2.1.

Для дальнейшей работы необходимо было отсортировать данные, для этого использовалась программа, написанная на языке программирования FORTRAN. Так как регион моего исследования море, а не суша, необходимо было избавиться от точек, принадлежащих к суше (значения сплоченности становятся равны 1.E+33). Для этого в MicrosoftExcel была проведена фильтрация данных. То же самое необходимо было сделать с точками, где никогда не было льда (значения сплоченности в данных точках равны 0).

В итоге, после всех действий был получен новый массив данных, с точками, принадлежащими только акватории моря Лаптевых.

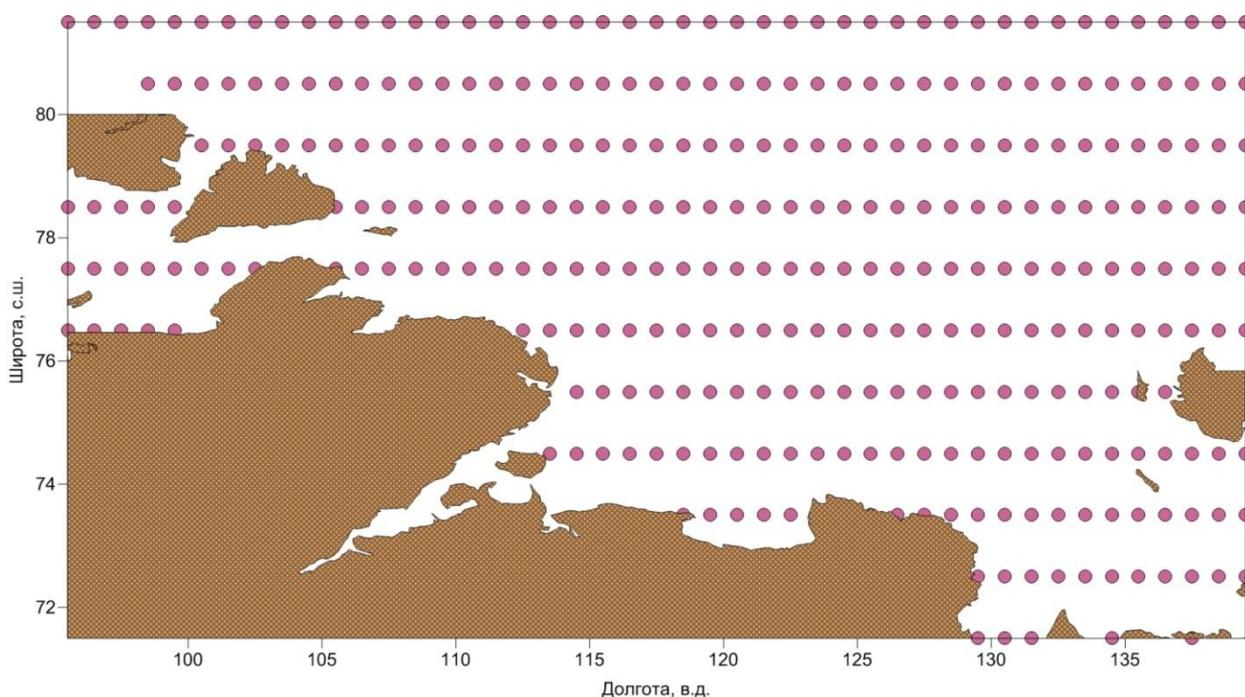


Рисунок 2.1 – Географическая сетка исходных данных о ледовитости

2.2 Статистические методы исследования

В работе были использованы следующие статистические методы исследования: выделение тренда и проверка его на значимость, кластерный анализ, вейвлет-анализ и спектральный анализ.

Для визуального представления результатов (карты) была проведена работа с программой Surfer.

2.2.1 Анализ временного тренда

Существует несколько определений термина «тренд».

Тренд – это наличие у исследуемого ряда данных тенденции изменения во времени.

Тренд отражает наличие в генеральной совокупности исследуемой характеристики длиннопериодного колебания с периодом, значительно превышающим длину выборки.

Тренд бывает линейным или квадратичным (нелинейным). Уравнение линейного тренда:

$$y = a_1 t + a_0 ,$$

где y – исследуемая характеристика,

t – время.

Уравнение нелинейного тренда представлено в виде:

$$y = a_2 t^2 + a_1 t + a_0,$$

где t – время,

y – исследуемая характеристика.

Основными характеристиками тренда:

1. Вклад тренда в общую дисперсию ряда. Определяется по коэффициенту детерминации R^2 . Если R^2 значим, то тренд есть (вклад значительный). Если наоборот, то тренда нет (вклад незначительный).

Проверка на значимость – определение значимости коэффициента корреляции R_s помощью критерия Стьюдента;

2. Величина тренда – изменение характеристики по линейному тренду за определенный промежуток времени. Определяется из уравнения тренда и соответствует коэффициенту a_1 . [11];

Итак, проверка тренда на значимость осуществляется с помощью оценки на значимость коэффициента регрессии a . В основе этой оценки лежит проверка нулевой гипотезы $H_0: a=0$; при ее альтернативной гипотезе $H_1: a \neq 0$. Для этого рассчитываем критерий Стьюдента для каждого ряда данных, пользуясь следующей формулой:

$$t_a^* = \frac{a}{\sigma_a} \text{ при } \sigma_a = \frac{\sigma_y (1-R^2)}{\sigma_x \sqrt{N-1}},$$

где σ_a – стандартная случайная погрешность коэффициента a ;

R – коэффициент корреляции (сплочённость льда и время);

σ_y, σ_x – стандартное отклонение зависимой (сплочённость льда) и независимой переменной (время);

N – длина ряда, равна 35.

Значение критического коэффициента Стьюдента рассчитывается как $t_{кр}(\alpha, \nu) = 2,03$ определяется по уровню значимости α (принимается равным 5%) и числу степеней свободы $\nu=N-1$, где $N = 35$ –длина ряда. При сравнении t^* по модулю с $t_{кр}$ были выявлены точки, где значим или незначим коэффициент регрессии, а по этому уже делается вывод о значимости тренда. Если коэффициент значим, то и тренд значим, и наоборот [11] Такой методикой пользовались в разделе 3.2.

Значимость трендов выполнялось при помощи проверки на значимость коэффициента корреляции R исходного ряда с рядом времени. Для этого пользуются критерием Стьюдента. Расчетное значение необходимо рассчитывать по формуле:

$$t^* = \frac{R}{\sigma_R}, \sigma_R = \frac{1-R^2}{\sqrt{N}} - 1,$$

где σ_R – стандартное отклонение коэффициента корреляции

R – коэффициент корреляции,

N – длина ряда, равна 35

Значение критического коэффициента Стьюдента рассчитывается как $t_{кр}(\alpha, \nu) = 2,03$ определяется по уровню значимости α (принимается равным 5%) и числу степеней свободы $\nu = N - 1$, где $N = 35$ – длина ряда. Далее сравнивается рассчитанное значение с критическим и делается вывод о значимости R и, в дальнейшем, о значимости тренда [11].

От значимых трендов необходимо избавиться путем вычитания трендовой составляющей из исходного ряда. Дальнейшую работу и анализ целесообразно осуществлять с рядом без тренда.

2.2.2 Вейвлет - анализ

Вейвлет-анализ – перспективная технология анализа данных, используется в анализе пространственных полей или временных рядов в различных масштабах. Анализирующая функция одномерного вейвлет-преобразования хорошо локализована во времени и пространстве. Это преобразование разлагает анализируемый процесс на составляющие его волны, а так же дает представление о локализованной во времени информации исследуемого процесса масштабно-временная развертка позволяет выявить осцилляции с хорошо фиксированным периодом, а также локальные периодичности [12,13]. В работе вейвлет-преобразование проводилось в программе Past3. Этот метод новый, поэтому были подробно изучены алгоритмы действия этого анализа. Итак, чтобы осуществить вейвлет-преобразование необходим столбец данных, значения в котором расположены по порядку и не наблюдаются пропуски между исследуемыми значениями. Непрерывное вейвлет-преобразование является методом анализа, при котором набор данных может быть одновременно разных масштабов: от малых до больших. Это свойство может быть полезно для выявления периодичностей при разных длинах волн [13]. Результатом

вейвлет-анализа является скалограмма, пример которой представлен на рисунке 1.9. Скалограмма показывает видимые изменения в силе и частоте явления с течением времени.

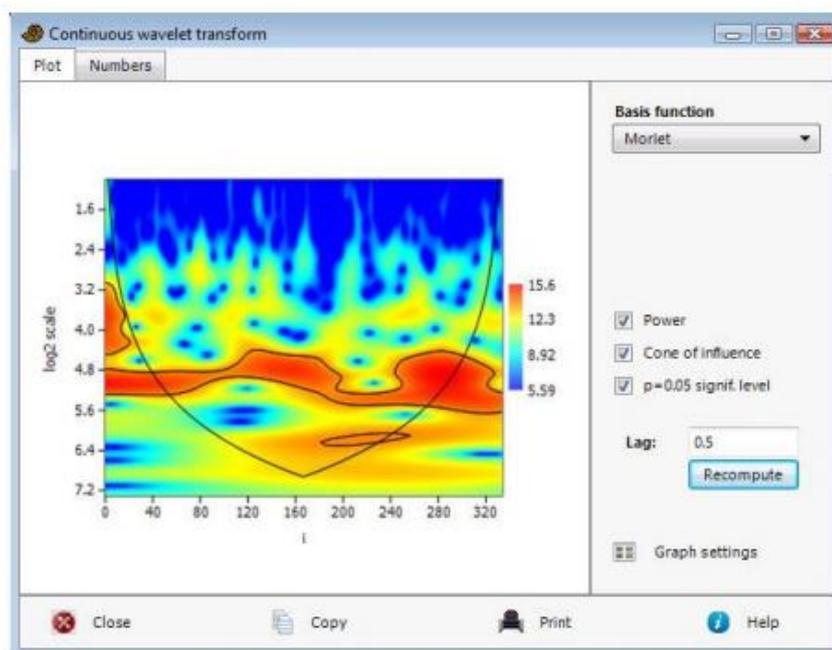


Рисунок 2.2 – Пример вейвлет-преобразования в программе Past3 [13]

На нем вертикальная ось – логарифмическая шкала, с наблюдаемым сигналом в масштабе двух последовательных точек данных вверху, и в масштабе одной четверти всей последовательности в нижней части. Единица на оси соответствует удвоенному размеру шкалы.

К базовым функциям вейвлет-разложения относятся:

- Coneofinfluence – «конусвлиания». С помощью этой функции можно графически выделить область, в которой граничные эффекты не учитываются.
- Sampleinterval – «интервал выборки». Значение этого параметра может быть отличным от единицы. Это, главным образом, влияет на масштабирование сетки по осям.
- Significancetest – проверка на значимость. Уровень значимости ($p=0.05$) отмечается в виде контура.

