



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

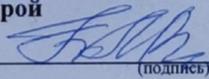
**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему: «Использование данных спутниковой съемки при анализе  
мезомасштабных конвективных ячеек и гряд»

Исполнитель Сюткин Григорий Андреевич  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук  
(ученая степень, ученое звание)  
Федосеева Наталья Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
И.о. заведующего кафедрой

  
(подпись)

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

Восканян Карина Левановна  
(фамилия, имя, отчество)

«28» мая 2023г.

Санкт-Петербург  
2023

## СОДЕРЖАНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. КЛИМАТОГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕГИОНА БАРЕНЦЕВА МОРЯ.....	6
1.1 История исследования Баренцева моря.....	6
1.2. География Баренцева моря.....	10
1.3 Климат Баренцева моря.....	14
1.4. Мезомасштабная конвективная облачность в Баренцевом море.....	19
ГЛАВА 2. ДЕШИФРИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ЯЧЕЕК И ГРЯД .....	25
2.1. Дешифрирование и анализ видимых и инфракрасных космических снимков .....	25
2.2. Тектурные признаки.....	26
2.3. Тектурная матрица .....	29
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЗОМАСШТАБНЫХ ОБЛАЧНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ЯЧЕЕК И ГРЯД ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ .....	35
3.1. Формирование архива спутниковых снимков мезомасштабных облачных конвективных ячеек и гряды.....	35
3.2. Тематическая обработка изображений .....	36
3.3. Анализ характеристик облачных систем.....	43
3.4. Определение мощности конвективного слоя.....	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	53
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	55

## СОКРАЩЕНИЯ

БМ – Баренцево море

МКО – мезомасштабная конвективная облачность

ОГ – облачные гряды

ОЯ – открытые ячейки

ЗЯ – закрытые ячейки

## ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии спутниковой съемки предоставляют нам уникальную возможность исследовать и анализировать природные явления на планете Земля с высокой пространственной и временной разрешающей способностью. Одной из важных областей, где применение данных спутниковой съемки имеет большую актуальность, является анализ мезомасштабных конвективных ячеек и гряд.

Мезомасштабные конвективные ячейки и гряды представляют собой мощные атмосферные явления, которые играют важную роль в формировании погоды, климата и гидрологических процессов. МКО может проявляться в регионе в виде грозовых туч, кучевых облаков или многослойной облачности с просветами. Она часто сопровождается интенсивными осадками, грозами и сильными ветрами. Такие атмосферные условия могут оказывать влияние на морские процессы, включая циркуляцию воды, вертикальные перемещения планктона и другие биологические процессы.

Целью данной дипломной работы является исследование и анализ мезомасштабных конвективных ячеек и гряд с использованием данных спутниковой съемки. Мы стремимся понять их структуру, динамику и взаимосвязь с другими факторами. Использование данных спутниковой съемки позволит нам получить ценную информацию о распределении облачности и других параметрах, связанных с мезомасштабными конвективными ячейками и грядами.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- сформировать архив спутниковых изображений, полученных с помощью датчика MODIS/TERRA,

- выполнить тематическую обработку спутниковых снимков, основанную на получении матрицы смежности, с целью выявления и типизации мезомасштабных конвективных ячеек и гряд.

# ГЛАВА 1. КЛИМАТОГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕГИОНА БАРЕНЦЕВА МОРЯ

## 1.1 История исследования Баренцева моря

Освоение Баренцева моря началось еще около 10 веков назад. В течение многих лет ученые и исследователи стремились раскрыть географические, физические, химические и биологические особенности этого региона.

С русских поморов началось освоение Баренцева моря, они смогли достичь его берегов одними из первых ещё в 10-11 веке. Главными видами деятельности, которые заставляли их отправляться в море, были рыболовство и морские промыслы. За года, проведенные на неизведанных территориях, они смогли открыть острова Колгуев и Вайгач, а также Новую Землю, проливы Югорский Шар и Карские Ворота задолго до мореплавателей из других частей Европы. Поморы также стали первыми, кто достиг берегов таких островов как: Медвежий, Надежды и восточного Шпицбергена, который они называли Грумантом.

Баренцево море назвали в честь мореплавателя голландского происхождения В. Баренца. Три его экспедиции привнесли огромный вклад в дальнейшее изучение этой территории.

Первая экспедиция проходила 1594-1597 года. В 1594 году Баренц был назначен капитаном одной из трех судов, отправленных Голландской восточно-индийской компанией в поисках северного морского пути в Азию. В экспедиции участвовали также язычный волшебник Геррит де Веер, географ и картограф Петер Плат, а также другие моряки. Экспедиция не смогла пройти через Баренцево море из-за льда, но они открыли остров Вайгач и Матвеев Клин, и достигли мыса Желания, который стал северной точкой материковой Европы.

Вторая экспедиция началась в 1595 и закончилась в 1596 году, где после неудачи первой экспедиции, Баренц был выбран для возглавления второй

попытки пройти через северный морской путь. Вместе с Яном Райномшом и Корнелисом Нейландтом они плыли на двух судах - "Меркурий" и "Восток". Экспедиция достигла Вайгацкого пролива, но снова столкнулась с льдом и вынуждена была вернуться.

Третья экспедиция проходила в 1596-1597 года. На этот раз Виллем плыл на судне "Унион" вместе с Яном Райномшем на "Ламме" и другими членами команды. Они продвигались вдоль северного побережья России и островов Шпицберген, в поисках прохода на восток. Экспедиция достигла мыса Желания, но и здесь они столкнулись с льдом и вынуждены были провести зиму на острове Новая Земля. Весной они продолжили исследования, но в конечном итоге вернулись в Нидерланды без успеха. Эти путешествия помогли собрать информацию о географии и климатических условиях Баренцева моря [1].

Так выглядел Виллем Баренц в представлении одного голландского художника (Рис.1.1):



Рис.1.1. Портрет Виллема Баренца [1].

Иностранные экспедиторы не раз посещали территорию Баренцева моря, одними из важных были экспедиции Вильгельма Баренца и Якоба ван Хейна в конце 16 века, которые проложили путь для будущих исследований региона [2].

Русские исследователи, такие как Арктик Дейнекен и Семен Дежнев осуществляли экспедиции в районе Баренцева моря в 17 веке. Они исследовали Северный Ледовитый океан и его прилегающие моря, включая БМ, и собирали информацию о географии, природных ресурсах и климатических условиях региона.