- Lag – запаздывание. Это значение задается пользователем и указывается как нулевая гипотеза. Lag=0 – модель «белый шум»; $0 < \text{Lag} < 1$ – модель «красный шум».
- Power – мощность. Если это параметр не выбран, то программа показывает только реальную часть скалограммы. Это показывает сигнал во времени, отфильтрованный для различных шкал.
- Viewnumber. Эта строка показывает одну шкалу, с порядковым номером вдоль колонки.

В программе PAST3 вейвлет-анализ проводится на основе вейвлета Морле порядка 6 (theMorletwavenumber 6) [13]

2.2.3 Спектральный и гармонический анализ

Спектральный и гармонический анализ используется, чтобы выявить в исследуемом процессе циклические составляющие используют гармонический или спектральный анализ. В основе лежит то, что любой ряд мы можем разложить в ряд Фурье. Ряд Фурье – полная совокупность гармоник. Гармоники – это тригонометрические функции, имеющие период, кратный длине ряда, иными словами, каждая гармоника целое число раз укладывается в длину исходного ряда.

Уравнение гармоника:

$$G_k = A_k \cos(\omega_k t - \varphi_k), \omega_k = 2\pi/T_k,$$

Гдек – номер гармоника

A_k – амплитуда k-той гармоника

ω_k – частота

T_k – период

Φ_k – фаза

t – время

На основании коэффициентов Фурье a_k и b_k определяются следующие характеристики гармоники:

- амплитуда гармоники A_k ;
- фаза гармоники φ_k ;
- дисперсия гармоники D_k ;
- вклад гармоники в общую дисперсию ряда V_k , который является аналогом коэффициента детерминации R^2 . Значит, вклад может быть проверен на значимость. При проверке можно сделать вывод о значительном вкладе в дисперсию ряда или незначимости гармоники [11].

2.2.4 Кластерный анализ

Кластерный анализ относится к совокупности методов классификации, с помощью которых можно классифицировать многомерные наблюдения. Основная цель – образование схожих между собой групп исследуемых наблюдений, носящих название кластер/группа/класс [14].

В данной работе кластерный анализ проводился в программе STATISTICA при использовании метрики 1-г (единица минус коэффициент корреляции Пирсона). Метрика позволяет сделать классификацию по типу изменчивости. Таким образом, получается, что в классы объединяются объекты, высококоррелированные между собой [15]

При выполнении кластерного анализа использовался Метод Уорда. Этот метод относится к иерархическим агломеративным методам кластерного анализа. Агломеративность подразумевает под собой объединение отдельных частей в группы или классы [16, 15]. Сущность данного метода заключается в следующем: на первом шаге каждый кластер состоит из одного объекта. Сначала объединяются два ближайших кластера. На последующих шагах происходит объединение до тех пор, пока все объекты не объединятся в один кластер либо при достижении фиксированного порога сходства [16].

Для разделения на классы использовалось построение дендрограммы (дерево классификации). Объекты объединяются в классы сначала по близости этих объектов друг от друга(или по мере сходства), затем группы объектов постепенно теряют свою связь между собой. Все это хорошо поддается геометрической интерпретации [16, 17].

3 Исследование ледовитости моря Лаптевых в условиях изменяющегося климата

3.1 Разделение внутригодовой изменчивости ледовитости на летний и зимний сезоны

При анализе исходных данных и климатического состояния (см. раздел 1.1) моря Лаптевых было выявлено, что сезоны года неоднородны, на это оказывает влияние следующие факторы: речной сток, влияние дрейфа льда, батиметрия, течения. Поэтому задачей стало разделение внутригодовой изменчивости ледовитости на летний и зимний сезоны. Для этого придуман алгоритм разделения сезонов. Сначала рассмотрена внутригодовая изменчивость сплоченности льда в некоторых точках моря. Например, на рисунке 3.1 представлен график временной изменчивости сплоченности льда в море Лаптевых в точке с координатами 74°30' с.ш. 131°30' в.д.

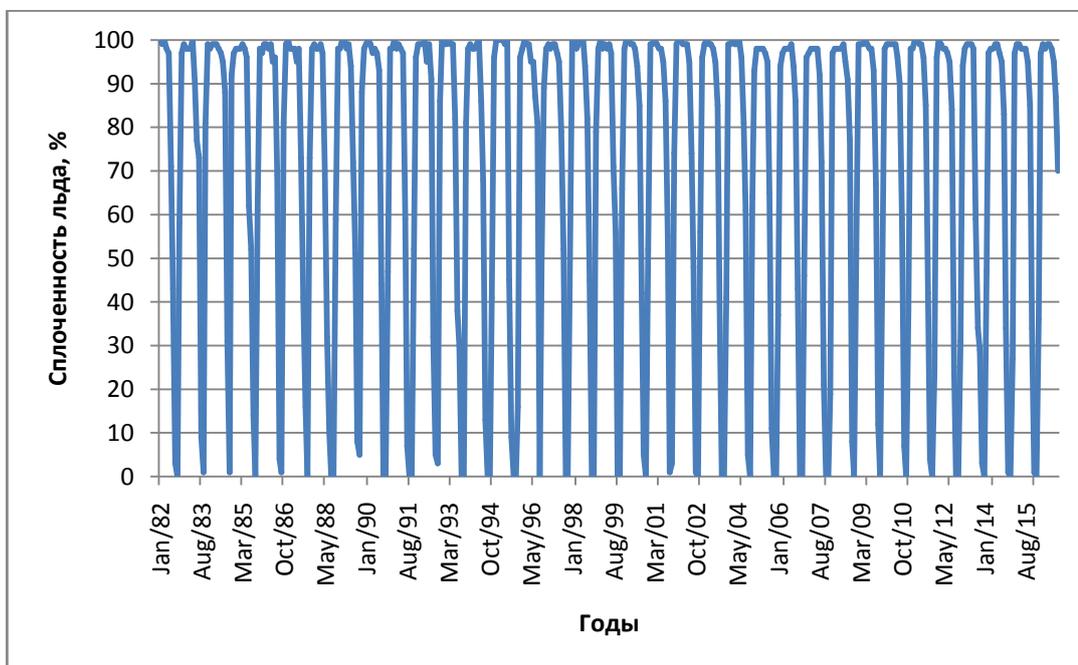


Рисунок 3.1 – Временная изменчивость сплоченности льда в море
Лаптевых в точке с координатами 74°30' с.ш. 131°30' в.д

Так определили, что в течение зимы ледовитость изменяется незначительно – в пределах 10 процентов, а переход к лету достаточно быстрый. Поэтому за начало летнего сезона была принята ситуация стаивания льда более, чем на 10 процентов и наоборот, нарастания – для зимы. Таким образом, была определена длительность летнего сезона за каждый год в каждой точке.

Из этих значений получены средняя продолжительность лета в каждой точке. На карте (рисунок 3.2) видно, что количество летних месяцев уменьшается с юга на север. Причем, в дельтах рек (Хатанга и Лена) продолжительность лета максимальная и достигает 6-7 месяцев, а на крайнем севере – 1-2 месяца.

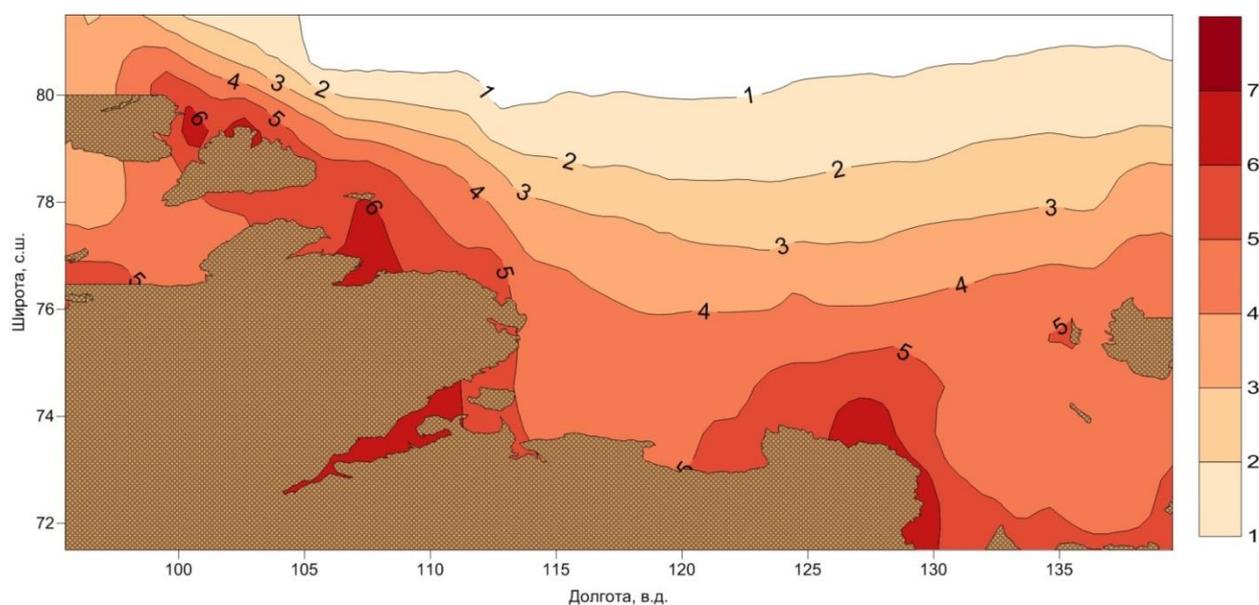


Рисунок 3.2 – Средняя продолжительность лета в море Лаптевых в каждой точке за 35 лет (1981-2016 гг.)

Стоит отметить, что после определения сезонов было выявлено, что в некоторых точках в последние 8-10 лет (начиная с 2005 года) полностью отсутствовали зимние месяцы. Там сплочённость льда на протяжении этих лет не превышала 87% (критическая величина определения принадлежности к летнему или зимнему периоду). Было рассчитано, сколько лет в каждой

точке отсутствовали зимние месяцы. Рисунок 3.3 отражает описанную ситуацию. Долгая продолжительность лета характерна для южных, юго-западных и юго-восточных границ моря Лаптевых.

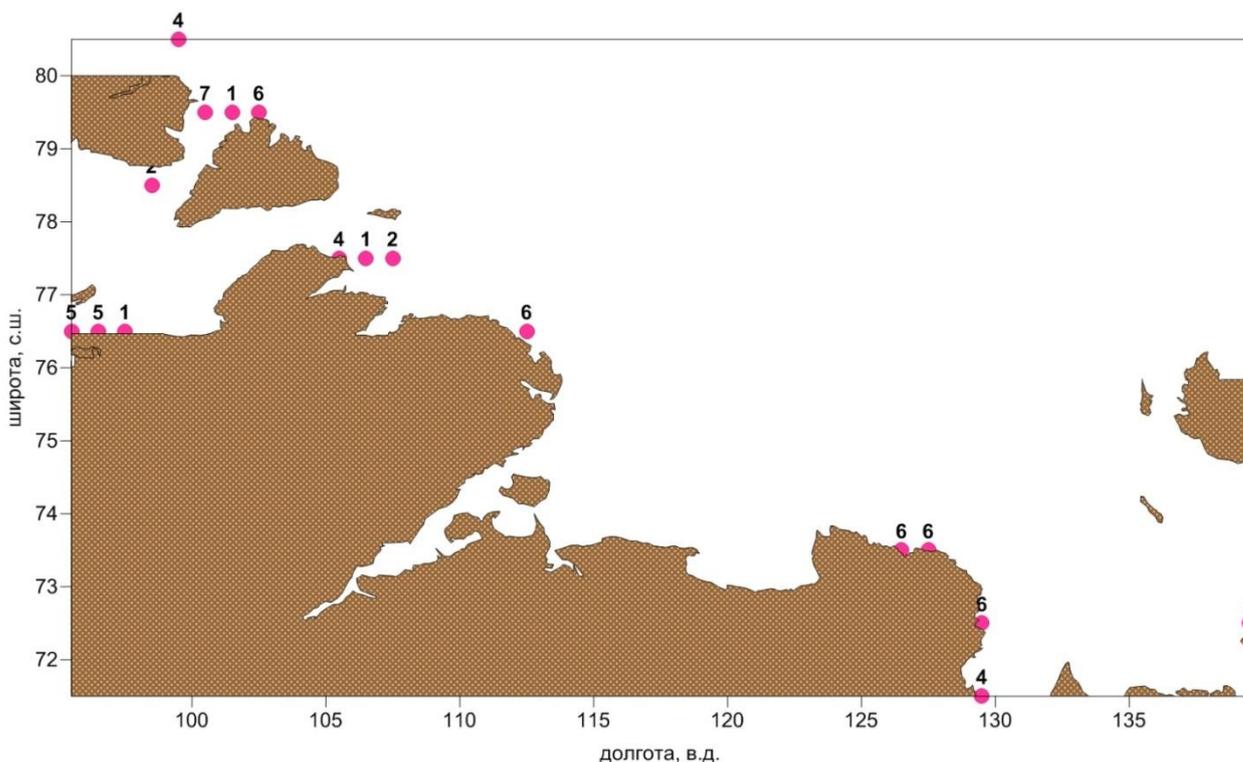


Рисунок 3.3 –Расположение точек с отсутствующим зимним периодом(с ледовитостью менее 87%) за период с 2009 по 2016 гг. Указано количество малоледных лет.

На рисунке 3.3 указано количество лет, в которых ледовитость зимой не превышала 87%. Таким образом, можно сделать вывод, что с 2009 года началось заметное потепление на акватории моря Лаптевых. Выявленные на рисунке 3.3 точки приурочены к районам максимальной летней продолжительности, которая указана на рисунке 3.2.

Дальнейшее исследование проводилось для ледовитости, усредненной за зимний период. Основная цель – исследование ледовитости Арктических морей – связана с оценкой возможности их использования в хозяйственной деятельности страны. Летом льды стаивают – нет проблемы для прохода судов. Если зима становится суровой, длительной, со значительным

количеством льда будет проявляться сложность для прохождения судов по Северному Морскому пути. Тогда становится необходимым оценить перспективы использования Северного Морского пути в зимние месяцы.

3.2 Среднее многолетнее состояние ледовитости моря Лаптевых в зимний сезон

Для средних за зиму значений ледовитости были рассчитаны среднее значение и среднеквадратическое отклонение, которые отражают среднее климатическое состояние моря. Карты этих характеристик представлены на рисунках 3.4 и 3.6.

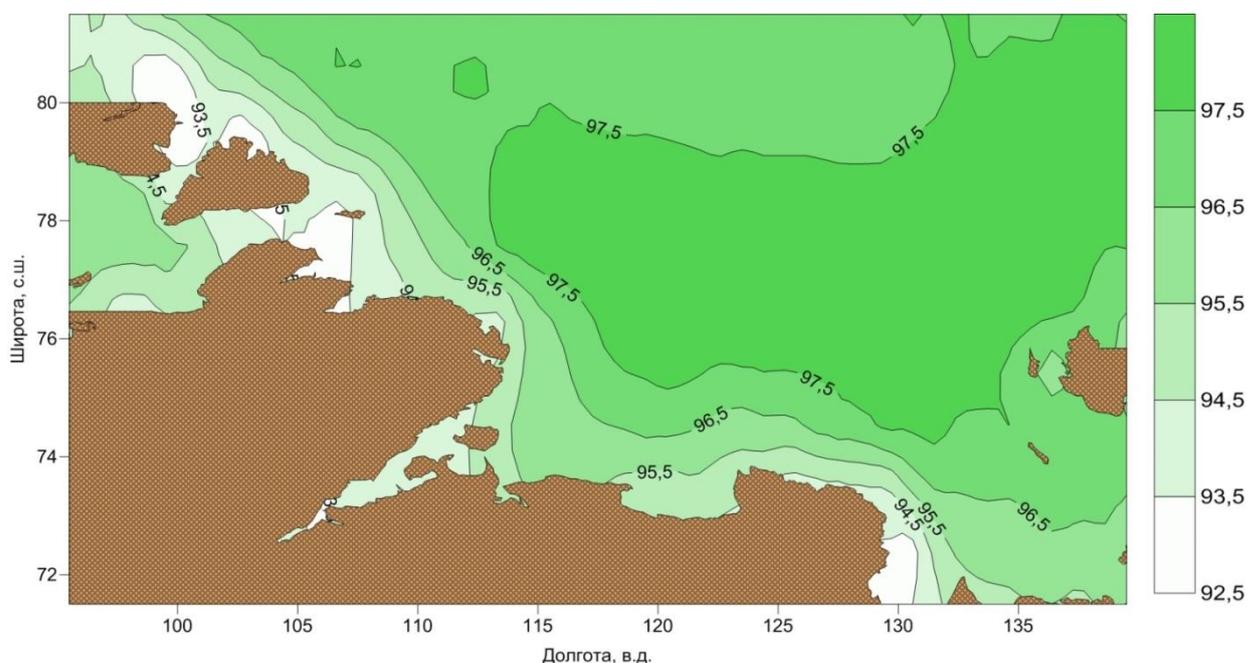


Рисунок 3.4 – Среднее значение сплоченности льда моря Лаптевых (зимний период 1981-2016 гг.)

Из рисунка 3.4 видно, что на акватории моря Лаптевых нарушено среднеширотное распределение ледовитости: при приближении к северу сплоченность льда уменьшается. Лишь в восточной и центральной частях моря наблюдается область повышенной сплоченности льда. Здесь ее значения выше 97,5 %. В целом, средние значения составляют от 92,5-98,5 %.

Наименьшая сплоченность в море Лаптевых наблюдается в западной части по восточному побережью полуострова Северная Земля, а так же в устьях рек Хатанга и Лена (здесь происходит влияние распресненных вод).

Чтобы выяснить, чем же объясняется аномалия льда в центрально-восточной части была построена 3D-карта батиметрии района, на которую были наложены изолинии средних значений ледовитости (см. рисунок 3.5)

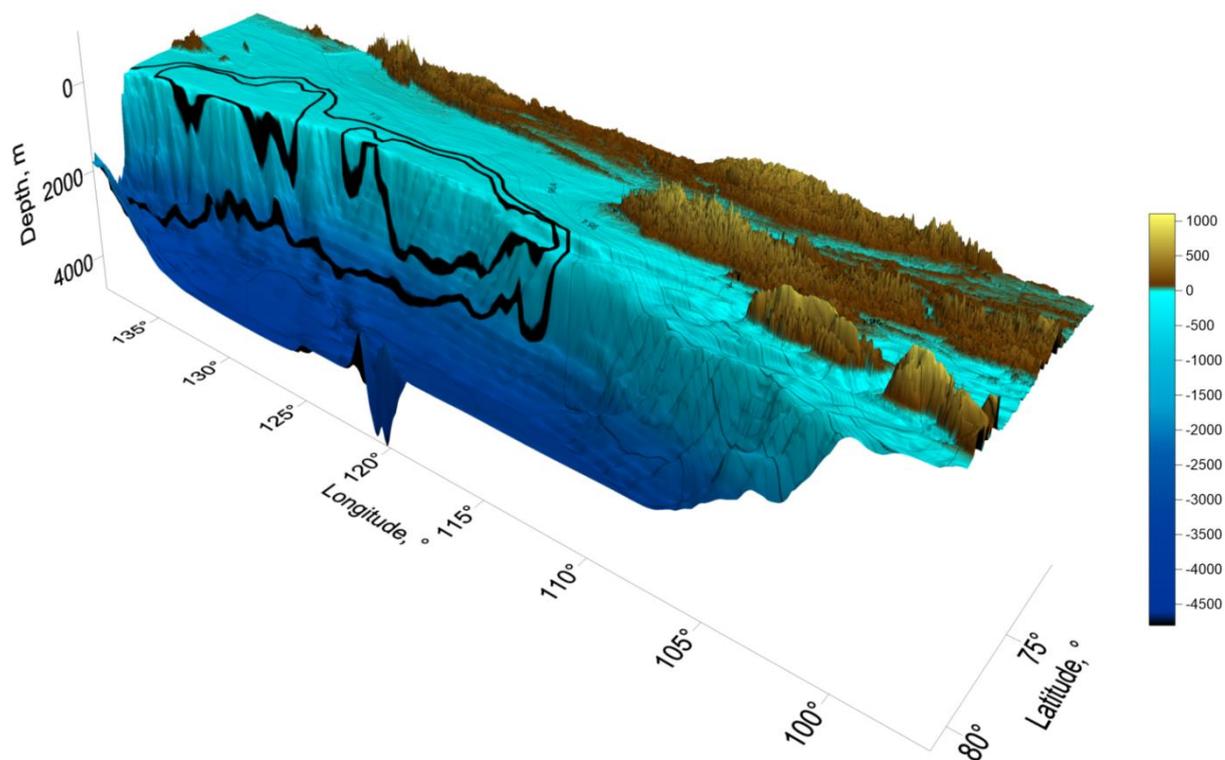


Рисунок 3.5 – Батиметрия района исследования и изолинии (черные полосы) средних значений сплоченности льда в зимний период

На рисунке 3.5 отчетливо видно, что зона наибольших средних значений берет начало на кромке шельфа. Область моря расположенная на шельфе обладает меньшей сплоченностью. На эту ситуацию могут влиять соленостная конвекция, которая охватывает большую часть шельфа моря Лаптевыхна мелких глубинах. Так же свой вклад может вносить действие сгонно-нагонных колебаний уровня, которые выносят лед с шельфовой зоны,

в область кромки шельфа, где лед концентрируется, образуя повышенную сплоченность.

Стоит отметить, что в работах зарубежных ученых, тоже была выделена область наиболее сплоченного льда, в центральной и северо-восточной частях моря Лаптевых (рисунок 3.5.1). В этих исследованиях расчеты проводились при помощи спутника SMOS, который используя данные солености, получил толщину льда [1].