В 18 веке российские мореплаватели и ученые Иван Соловьев и Семен Челюскин смогли провести гидрографические исследования Баренцева моря. Они изучали морские глубины, прибрежные воды, острова и береговую линию, собирали данные о приливах и отливах, и делали картографические записи региона. Материалы, полученные из их исследований, очень помогли ученым в будущем, которые также в дальнейшем изучали этот регион.

Первые картирования и научные исследования были проведены русскими учеными в 18-19 веках, включая экспедиции Витуса Беринга и Фаддея Беллинсгаузена.

В 20-м веке начался период систематического исследования физических свойств БМ, таких как температура, соленость, плотность и течения. В 1960-х годах проводились геологические и геофизические исследования с целью поиска углеводородных ресурсов на арктическом шельфе. В последующие десятилетия, в течение 1980-х годов, проводились инженерно-геологические изыскания для строительства нефтегазовых скважин и трубопроводов. В этих исследованиях важную роль сыграли российские, норвежские и другие европейские ученые [3]. Особое внимание было уделено изучению ледового режима, включая анализ распределения льда, его движения и эволюции.

На рубеже 20-21 века, Мурманский морской биологический институт (ММБИ) смог также сыграть значительную роль в изучении биологического разнообразия Баренцева моря. Ученые ММБИ проводили множество экспедиций и собирали данные о флоре, фауне и экосистеме Баренцева моря. Исследования

включали изучение миграций рыб, распространения морских птиц, морских млекопитающих и других животных.

В наше время исследования Баренцева моря осуществляются в рамках международных программ и проектов. Они включают мониторинг климатических изменений, изучение влияния человеческой деятельности на экосистемы моря и оценку устойчивости региона. Сотрудничество между различными странами и научными организациями играет важную роль в обмене знаниями и опытом.

Объединившись, ученые исследуют температурные изменения, изменения ледового покрова, паттерны осадков и другие факторы, которые влияют на климатические условия БМ. Они используют данные спутниковой съемки, а также исторические данные, чтобы анализировать долгосрочные тренды и понять влияние глобальных климатических процессов на этот регион.

Исследования также включают междисциплинарный подход, объединяющий географию, геологию, океанографию, биологию и другие научные дисциплины. Это позволяет ученым получать комплексное представление о морской среде, включая ее физические, химические и биологические свойства, а также ее роль в глобальных экосистемах.

Исследования Баренцева моря также имеют важное значение для разработки стратегий устойчивого использования и охраны этого уникального природного ресурса. Ученые анализируют воздействие человеческой деятельности, такой как рыболовство, судоходство и добыча нефти и газа, на экосистемы моря и их биологическое разнообразие. Они также разрабатывают рекомендации по устойчивому управлению и мерам охраны, чтобы обеспечить сохранение природных ресурсов Баренцева моря для будущих поколений [4].

Таким образом можно сказать, что долгосрочные исследования Баренцева моря отражают усилия ученых по пониманию и изучению этого уникального региона. Климатические исследования, междисциплинарные

исследования и усилия по сохранению и управлению являются ключевыми аспектами этой работы. Дальнейшие исследования в этой области помогут расширить знания о Баренцевом море, его значении для глобальных процессов и внести вклад в разработку устойчивых стратегий использования и охраны этого региона.

## 1.2. География Баренцева моря

Баренцево море является окраинным морем Северного Ледовитого океана, расположенное между берегами Северо-Западной Европы, островом Вайгач и архипелагами Новая Земля, Франца-Иосифа Земля, Шпицберген и островом Медвежий [5]. Оно омывает берега таких стран, как: Норвегия и Россия. Границы моря определены естественными преградами, такими как мыс Нордкап и линия, которая проходит по мысу Святой Нос - мысу Канин Нос, разделяющей его от Белого моря, а также западными побережьями острова Вайгач и архипелага Новая Земля, далее по линии мыс Желания - мысу Кользат.

Баренцево море ограничено параллельными линиями  $81^{\circ}52'$  и  $66^{\circ}44'$  северной широты и меридианами  $16^{\circ}30'$  и  $68^{\circ}32'$  восточной долготы. Как выглядит Баренцево море на физической карте, можно увидеть на Рис.1.2.

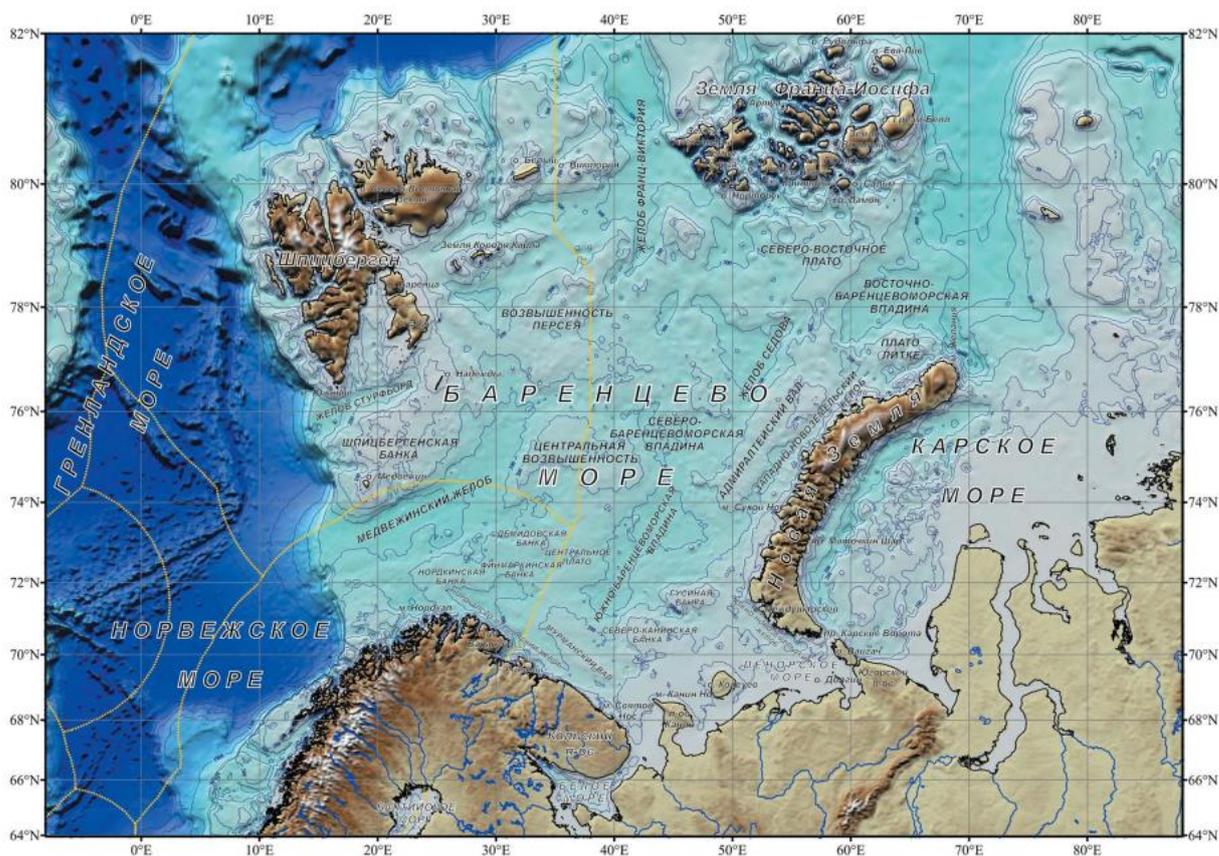


Рис.1.2. Физическая карта Баренцева моря [6].