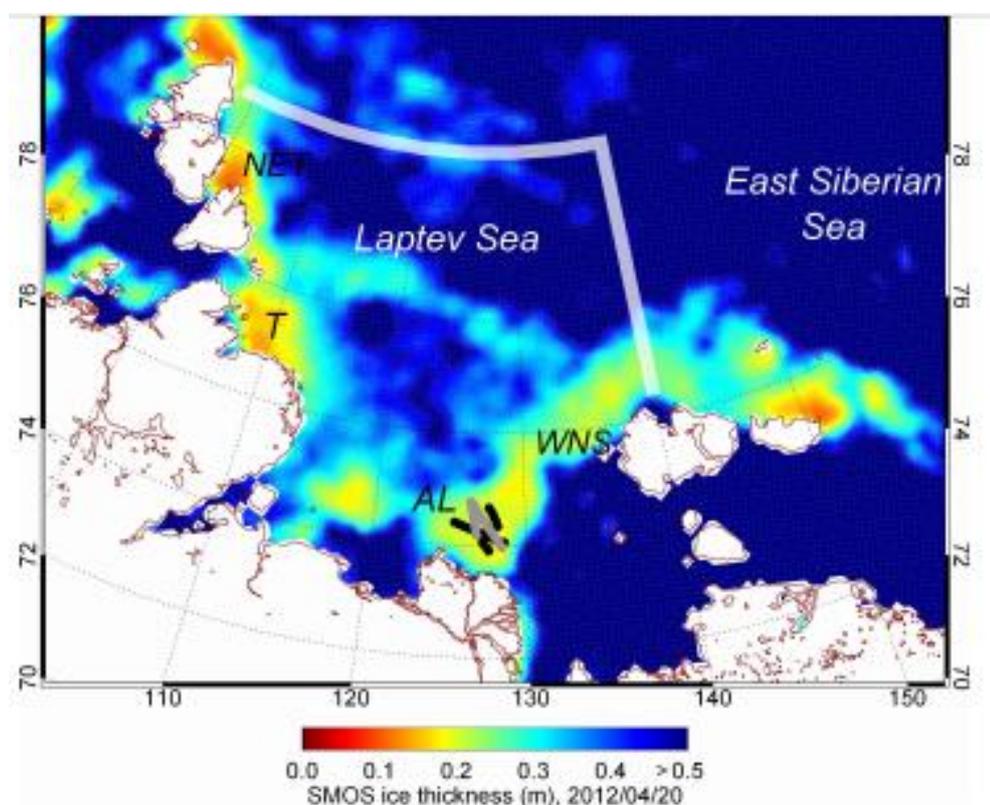


Рисунок 3.5.1 – Толщина морского льда, полученная со спутника SMOS[1]. Синим цветом выделены районы моря со значительной толщиной льда (более 0,5 м). Область, выделенная в квадрат, соответствует району наибольшей ледовитости, полученной при наших расчетах (см. рисунок 3.4).

Далее было рассчитано среднеквадратическое отклонение и построена карта его распределения по акватории моря Лаптевых.

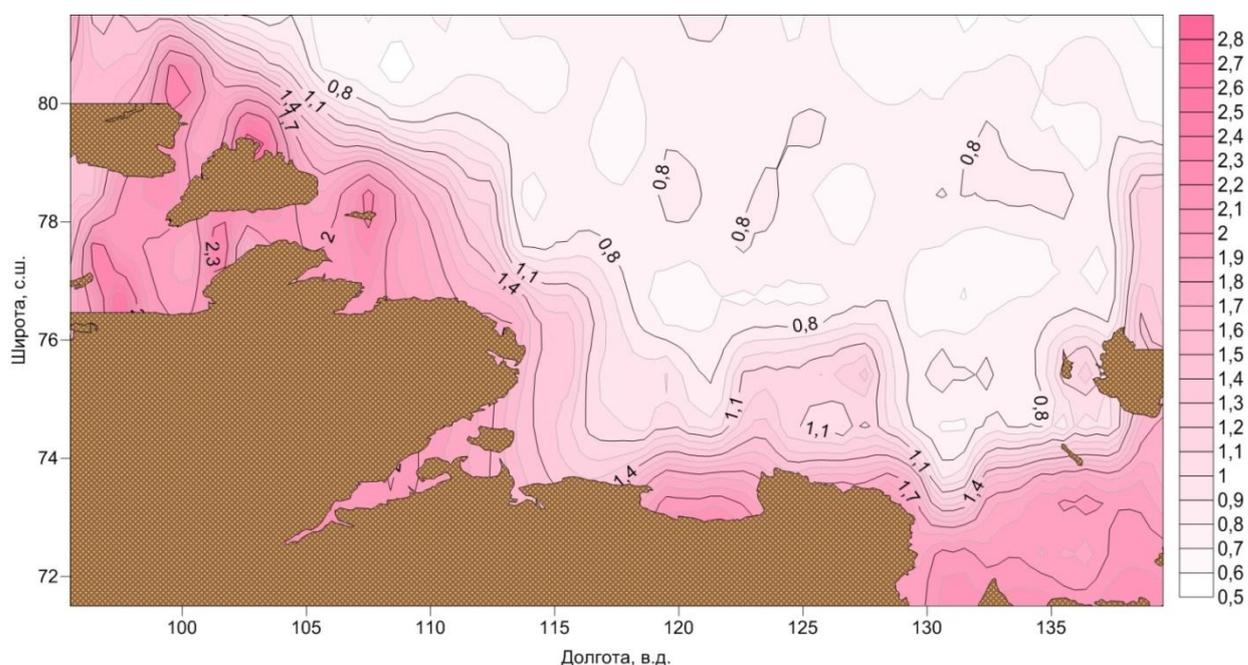


Рисунок 3.6 – Стандартное отклонение межгодовой изменчивости ледовитости в зимний период в море Лаптевых за период 1981-2016 гг.

По рисунку 3.6 области с наивысшим значением среднеквадратического отклонения находятся в прибрежных районах. Здесь значения этой характеристики составляют 1,7-2,5 процента ледовитости. Самая динамичная часть – дельты рек и побережье Северной Земли. Наименьшее среднеквадратическое отклонение располагается в центральной части моря Лаптевых, задевая часть Новосибирских островов. Следовательно, в этой части моря значение сплоченности льда не слишком отклоняются от своего среднего значения.

3.3 Оценка временного тренда ледовитости моря Лаптевых в зимний сезон

Следующим шагом был расчет характеристик тренда: коэффициент тренда (a), коэффициент детерминации (R^2). Для всех характеристик были построены карты (рисунки 3.7 – 3.8).

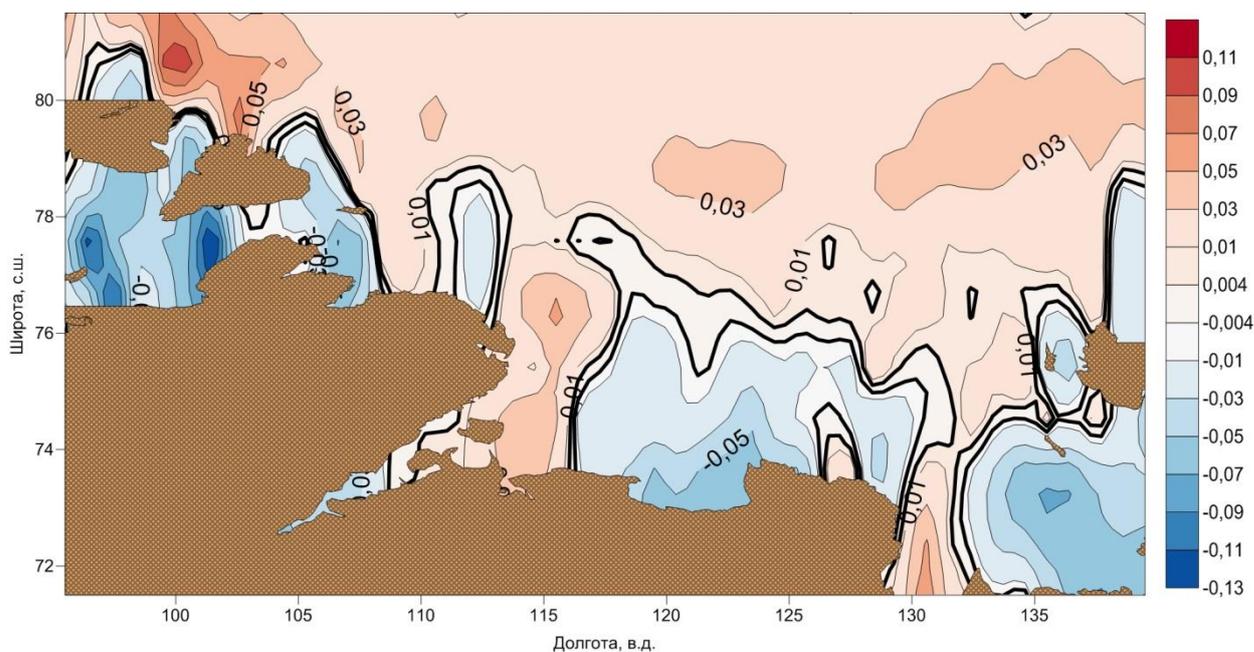


Рисунок 3.7 – Распределение коэффициента тренда межгодовой изменчивости ледовитости в зимний сезон (%/год) по акватории моря Лаптевых за период 1981-2016 гг. Выделена полоса ($\pm 0,004$ %/год) незначимых значений.

Карта коэффициентов тренда (рисунок 3.7) необходима для того, чтобы выявить области со значимым трендом, то есть те области акватории моря Лаптевых, где сплоченность льда каким-то образом изменялась за исследуемые 35 лет.

На рисунке распределение коэффициентов тренда представлено в сине-красных цветах. Синий цвет – зона значимого коэффициента регрессии, где ледовитость уменьшается, красный – зона значимого коэффициента тренда, где сплоченность льда увеличивается. На рисунке жирной изолинией выделены области белого цвета, там, где коэффициенты не значимы. Зоны со значимыми коэффициентами регрессии выделялись при уровне значимости 0,05, значения коэффициентов которые выше 0,004 %/год по модулю – значимы, следовательно, тренд, тоже значим и наоборот.

Максимальная величина тренда выявляется в той же зоне, где и наибольшая средняя ледовитость (рисунок 3.4). То есть, в этой области,

центральной, лёд нарастает, а у берегов – стаивает, так как здесь тренд имеет отрицательные значения.