Баренцево море имеет важное географическое положение и обладает богатыми природными ресурсами. Площадь моря составляет 1424000 квадратных километров, что делает его самым большим по площади в Северном Ледовитом океане и одним из крупнейших в Европе. Объем воды в море составляет 316000 кубических километров, а его наибольшая глубина достигает 600 метров. Вдоль берегов Баренцева моря находятся многочисленные острова, особенно в архипелаге Новая Земля и Земля Франца-Иосифа.

Береговая линия моря имеет протяженность около 2 000 километров, представляя собой разнообразный ландшафт скал, пляжей, утесов и архипелагов, с множеством мысов, заливов, бухт и фьордов. Берега моря имеют различную природу, от абразионных и аккумулятивных до ледяных. Берега Скандинавского полуострова, архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа высокие, скалистые и обрывистые, а на Кольском полуострове они менее раздроблены.

Западное побережье острова Новая Земля невысокое и холмистое, а в северной части острова ледники прямо примыкают к морю [2].

Больше всего в Баренцевом море – абразионных берегов, реже, но также встречаются аккумулятивные и ледяные. Северные берега Скандинавии и Кольского полуострова — имеют гористую поверхность и резко обрываются к морю, изрезаны многочисленными фьордами. Для юго-восточной части моря характерны низменные пологие берега. Западное побережье Новой Земли невысокое и всхолмленное, в его северной части вплотную к морю подходят ледники. Некоторые из них стекают прямо в море. Похожие берега можно встретить на Земле Франца-Иосифа и на одном из островов архипелага Шпицбергена [5].

Баренцево море находится в пределах континентального шельфа, но отличается от других подобных морей своими особенностями. Большая часть его области имеет глубины от 300 до 400 метров. Дно моря в основном состоит из мезокайнозойских осадочных пород, присутствующих на молодой Баренцево-Печорской платформе, а в южной части – из верхнепротерозойских осадочно-вулканогенных комплексов Южно-Баренцево-Тиманской складчатой системы.

Географически, территория моря представляет собой сложно раздробленную подводную равнину с небольшим наклоном от востока на запад. Характерно чередование подводных гряд и желобов различных направлений, а на склонах сформировались террасовидные уступы на глубинах 200 и 70 метров. Наиболее глубокие районы находятся на западе, близ границы с Норвежским морем. В море также встречаются обширные мелководные банки, такие как Центральная возвышенность (с минимальной глубиной 64 м), возвышенность Персея (с минимальной глубиной 51 м), Гусиная банка, разделенная Центральной впадиной (с максимальной глубиной 386 м), а также желобы, включая Западный желоб (с максимальной глубиной 600 м), Франц-Виктория (430 м) и другие.

Южная часть морского дна имеет в основном меньшую глубину, менее 200 метров, и отличается более равнинным рельефом. На дне можно также обнаружить остатки древних береговых линий, следы ледниковых процессов и песчаные гряды, образованные сильными приливными течениями [2].

Поверхность дна Баренцева моря представляет собой разнообразный ландшафт с различными геологическими формами и особенностями. Большая часть БМ имеет континентальный шельф, который простирается вдоль берегов России и Норвегии. Это относительно мелководные области с глубинами до нескольких сотен метров. В пределах данного моря существуют подводные горы и хребты, такие как Литке-Гейзер и Шпицбергенский хребет. Они являются частями геологического строения региона и образуют характерные рельефные особенности на дне моря. В некоторых областях Баренцева моря можно найти впадины и котловины, которые являются углубленными областями на дне моря. Эти глубоководные образования могут достигать значительных глубин. Также некоторые участки дна БМ пронизаны долинами и каньонами, которые могут быть образованы в результате подводного эрозионного процесса. Эти геологические формы создают уникальные экосистемы и служат убежищем для различных видов морской жизни. Само дно моря покрыто различными осадочными отложениями, включая песчаные, глинистые и иловые отложения. Эти осадки формируются в результате осаждения морских организмов, наноса речных материалов и других геологических процессов.

Речной сток имеет значение около 163 км<sup>3</sup>/год. Он на больше, чем 85% сосредоточен в юго-восточной части моря. В данном районе Баренцева моря сливают свои воды самые крупные реки, принадлежащие бассейну этого моря. Основной вклад в водосбор вносит река Печора, которая в среднем сбрасывает около 130 кубических километров воды в год, что составляет примерно 70% общего объема речного стока в море за год. Кроме Печоры, в этот район также впадают менее крупные реки. На северном побережье Норвегии и на берегах Кольского полуострова доля стока составляет всего около 10%. Здесь в

Баренцево море впадают небольшие горные реки, такие как Тулома, Печенга, Западная Лица, Кола, Териберка, Воронья, Рында, Иоканга и другие [5].

Уникальность Баренцева также заключается еще в том, что оно имеет непосредственную связь с Северной Атлантикой и Центральным Арктическим бассейном, таким образом представляя собой определенную область трансформации вещества и энергии теплой и соленой атлантической воды на пути ее следования в Северный Ледовитый Океан [6].

### 1.3 Климат Баренцева моря

Изучение климата Баренцева моря является важным аспектом, позволяющим понять долгосрочные тенденции, изменения и взаимосвязи между океанскими и атмосферными процессами в этом регионе. Это также позволяет оценить влияние глобальных климатических изменений на данной территории.

Баренцево море имеет свой уникальный климат из-за своего географического положения и близости к полярным регионам. Территория обладает полярным морским климатом, который характеризуется переменной погодой и подвержен влиянию теплого Атлантического и холодного Северного Ледовитого океанов. Здесь наблюдаются незначительные колебания температуры воздуха в течение года, короткое холодное лето и относительно теплая зима для данных широт. Район также характеризуется сильными ветрами и высокой относительной влажностью воздуха. Юго-западная часть моря ощущает смягчающее влияние Нордкапской ветви теплого Северо-Атлантического течения. В атмосфере над Баренцевым морем проходит арктический фронт между холодным арктическим воздухом и теплым воздухом умеренных широт. Сдвиг арктического фронта в южном или северном направлении влияет на траектории атлантических циклонов, которые приносят тепло и влагу из Северного Атлантического региона, что приводит к частым изменениям погоды в области Баренцева моря [5].

Рассмотрим основные особенности климата Баренцева моря:

В зимний период температура поверхностных вод Баренцева моря обычно находится ниже нуля градусов Цельсия. В северных частях моря температура может опускаться до -20 градусов Цельсия и ниже. Водная поверхность моря часто покрывается льдом в зимний период. Ледовый покров может быть достаточно толстым и прочным, особенно в северных районах моря. Это создает холодные и непригодные для навигации условия. Летом температуры поверхностных вод Баренцева моря повышаются, но остаются прохладными. В южных частях моря летние температуры могут подниматься до около 10-15 градусов Цельсия, в то время как в северных районах температуры могут быть ниже 10 градусов Цельсия. Холодные температуры Баренцева моря связаны с влиянием холодного Северного Ледовитого океана и арктических течений. Эти течения приносят холодные воды из арктического региона и поддерживают низкие температуры в море.

Холодные температуры Баренцева моря также связаны с характерным полярным морским климатом региона. Низкие температуры воздуха и наличие сильных ветров способствуют охлаждению поверхностных вод.

Данный регион подвержен сильным ветрам, особенно в зимний период. Ветры часто дуют с севера и северо-запада, вызывая холодные и бурные условия. Само море находится в северной части Европы, где сходятся воздушные массы разных климатических зон, эти условия непосредственно влияют на формирование ветров с большими скоростями. А также в БМ преобладают возвышенности и низменности. Данные рельефные особенности влияют на фактор усиления ветра. Температуры воды и земной поверхности сильно различаются, это вызывает интенсивное перемешивание воздуха, что также способствует возникновению ветров больших скоростей [6].

В зимние месяцы Баренцево море покрывается льдом. Интенсивное образование в море начинается на севере с сентября, в центральной области оно

начинается в октябре и на в юго-восточной части в ноябре. В БМ распространены плавающие льды, среди которых можно встретить айсберги. В основном они встречаются у Новой Земли, Земли Франца-Иосифа и у Шпицбергена, из-за того, что айсберги образуются от ледников, спускающихся к водной поверхности с данных островов. Иногда происходит то, что айсберги выносятся течениями ближе к югу, вплоть до Мурманского побережья. В основном айсберги не больше 600 м в длину и 25 м в высоту. Баренцево море, как и другие регионы севера могут иметь длительный сезон льда, который может влиять на судоходство и доступность водных маршрутов [5].

Баренцево море обычно имеют высокую влажность воздуха из-за близости к океанским течениям и расположению в северных широтах. Это может приводить к образованию плотного тумана и облачной погоды. БМ окружено холодными водами Северного Ледовитого океана, которые создают благоприятные условия для образования облачности и тумана над морской поверхностью. Также Баренцево море подвержено влиянию теплого Северо-Атлантического течения, которое приносит с собой влажный воздух, это происходит из за того, что воздушные массы, нагреваясь над относительно теплыми водами течения, насыщаются влагой и переносятся на другие территории. На влажность моря могут еще влиять: арктическая атмосферная циркуляция и перемещение арктического фронта.

Территория Баренцева моря подвержена воздействию различных океанических течений, которые играют важную роль в климате и гидродинамике данной области. Одно из основных течений, оказывающих влияние на Баренцево море, это Норвежское течение. Данное теплое ветвление Северо-Атлантического течения проникает в море через проливы, вблизи архипелагов: Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. Приток теплой и соленой воды из Атлантического океана, осуществляемый Норвежским течением, способствует поддержанию относительно теплого климата в данном регионе. Кроме того, данное течение оказывает воздействие на температуру и перемешивание воды в Баренцевом

море. Также следует упомянуть о теплом морском течении Гольфстриме, который приносит теплую воду в БМ и оказывает влияние на климатические условия в данном регионе. Взаимодействие этих океанических течений с местными факторами, включая ветры, ледяной режим и географические особенности, формирует сложную систему движения воды в Баренцевом море [5].

Тенденция к постепенному увеличению температуры воздуха из года в год оказывает заметное влияние на климатические условия в Баренцевом море. В частности, наблюдается усиление потепления в зимний период, что приводит к сокращению длительности и площади ледового покрова. Такие изменения в ледовом покрове в свою очередь оказывают влияние на альбедо (отражательную способность поверхности) и циркуляцию воды. Важно отметить, что эти изменения могут иметь последствия для теплообмена между океаном и атмосферой, а также для морской жизни, которая неразрывно связана с ледовой средой.

Баренцево море, граничит с Арктическим океаном и находится в Арктическом регионе. Этот регион является особенно важным с точки зрения климатических изменений, так как Арктика нагревается быстрее, чем другие части планеты.

Непосредственной проблемой, негативно влияющей на климат региона, является человеческий фактор. Баренцево море сталкивается с проблемой загрязнения, вызванного промышленными выбросами, судоходством и нефтяными разливами, что негативно сказывается на качестве воды, морской жизни и экологической устойчивости региона. Подобно другим морским регионам, Баренцево море подвержено воздействию различных источников загрязнения, которые могут оказывать влияние на экологическую и климатическую системы. Среди основных источников загрязнения в Баренцевом море следует выделить нефтяные и газовые разливы, вызванные авариями и неправильной эксплуатацией инфраструктуры нефтегазовой добычи. Эти

разливы могут серьезно загрязнять воду, наносить вред морской флоре и фауне, а также негативно влиять на климатическую систему. Промышленные выбросы от предприятий на берегу Баренцева моря являются еще одним источником загрязнения, вводящим в окружающую среду различные вредные вещества, такие как тяжелые металлы, химические соединения и промышленные отходы. Эти загрязнения могут накапливаться в воде и оказывать отрицательное воздействие на живые организмы и экосистему Баренцева моря. Кроме того, другие источники загрязнения включают бытовые и сельскохозяйственные стоки, выбросы от судов и промышленных судоверфей, а также мусор и пластиковые отходы, попадающие в море с побережья. Эти виды загрязнений могут оказывать негативное воздействие на морскую жизнь и вызывать деградацию экосистемы Баренцева моря [7].