Рассмотрим карту распределения коэффициента детерминации (рисунок 3.8)

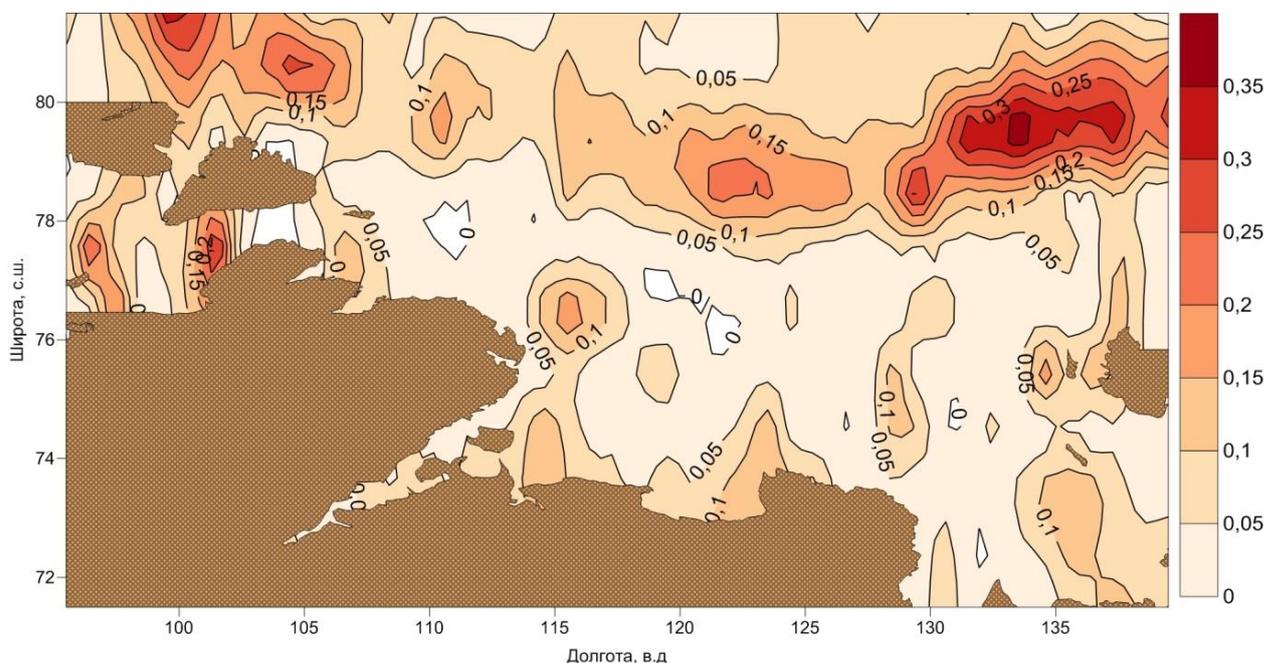


Рисунок 3.8 – Коэффициент детерминации тренда межгодовой изменчивости ледовитости моря Лаптевых в зимний сезон за период 1981-2016 гг.

По рисунку 3.8 можно судить о том, что максимальный коэффициент детерминации временного тренда совпадает с областями интенсивного таяния (область Северной Земли и западные берега моря Лаптевых), а также с областями повышенного нарастания льда – центральная и северо-восточная часть моря.

Большая величина коэффициента детерминации говорит о том, что на данном участке тренд будет преобладать над любыми колебаниями. Следовательно, в той части моря, которая выделилась в ходе исследования с наибольшей сплоченностью льда, сплочённость льда будет увеличиваться со временем. Еще по значимости тренда можно судить о том, какие колебания

преобладают на конкретном участке моря. Если же значения коэффициента детерминации невелики, тогда стоит говорить, что помимо тренда в данном регионе преобладают другие колебания. Поэтому теперь необходимо изучить эти процессы в разных районах моря. Для начала необходимо всю сплоченность льда в море Лаптевых разделить на некие группы.

3.4 Районирование моря Лаптевых по однородной изменчивости ледовитости в зимний период

Кластерный анализ по изменчивости проводился для того, чтобы выяснить особенности временной изменчивости в районе исследований. Анализ позволяет сжать информацию, которую сложно проанализировать, посредством выявления областей акватории моря, где точки будут вести себя синхронно.

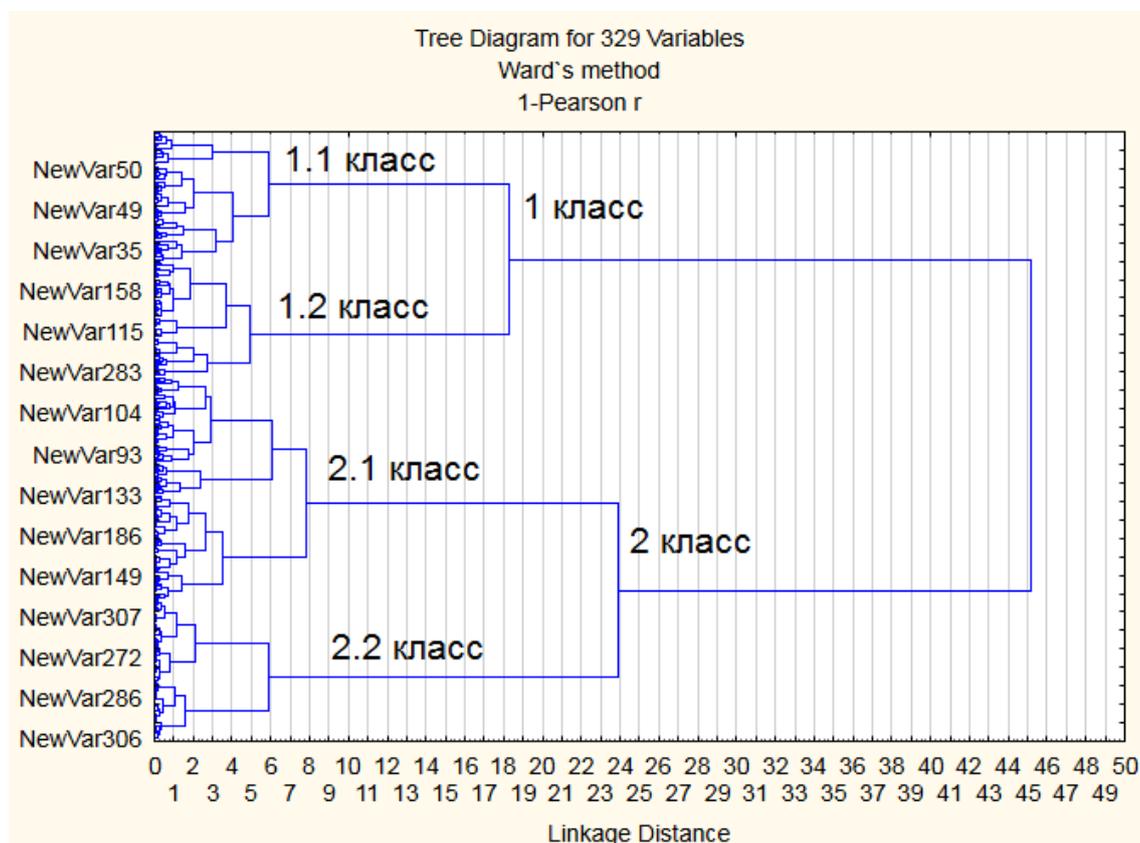


Рисунок 3.9 – Дендрограмма классификации изменения ледовитости (зимний сезон) в море Лаптевых

В ходе выполнения данного метода сначала была получена дендрограмма классификации по изменчивости ледовитости в зимний сезон. На рисунке 3.9 указаны номера классов, которые целесообразно выделить.

Причем, сначала определились 2 группы льдов: 1 класс -прибрежные льды; 2 класс - льды открытой части моря Лаптевых (рисунок 3.10), а потом было принято решение разделить последние еще на две группы, то есть в итоге вышло 4 класса льдов (рисунок 3.11).

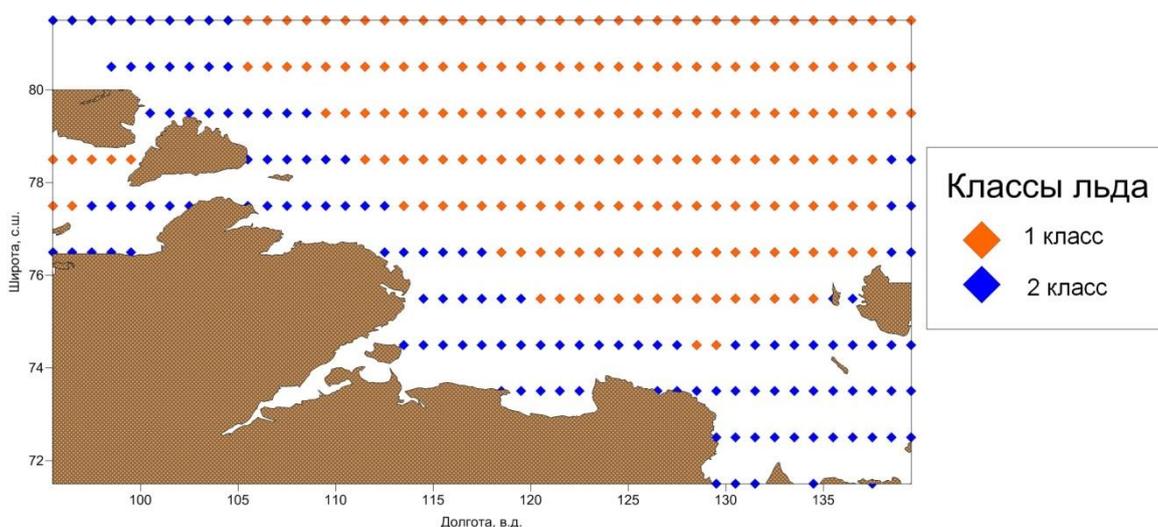


Рисунок 3.10– Два выделенных класса с похожей изменчивостью ледовитости в зимний период в море Лаптевых

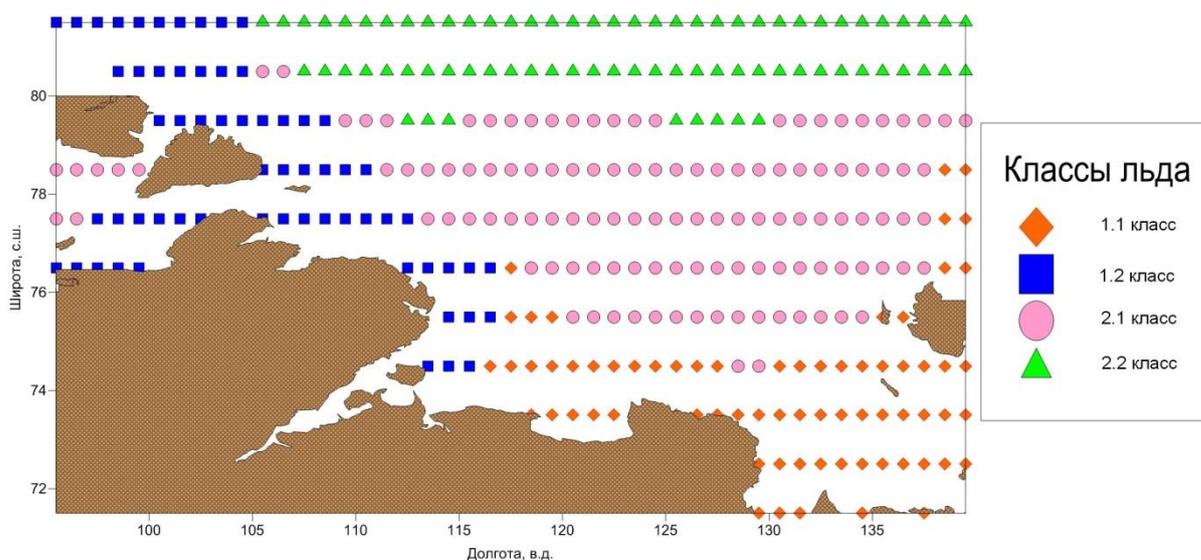


Рисунок 3.11– Четыре выделенных класса с похожей изменчивостью ледовитости в зимний период в море Лаптевых

На картах были нанесены точки, которые соответствуют различным группам льда. По этим картам можно проследить пространственное распространение классов льдов по акватории моря Лаптевых. Так на рисунке 3.10 льды делятся на две группы: прибрежные и льды центральной части моря. На состояние первых будут оказывать влияние сток рек и близость к берегам. К тому же, области прибрежных льдов совпадают с районами, где присутствует значимая отрицательная трендовая составляющая (рис.3.7), которая указывает, что в данном месте лед стаивает. То же самое можно сказать и об открытой части моря и ее связи со значимым положительным трендом (рис. 3.7). Положительный знак определяет, что в данном районе льды нарастают.