Важно отметить, что климатические условия в БМ влияют на морскую жизнь в регионе. Территория моря является уникальной средой, обитанием множества видов морских существ. Холодные температуры и наличие льда оказывают влияние на распределение и разнообразие морских организмов, включая рыбу, морских млекопитающих и птиц. Изменения климата, такие как таяние льда и изменение температур, могут существенно повлиять на эти экосистемы. Баренцево море представляет собой область богатого биологического разнообразия и уникальную экосистему. Его воды населяют различные виды морских организмов, включая разнообразные растительные и животные виды. Флора Баренцева моря характеризуется наличием различных видов водорослей, включая фукусовые, ламинариевые и викинговые водоросли. Важно отметить, что эти водоросли играют важную роль в морской экосистеме, обеспечивая пищу и убежище для многих морских организмов. Фауна региона обладает высоким уровнем разнообразия, включая различные виды рыб, такие как треска, пикша, камбала и макрурус, а также богатые запасы крабов, мидий, гребешков, креветок и других беспозвоночных. Необходимо также отметить наличие морских млекопитающих, таких как белуха и киты, которые выбирают

это место для питания и размножения. Баренцево море также служит убежищем для различных видов морских птиц, включая морских чаек, мурлык и крачек, а также различных видов морских животных, включая медуз, ракообразных, морских червей и других. Ученые и специалисты, работающие в рамках различных научных программ и организаций, проводят исследования и наблюдения, чтобы изучить и охранять биологическое разнообразие Баренцева моря, изучая взаимодействие различных видов, их адаптацию к изменяющимся климатическим условиям и влияние геологических изменений на биологическую продуктивность моря [8].

В общем целом можно сказать, что Баренцево море играет важную роль в глобальном климате и оказывает значительное влияние на погоду и климатические условия в прилегающих районах. Изучение климата данного моря помогает ученым и исследователям лучше понять и прогнозировать изменения в окружающей среде и их последствия.

#### 1.4. Мезомасштабная конвективная облачность в Баренцевом море

МКО в Баренцевом море является одним из важных атмосферных явлений, которые влияют на климат и погоду в этом регионе. На этой территории она происходит в основном в летний период, когда поверхностные воды прогреваются, вызывая различия в температуре и влажности воздуха. Эти условия способствуют возникновению конвекции и образованию облачности.

МКО может проявляться в регионе в виде грозовых туч, кучевых облаков или многослойной облачности с просветами. Она часто сопровождается интенсивными осадками, грозами и сильными ветрами. Такие атмосферные условия могут оказывать влияние на морские процессы, включая циркуляцию воды, вертикальные перемещения планктона и другие биологические процессы.

Для изучения мезомасштабных облачных структур в Баренцевом море используются различные методы наблюдений, включая спутниковую съемку, радарные наблюдения и атмосферные зондирования. Эти данные позволяют получить информацию о структуре, развитии и динамике конвективных облаков, а также о связанных с ними атмосферных параметрах [9].

Уже первые снимки облачности со спутников показывали, что атмосфера буквально наводнена мезомасштабными облачными образованиями, их размеры могут быть самыми разными, начиная от нескольких километров, заканчивая несколькими десятками километров [10]. Самыми наиболее часто встречающимися типами мезомасштабной конвективной облачности, являются: облачные гряды и конвективные ячейки (открытые и закрытые).

Облачные гряды – это система конвективных облаков, которые располагаясь друг возле друга, представляют собой длинные и узкие облачные полосы, которые строятся вдоль границ атмосферных фронтов или при прохождении атмосферных волн. Гряды формируются в области восходящих движений воздуха, и отделяются друг от друга безоблачными пространствами, в которых преобладают нисходящие движения. Они могут образовываться как над океанами, так и над равнинными частями континентов. (Рис.1.3. и 1.4.).



Рис.1.3. Облачные гряды,  
MODIS/TERRA за 07.03.2021 г.

Рис.1.4. Облачные гряды  
MODIS/TERRA за 29.03.2017 г.

ОГ могут иметь различные размеры, вот несколько примеров размеров облачных гряд: Нижние облачные гряды (Такие облака, как слоисто-кучевые обычно имеют протяженность от нескольких километров до десятков километров. Их ширина может варьироваться от нескольких сотен метров до нескольких километров.); Средние ОГ (Облака, такие как высококучевые или средние слоистые облака, обычно имеют больший масштаб. Они могут простираться на десятки или сотни километров в горизонтальном направлении и иметь протяженность от нескольких километров до нескольких десятков километров.) Высокие ОГ (Облака, такие как перистые или высокослоистые облака, могут быть очень протяженными и иметь значительные размеры. Они могут охватывать сотни и даже тысячи километров в горизонтальном направлении) [11].

Гряды облаков могут быть обнаружены в различных частях атмосферы, включая нижние, средние и высокие уровни. В зависимости от высоты, на которой они образуются, гряды облаков могут иметь различные названия. Например, гряды нижних облаков, такие как высокослоистые облака обычно находятся на низкой высоте и имеют характерные слоистые структуры.

Гряды облаков могут связаны с атмосферными явлениями, такими как конвекция, фронты, циклоны. Они могут протягиваться на десятки или даже сотни километров и создавать заметные горизонтальные облачные образования [12].

Открытые конвективные ячейки – это облачные образования, которые имеют квазишестиугольную форму, внутри ячеек находится безоблачное пространство, ограниченное облачным кольцом по периферии (Рис.1.5-1.7).

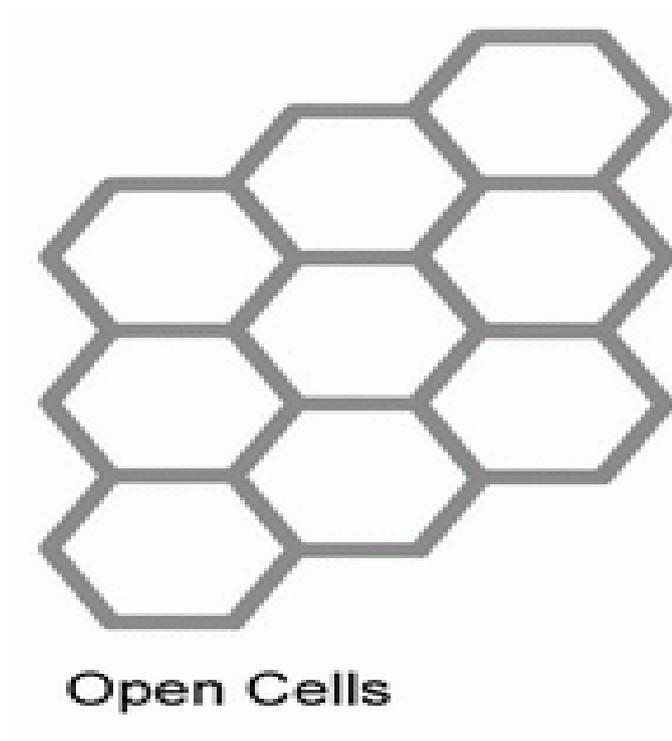


Рис.1.5. Схема гексагональной структуры открытых конвективных ячеек [13].



Рис.1.6. Открытые конвективные ячейки, MODIS/TERRA за 22.03.2023 г.



Рис.1.7. Открытые конвективные ячейки, MODIS/TERRA за 18.03.2016 г.

Верхняя часть ячейки характеризуется восходящим потоком воздуха, где теплый и влажный воздух поднимается вверх. В нижней части ячейки находится нисходящий поток воздуха, где более холодный и сухой воздух спускается вниз. Восходящий поток воздуха может приводить к образованию вертикальных облачных столбов, а также к формированию грозовых туч и кучевых облаков.

Горизонтальные размеры ячеек находятся в диапазоне 10-100 км, чаще всего диаметр ячеек составляет 30-40 км.

Закрытые конвективные ячейки - это облачные структуры квазишестиугольной формы, которые ограничены безоблачным пространством по периферии. Ячейки такой формы образуются из слоисто-кучевых облаков, иногда вместе со слоистыми или кучевыми облаками (Рис. 1.8-1.10).

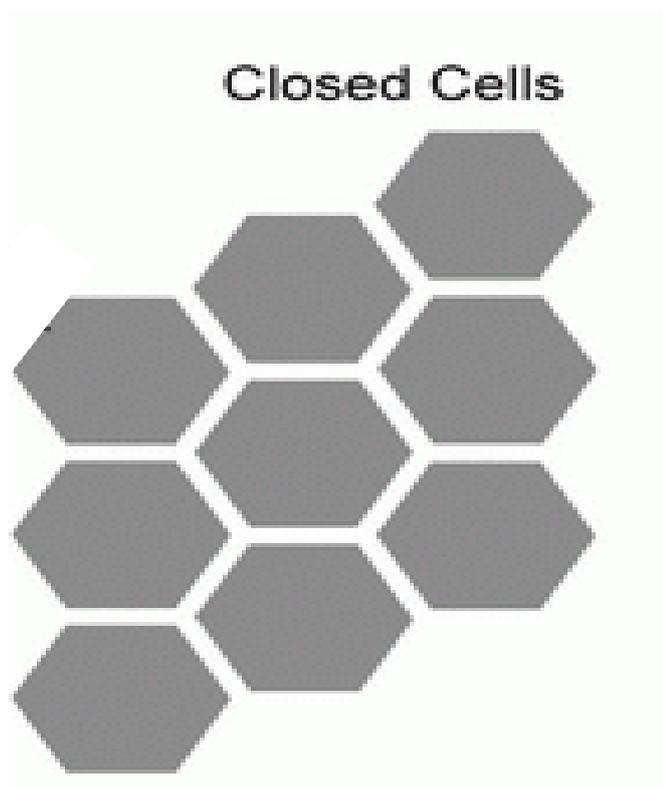


Рис.1.8. Схема гексагональной структуры закрытых конвективных ячеек [13].



Рис.1.9. Закрытые конвективные ячейки, MODIS/TERRA за 27.03.2017 г.



Рис.1.10. Закрытые конвективные ячейки, MODIS/TERRA за 06.09.2022 г.

Масштабы конвективных ячеек могут варьироваться от нескольких километров до нескольких сотен километров. Форма ячеек часто представляет собой полигональную сетку из восходящих и нисходящих потоков воздуха. Верхняя часть ячейки характеризуется восходящим потоком воздуха, где теплый и влажный воздух поднимается вверх. В нижней части ячейки находится нисходящий поток воздуха, где более холодный и сухой воздух спускается вниз. В отличие от открытых конвективных ячеек, в закрытых ячейках нет прямого взаимодействия между верхним и нижним потоками воздуха.

Также, восходящий поток воздуха может приводить к образованию вертикальных облачных столбов, а также к формированию грозовых туч и кучевых облаков.

Закрытые конвективные ячейки могут вызывать различные атмосферные явления, такие как грозы, осадки, сильный ветер и изменение атмосферного давления [12].

## ГЛАВА 2. ДЕШИФРИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ЯЧЕЕК И ГРЯД

### 2.1. Дешифрирование и анализ видимых и инфракрасных космических снимков

Перед тем как приступить к анализу космических снимков, нужно понимать, что особое значение играет относительная яркость объектов, которая может варьировать в различных диапазонах электромагнитного спектра. Поэтому перед непосредственным использованием космических снимков в погодных исследованиях и прогнозах необходимо провести этап идентификации метеорологических или других объектов на изображениях, полученных со спутника. Обычно этот процесс распознавания объектов на снимке называется дешифрированием.

Дешифрирование – это процесс распознавания на снимках различной облачности, льда и снега, а также других объектов, расположенных на земной поверхности, полученных в инфракрасном и видимом участке спектра.

Для хорошего и более полного дешифрирования космических снимков необходимо понимать основные закономерности процессов отражения в видимом участке спектра и излучения в инфракрасном диапазоне, отражательные и излучательные свойства различных подстилающих поверхностей, а также структурные особенности, которые характерны для метеорологических объектов и различной подстилающей поверхности.

Для начала нам нужно понять, что такое видимые и инфракрасные космические снимки, а также как они получаются.

Видимые снимки – это снимки, получающиеся с помощью сенсоров, которые регистрируют электромагнитные волны в видимом диапазоне, то есть в спектре, видимом для человеческого глаза. Они представляют изображения,

основанные на отраженном свете от поверхности Земли. Видимые снимки обладают цветным представлением и позволяют наблюдать различные детали, такие как ландшафты, города, океаны и облачность. Они широко используются для изучения поверхности Земли, изменений в растительном покрове, а также для картографирования и планирования городской среды.