На рисунке 3.11 льды моря Лаптевых разделены уже на четыре класса. Льды у берега разделились на две группы: класс 1.1 – Прибрежный западный; класс 1.2 – Прибрежный восточный класс

Это же наблюдается и со льдами открытого моря: класс 2.1 – Центральный; класс 2.2 –Северный. Так Центральный класс открытого моря совпадает с областью преобладания наиболее сплоченных льдов (рисунок 3.4).

Далее были рассчитаны средние временные ряды ледовитости в каждом классе и рассчитана корреляция между ними. Матрица корреляции представлена в таблице 3.1.

Из таблицы 3.1 видно, что классы, относящиеся к прибрежной зоне (Прибрежный западный, Прибрежный восточный) обладают незначительной корреляцией между собой (при коэффициенте корреляции менее и равном 0.6), таким образом, целесообразно разделить прибрежный класс моря Лаптевых на классы. Аналогично разделяем центральную часть моря Лаптевых на Центральный и Северный классы.

Таблица 3.1 – Матрица корреляции средних временных рядов ледовитости в каждом районе на основе классификации по изменчивости (зимний период)

Класс	Прибрежный западный	Прибрежный восточный	Центральный	Северный
Прибрежный западный	1			
Прибрежный восточный	0,634	1		
Центральный	0,522	0,548	1	
Северный	0,244	0,180	0,638	1

Далее необходимо проследить тенденцию изменения сплочённости льда во времени.

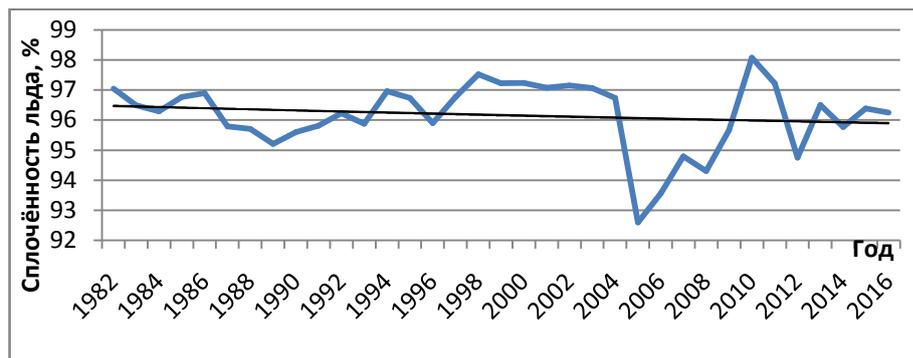
3.4.1 Выделение и анализ тренда в классах

Для рядов средних за зимний сезон значений в каждом выделенном классе строим график временной изменчивости и выделяем линейный и нелинейные тренды (рисунок 3.11). Были рассчитаны характеристики тренда: для каждого класса: коэффициент детерминации и уравнение тренда.

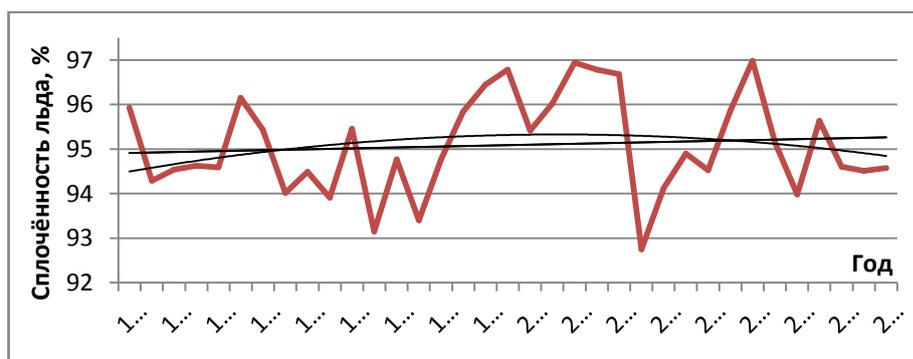
Таблица 3.2 – Характеристики тренда средних временных рядов ледовитости для разных районов моря Лаптевых (в уравнении IC – ice concentration – сплоченность льда; t – time-время)

Класс	R ²	Уравнение тренда	
Прибрежный западный	0,023	линейный	IC = -0,017t + 36,474
	0,023	нелинейный	IC = 0,0001t ² - 0,0221t + 96,505
Прибрежный восточный	0,009	линейный	IC = 0,0102t + 54,902
	0,044	нелинейный	IC = -0,0022t ² + 0,0903t + 94,408
Центральный	0,064	линейный	IC = 0,0125t + 97,437
	0,065	нелинейный	IC = -0,0001t ² + 0,0166t + 97,412
Северный	0,107	линейный	IC = 0,019t + 96,998
	0,127	нелинейный	IC = 0,0009t ² - 0,0141t + 97,202

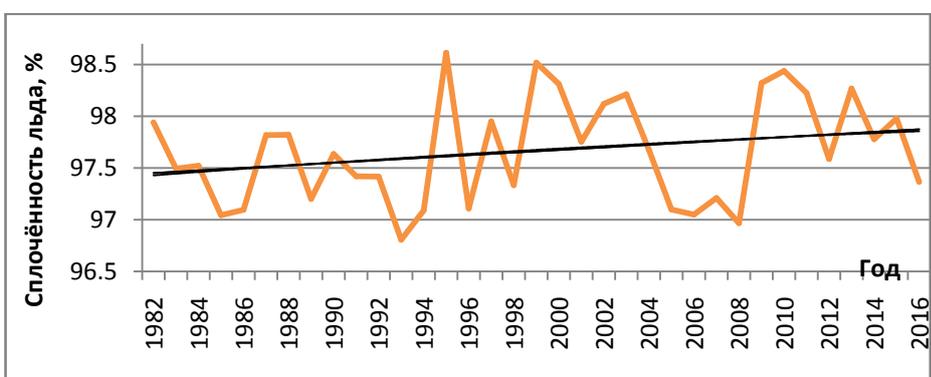
а)



б)



в)



г)

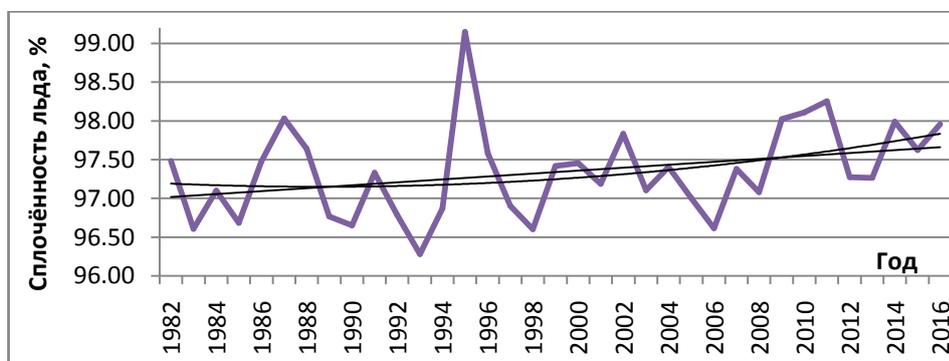


Рисунок 3.12 – Временная изменчивость сплочённости льда в классе Прибрежный западный(а), Прибрежный восточный (б), Центральный (в),Северный (г) и линейный и нелинейные тренды

Как видно на рисунке 3.12, нелинейность тренда практически не выражена. Поэтому можно рассматривать линейный тренд.

После проверки трендов на значимость значимые тренды выявились только в Северном классе (выделены в таблице 3.2 курсивом) при уровне значимости 0.05. Тренд имеет положительный характер, следовательно, в данной области происходит нарастание льда. Эта область относится северной части моря, в которой таяние льда не происходит (см. раздел 1).

3.4.2 Спектральный анализ

С помощью программы PAST3 был выполнен спектральный анализ, (Приложение А), который позволил выявить периоды пиков спектра для проведения гармонического анализа.

В результате гармонического анализа для каждого класса были получены по несколько циклических составляющих – гармоник. Их необходимо выделять для того, чтобы оценить цикличность процесса, который влияет на сплоченность льда. Каждая гармоника имеет свой период – цикл, по которому можно судить, Через сколько лет колебания процесса может повториться.

Итак, гармоники были выделены и проверены на значимость. Результаты гармонического анализа внесены в Приложение Б. Значимые гармоники и значения их характеристик приведены в таблице 3.3.

Для Прибрежного западного класса отмечается наличие 17-летник и 9 летних циклов, которые относятся к ритмам солнечной активности.

Таблица 3.3 – Характеристики значимых гармоник средних временных рядов ледовитости в зимний сезон для разных районов моря Лаптевых

Класс	Период, лет	Частота, рад/с	Амплитуда, м	Вклад
Прибрежный западный	16,9	0,37	0,87	0,29
	8,5	0,74	0,69	0,18
Прибрежный восточный	22,7	0,28	0,60	0,15
	11,3	0,55	0,65	0,17
	5,4	1,15	0,66	0,18
Центральный	13	0,49	0,28	0,16
	7,2	0,88	0,23	0,1
	3,8	1,64	0,26	0,14
Северный	7,4	0,85	0,43	0,29
	4,7	1,4	0,32	0,17
	3,9	1,59	0,32	0,16

В Прибрежном западном классе выделяются цикличности 17 и 8,5 лет, физическая причина неизвестна.

В Прибрежном восточном классе выделяются ритмы солнечной активности различной периодичности:

– 11 и 22 года являются самыми известными. Они оба связаны с возникновением пятен на Солнце

- Выделен 5-летний цикл, связанный с автоколебаниями

В Центральном классе есть 13-летний цикл. Здесь же обнаружен 7 – летний цикл причиной которого является прецессия земной оси. Также присутствует цикл автоколебаний равный четырем годам

В Северном классе также выделяется автоколебание равное 4 годам. В этом классе присутствует еще 7-летний цикл, который зачастую относят к циклам, вызванным отклонением земной оси (прецессия и нутация).