Инфракрасные снимки – это снимки, которые работают в инфракрасном диапазоне спектра, а также который находится за пределами способности человеческого глаза воспринимать. Они измеряют тепловое излучение, испускаемое объектами на поверхности Земли. Инфракрасные снимки позволяют получить информацию о температуре поверхности, распределении облаков, уровне влажности и других параметрах, которые могут быть скрыты в видимом диапазоне. Они широко применяются в метеорологии, изучении климата, а также в анализе почвы, растительности и других геологических и экологических аспектах.

Видимый участок спектра способствует обнаружению и прослеживанию объектов со спутников, таких как облака и открытые участки на земле. Одной из ключевых особенностей этого процесса является способность облаков и подстилающей поверхности отражать падающую на них радиацию. Их отражательные свойства приводят к различной яркости на снимках, что позволяет идентифицировать облачность на фоне земной поверхности [12].

## 2.2. Текстурные признаки

Рисунок на изображении формируется из мелких деталей, которые имеют различную яркость и размеры, сопоставимые с разрешающей способностью прибора. В текстуре выделяются четыре основных типа: зернистая, матовая, волокнистая и дендритовая.

Зернистая текстура характеризуется скоплениями светлых пятен или зерен. Мелкие зерна часто встречаются в кучевообразных облаках, а также в случае мелкобитого льда. Однако зернистая текстура плохо различима на инфракрасных снимках (Рис.2.1 и 2.2).



Рис.2.1. Тип текстуры: зернистая (А – кучевообразная облачность) [12].

Рис.2.1. Тип текстуры: зернистая (Б – мелкобитый лед) [12].

Матовая текстура представляет собой однородный тон изображения. Она характерна для открытых участков водной поверхности, тумана, слоистообразной облачности и сплошных льдов. На инфракрасных снимках матовую текстуру можно наблюдать в кучевых и слоисто-кучевых облаках, если просветы между облачными элементами меньше разрешающих элементов или соизмеримы с ними (Рис.2.3 и 2.4).

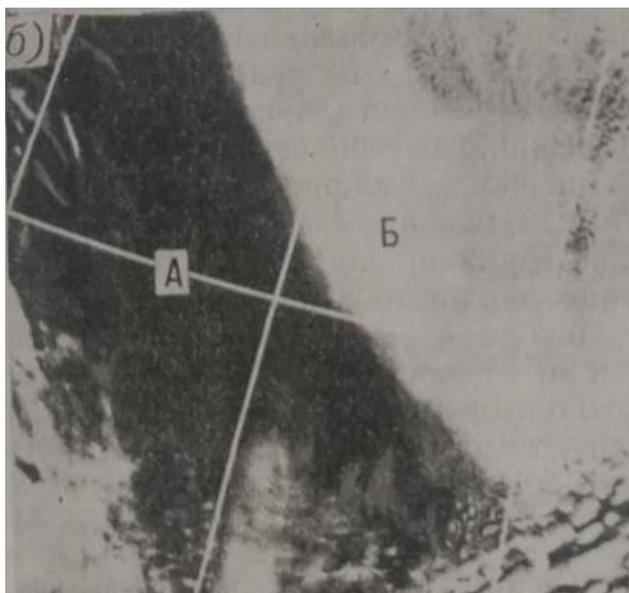


Рис.2.3. Тип текстуры: матовая (А – водная поверхность, Б – слоистообразная облачность) [12].



Рис.2.4. Тип текстуры: матовая (А – водная поверхность, Б – слоистообразная облачность, В – сплошной лед) [12].

Волокнистая текстура представлена волокнами, нитями или полосами небольшой ширины, но протяженными на десятки и сотни километров с размытыми и нечеткими краями. Она характерна для облаков верхних и средних слоев (Рис.2.5).



Рис.2.5. Тип текстуры: волокнистая [12].

Дендритовая текстура является особым типом и присуща изображению суши. Она характерна для гор и равнин, покрытых снегом, а также для районов с разветвленной речной сетью. Этот рисунок наиболее четко просматривается на снимках в видимом участке спектра (Рис.2.6).



Рис.2.6. Тип текстуры: волокнистая [12].

Разработка методики идентификации мезомасштабных конвективных облачных структур на снимках, которые были получены с метеорологических спутников, является актуальной в настоящее время.

### 2.3. Текстурная матрица

Для полной идентификации применяется метод текстурного анализа. Для текстурного анализа можно использовать определенные некоррелированные текстурные признаки, например, такие как: контраст, однородность, энтропия и обратный момент.

Данные текстурные признаки определяются формулами (2.1-2.4) [14]:

- Для контраста:  $C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (i-j)^2 p(i, j),$  (2.1)

- Для однородности:  $U = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p^2(i, j),$  (2.2)

- Для энтропии:  $F = -\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p^2(i, j) \log[p(i, j)],$  (2.3)

- Для обратного момента:  $M = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{p_{i,j}}{1 + (i-j)^2},$  (2.4)

- где N это число уровней яркости, которые используются при текстурном анализе, P (i, j) это частота, с которой пара точек (одна с яркостью i и другая с яркостью j), расположенных на расстоянии r в направлении  $\alpha$ , встречаются на изображении.

Для того, чтобы лучше понять, что из себя представляют текстурные признаки, нужно разобраться, что такое текстурная матрица, а в частности – матрица смежности (МСМ) или как ее еще называют – гистограмма II порядка.

Квадратная матрица, известная как гистограмма II порядка, используется для анализа изображений. Размер этой матрицы зависит от количества цветов, используемых в изображении. Все элементы матрицы  $P_{r,\alpha}(i, j)$  отражают частоту, с которой пара точек (одна с яркостью j и другая с яркостью i), расположенных на расстоянии r в направлении  $\alpha$ , встречаются на изображении.

Для полной идентификации применяется метод текстурного анализа. Для текстурного анализа можно использовать определенные некоррелированные текстурные признаки, например, такие как: контраст, однородность, энтропия и обратный момент.