3.4.3 Вейвлет-анализ

Вейвлет-анализ делался для того, чтобы выявить более мелкие колебания, которые очень сложно распознать при выполнении гармонического анализа.

На рисунке 3.13 представлен интегральный вейвлет-спектр для рядов сплоченности льда средних временных рядов ледовитости в зимний сезон для разных районов моря Лаптевых. Области, находящиеся снаружи конуса влияния не принимаются во внимание для вейвлета Морле, а выделенные внутри изолиний являются значимыми при уровне значимости 0,05. Таким образом, можно примерно увидеть, в какое время наблюдался тот или иной цикл.

При рассмотрении вейвлет-спектров (рисунок 3.13) рядов сплоченности в различных районах моря в период зимы, видно, что в Прибрежном западном классе отмечается период, который продолжается весь исследуемый промежуток времени - 35 лет, и короткий период встречающийся в конце исследуемого промежутка. Для Прибрежного восточного района выделяется три периода, один из которых не значим, так как он находится за пределами конуса влияния. Один период начинается с середины исследуемого промежутка и длится недолго, второй период расположился ровно посередине промежутка исследования и является довольно длительным. В Центральном районе выделяется очень длительный период свыше 30 лет и очень короткий период, который располагается в самом начале промежутка исследования. В северном классе льдов выделяется 3 периода, один из них не значим. Вторые два отмечаются в первой половине исследуемого периода, они обладают средней продолжительностью.

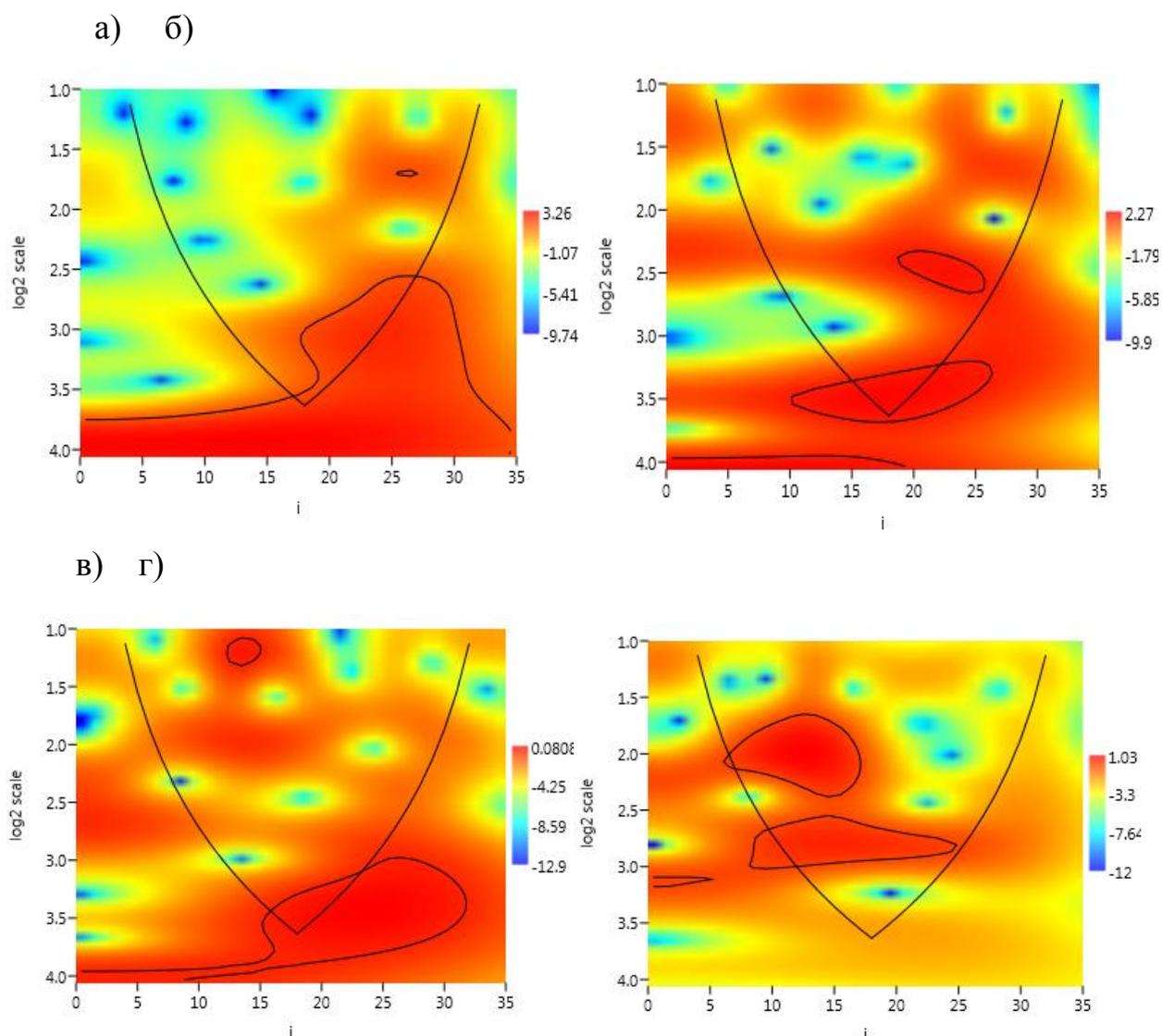


Рисунок 3.13 – Интегральный вейвлет-спектр средних временных рядов ледовитости в зимний сезон для разных районов моря Лаптевых Прибрежный западный (а); Прибрежный восточный(б); Центральный(в);Северный (г)

Теперь сравним периоды выделенные при вейвлет-разложении, и при спектральном анализе. Для этого пользуемся данными таблиц 3.3 и 3.4. В Прибрежном западном классе выделились очень близкие периоды (вейвлет разложение – 15 лет; спектральный анализ – 16,9 лет) большой продолжительности, а также был выделен практически одинаковый период 9 лет. Следовательно, полученные периоды, присутствовали на всем интервале исследования. В Прибрежном восточном классе опять происходит практически полное совпадение периодов в 6 и 11 лет, но при

спектральном анализе ещё выявился 22- летний цикл, которого не обнаружил вейвлет-анализ. Рассматривая Центральный класс льдов, можно из близких периодов выделить только 13-летний период по спектральному анализу и 11-летний по вейвлет-разложению. При вейвлет-преобразовании в данном классе выявились мелкие колебания с периодом 2 года. В Северном классе отмечаются схожие колебания в 7 лет и 4 года при использовании двух анализов. Причем, при спектральном дополнительно выделился период в 4,7 лет.

Таким образом, вейвлет- анализ помогает выявить более мелкие колебания исследуемой величины за 35 лет наблюдений.

Таблица 3.4 – Характеристики интегрального вейвлет-спектра для рядов сплоченности льда средних временных рядов ледовитости в зимний сезон для разных районов моря Лаптевых

Класс	Период, лет	Амплитуда, у.е.	Продолжительность
Прибрежный западный	9	5,3	1999-2010 гг.(11 лет).
	15	8,1	1982-2016 гг.(35лет)
Прибрежный восточный	6	3,9	2002-2006 гг.(4 года)
	11	4,2	1992-2006 гг.(14 лет).
Центральный	2	0,8	1994-1996 гг.(2 года)
	11	0,9	1998-2013 гг.(15 лет)
Северный	4	1,6	1990-1997 гг. (7 лет)
	7	1,2	1991-2006гг (15 лет)

Заключение

При анализе результатов исследований ледовитости в районе моря Лаптевых был получен ряд важных выводов.

Внутригодовой ход ледовитости в море Лаптевых пространственнеоднороден. В целом, количество летних месяцев уменьшается к высоким широтам. Начиная с 2005 года количество летних месяцев в прибрежном районе преобладает над зимними, так, что в отдельных зонах побережья обнаружены точки с полностью отсутствующим зимним периодом.

В пространственном распределении средних многолетних значений количества льда выявилась зона моря, где сплоченность максимальна. Ее расположение доказывает нарушение среднеширотного распределения ледовитости. Эта зона очень сплоченных льдов расположена в северо-восточной и центральной частях моря, а вот на крайнем севере сплоченность льда меньше.

Выявлены зоны нарастания и стаивания льда при оценке временного тренда сплоченности моря Лаптевых за зимний сезон. Так в прибрежной зоне количество льда зимой становится меньше, кроме двух мощных областей, которые относятся к дельтам рек Хатанга и Лена. Предположительно зона нарастания у берега связана речным стоком и деятельностью ветров, которые при активности течений образуют заток сплоченного льда к берегу евразийского материка. Для северных зон нарастания льда аномалий не выявлено.

С помощью кластерного анализа акватория моря разделяется по типу изменчивости на 4 класса: Прибрежный западный, Прибрежный восточный, Центральный, Северный.

При анализе тренда средних значений ледовитости каждого класса было выявлено, что в двух прибрежных классах тренд отрицателен, здесь

количество льда уменьшается. Для льдов открытого моря тренд положителен, следовательно, сплоченность льда в этом районе увеличивается. Все эти утверждения не противоречат зонам нарастания и стаивания льда, выделенных по отдельным точкам.

При использовании гармонического и вейвлет-анализов было выявлено, что изменения ледовых условий моря Лаптевых формировались с участием долговременных циклов – 11, 22 года, а также при действии некоторых кратковременных циклов.

В целом по результатам исследования можно заключить, что выявленная зона очень сплоченных льдов является проблемой для прохождения судов по северному морскому пути в любой сезон года. Таким образом, можно предположить, что ледокольное обеспечение сохранится для судоходства по акватории моря Лаптевых и всего Северного Морского пути и для работ, проводимых на арктическом шельфе.

Список используемых источников

1. Itkin P., Krumpfen T. Winter sea ice export from the Laptev Sea preconditions the local summer sea ice cover // The Cryosphere Discussion. - 2017. - №3. - С. 2-3.
2. Море Лаптевых // География URL: <https://geographyofrussia.com/morya-rossii-more-laptevux/> (дата обращения: 24.04.2017).
3. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. - М: Издательство МГУ, 1982. - С. 113-123.
4. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том 11. Море Лаптевых / Крутских Б.А., Лагутин Б.Л., Крутских Б.А., Лагутин Б.Л. и др.; под ред. Петров Л.С. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1986.
5. Общее климатическое описание региона (море Лаптевых) // Портал Единой государственной системы информации в Мировом Океане (ЕСИМО) URL: http://www.esimo.ru/atlas/new/Laptevix/opis_reg.html (дата обращения: 19.04.2017).
6. Архив погоды в Тикси (аэропорт) // rp5.ru: Расписание погоды URL: [https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Тикси_\(аэропорт\)](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Тикси_(аэропорт)) (дата обращения: 20.04.2017).
7. Гидрологические условия моря Лаптевых // Государственный научный центр "Арктический и антарктический научно-исследовательский институт" URL:http://www.aari.ru/resources/a0013_17/laptevs/Atlas_Laptev_Summerr/text2/regim.htm (дата обращения: 16.04.2017).
8. Океанические воды, циркуляция вод морей российского сектора Арктики // География URL: <https://geographyofrussia.com/okeanicheskie-vody-cirkulyaciya-vod-morej-rossijskogo-sektora-arktiki/> (дата обращения: 16.04.2017).
9. Море Лаптевых // База знаний URL: http://proznania.ru/?page_id=2356 (дата обращения: 26.04.2017).

10. International Pacific Research Center (IPRC) URL: <http://iprc.soest.hawaii.edu> (дата обращения: 15.04.2017).
11. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине "Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации". - СПб.: РГГМУ, 2010. – 45-48 с
12. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. - 1996. - №11. - С. 1145-1146,1153,1169
13. Hammer Ø PAST Version 3.15.Reference manual. - Oslo: University of Oslo, 1999-2017. - С. 176-177.
14. Королев М.А. Статистический словарь. М.: Финансы и статистика,1989, 623 с.
15. Кластерный анализ // Statlab.kubsu.ru URL: http://statlab.kubsu.ru/sites/project_bank/claster.pdf (дата обращения: 28.03.2017).
16. Многомерный анализ данных методами прикладной статистики / Барковский С.С., Захаров В.М., Лукашов А.М., Нурутдинова А.Р., Шалагин С.В., Под ред. Захарова В.М. - Казань: Издательство КГТУ им. А.Н. Туполева, 2010. - С. 15-16.
17. Cornish R. Cluster Analysis // Mathematic Learning Support Centre. - 2005. - №5. - С. 1-4.

Приложение А – Спектры разложения Фурье

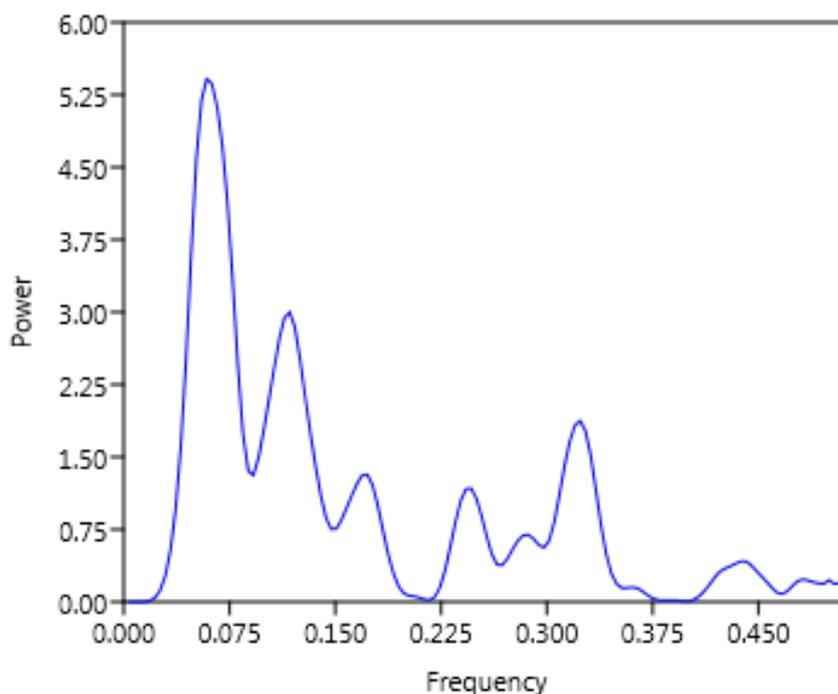


Рисунок А.1 – Периодограммы для рядов сплоченности льда средних временных рядов ледовитости в зимний сезон для Прибрежного западного района моря Лаптевых

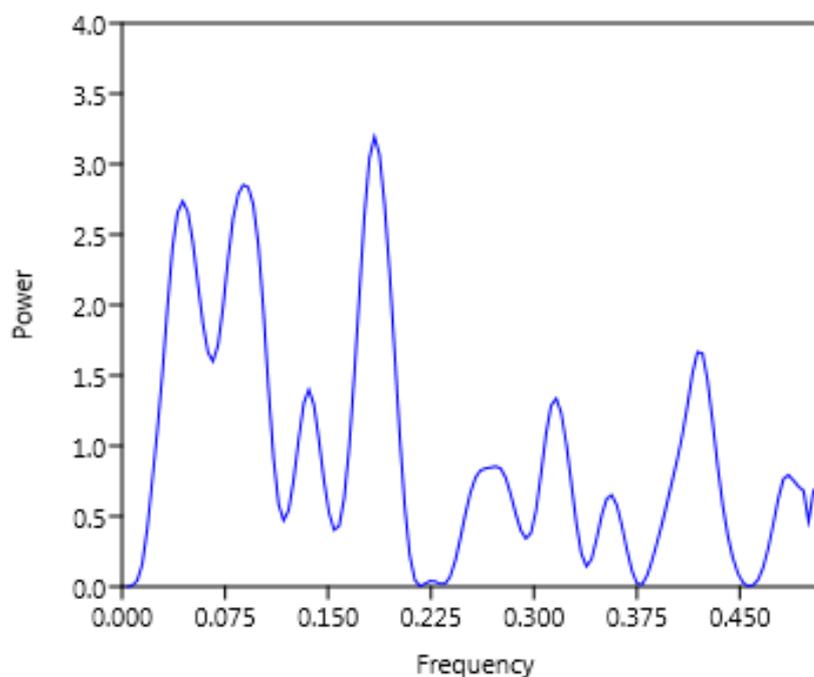


Рисунок А.1 – Периодограммы для рядов сплоченности льда средних временных рядов ледовитости в зимний сезон для Прибрежного восточного района моря Лаптевых

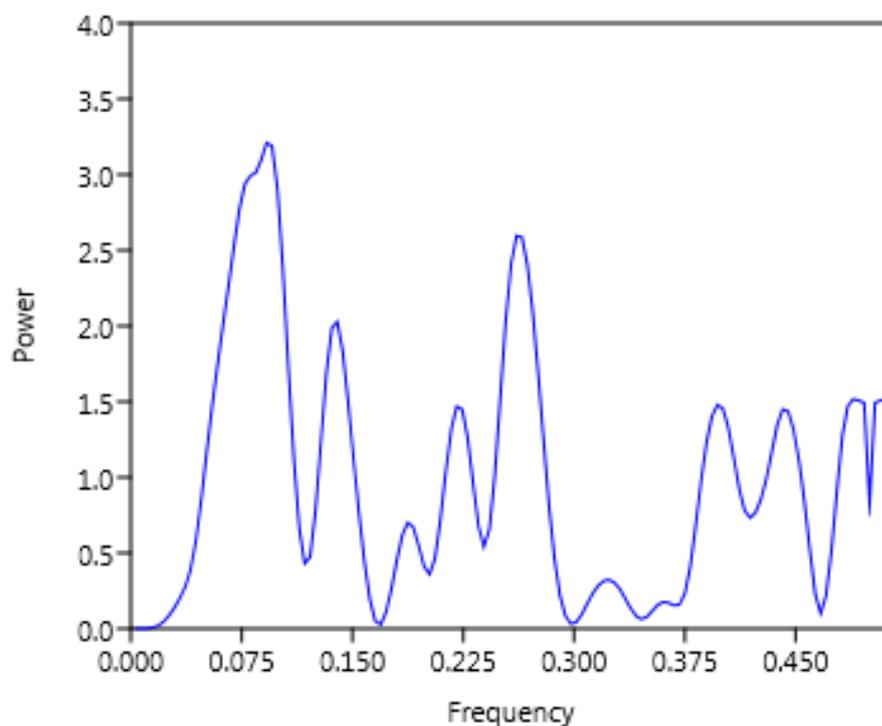


Рисунок А.1 – Периодограммы для рядов сплоченности льда средних временных рядов ледовитости в зимний сезон для Центрального района моря Лаптевых

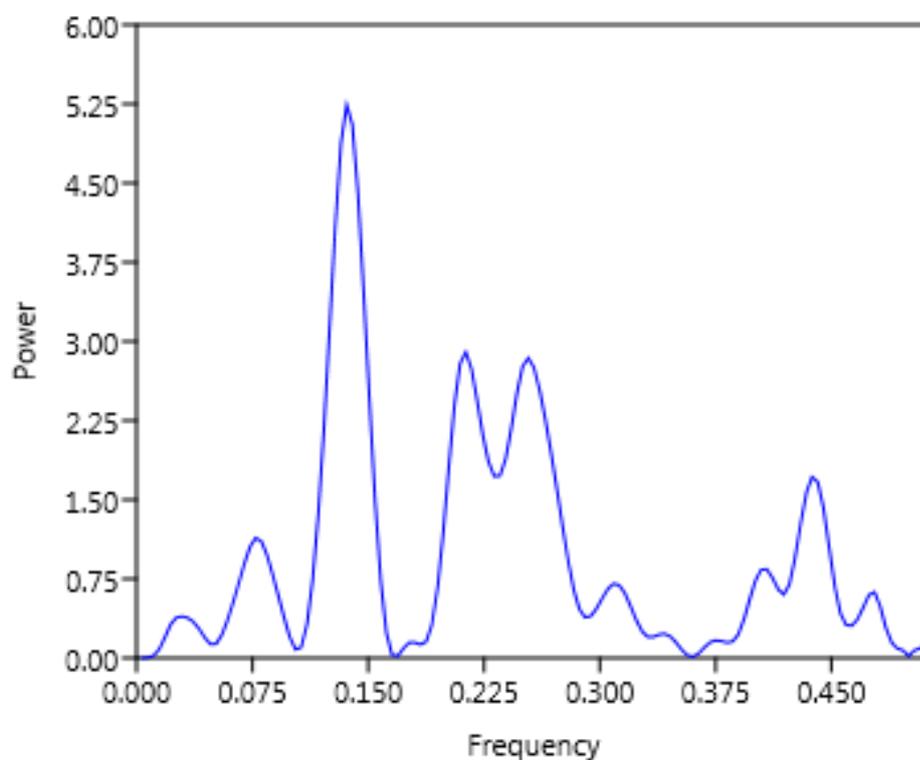


Рисунок А.1 – Периодограммы для рядов сплоченности льда средних временных рядов ледовитости в зимний сезон для Северного района моря Лаптевых

Приложение Б. Результаты гармонического анализа



Рисунок Б.1 – Временная изменчивость рядов сплоченности льда, %, средних временных рядов ледовитости в зимний сезон для Прибрежного западного района моря Лаптевых в отклонениях от тренда и восстановленные по значимым гармоникам



Рисунок Б.2 – Временная изменчивость рядов сплоченности льда, %, средних временных рядов ледовитости в зимний сезон для Прибрежного восточного района моря Лаптевых в отклонениях от тренда и восстановленные по значимым гармоникам



Рисунок Б.3 – Временная изменчивость рядов сплоченности льда, %, средних временных рядов ледовитости в зимний сезон для Центрального района моря Лаптевых в отклонениях от тренда и восстановленные по значимым гармоникам



Рисунок Б.4 – Временная изменчивость рядов сплоченности льда, %, средних временных рядов ледовитости в зимний сезон для Северного района моря Лаптевых в отклонениях от тренда и восстановленные по значимым гармоникам