В основном, для оценки матрицы смежности, вычисляется средняя матрица смежности, учитывая четыре направления при межпиксельном расстоянии  $r = 1$ . (Рис. 2.7):

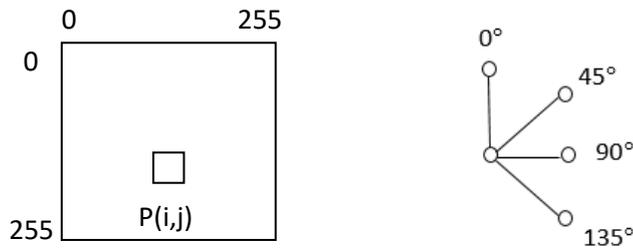


Рис. 2.7. Средняя матрица смежности по четырем направлениям.

$$P(i,j) = (P_{0^\circ} + P_{45^\circ} + P_{90^\circ} + P_{135^\circ}) / 4, \text{ где} \quad (2.5)$$

$P_{0^\circ}$  - количество пар пиксел с яркостями  $i, j$ , расположенных на соседних строках, а  $P_{45^\circ}, P_{135^\circ}$  - количество пар пиксел с яркостями  $i, j$ , расположенных на соседних строках по диагонали:

$$P_{0^\circ}(i,j) = \sum_{x,y} 1 \left| B(x,y) = i, B(x,y-1) = j \right. \quad (2.6)$$

$$P_{45^\circ}(i,j) = \sum_{x,y} 1 \left| B(x,y) = i, B(x+1,y-1) = j \right. \quad (2.7)$$

$$P_{135^\circ}(i,j) = \sum_{x,y} 1 \left| B(x,y) = i, B(x-1,y-1) = j \right. \quad (2.8)$$

МСМ можно сделать графически, для этого по обеим осям откладываются определенные уровни яркости. Если брать стандартную градацию в 256 цветов, то можно получить поле 256 на 256 элементов, каждое из которых имеет какое-то значение  $p(i,j)$ . В матрице смежности любой элемент обозначается определенным цветом из черно-белой шкалы. Если смотреть на градацию цвета на шкале, то можно будет увидеть, что черный цвет имеет максимальное значение  $p(i,j)$ , белый, наоборот, минимальное.

Если матрица смежности выглядит как однородное серое поле, то это означает, что изображение похоже на "белый шум".

Также может быть, что на изображении могут присутствовать только два цвета, как показано на Рис. 2.8, в этом случае МСМ будет выглядеть так, как представлено на Рис. 2.9.

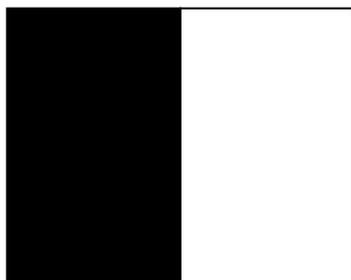


Рис.2.8. Изображение

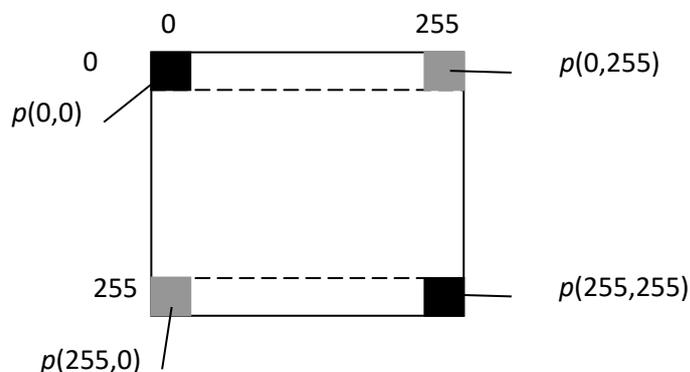


Рис.2.9. Матрица смежности

Как мы видим, все поле МСМ не имеет закрашенных элементов, кроме крайних четырех пикселей, которые имеют значения, отличные от нуля. Количество элементов, расположенных на главной диагонали (пунктир на рисунке), значительно превышает количество элементов МСМ, которые не находятся на ней. Это соответствует рис. 2.8: количество соседних точек с цветами "белый" - "белый" или "черный" - "черный" гораздо больше, чем количество соседних точек с цветами "черный" - "белый" или "белый" - "черный" [15].

В нашей дальнейшей работе, мы будем строить МСМ для трех типов мезомасштабной конвективной облачности: облачных гряд, открытых и закрытых конвективных ячеек. Все они имеют свой особенный рисунок, отличающийся от других типов облачных структур (Рис.2.10 – 2.15).

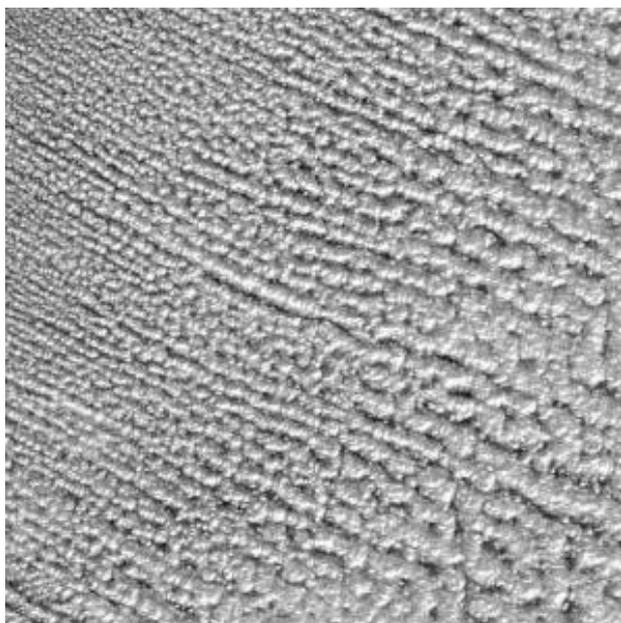


Рис.2.10. Облачные гряды,  
TERRA/MODIS 12.04.2017 г.

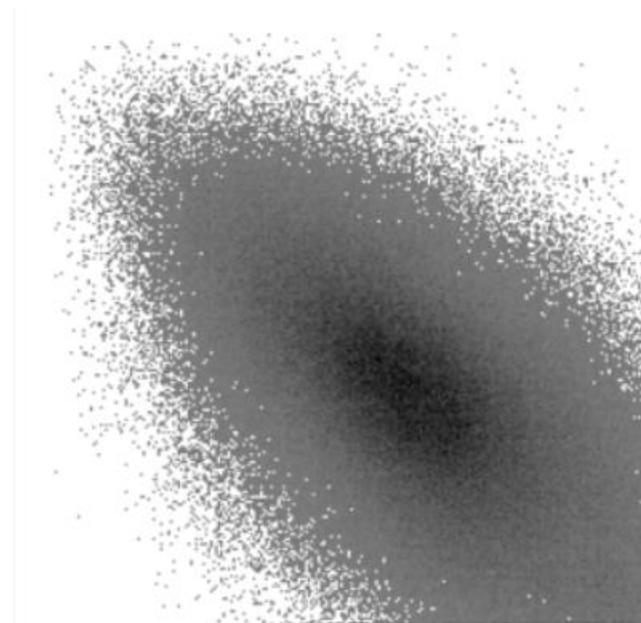


Рис.2.11. Матрица смежности для  
Рис.2.10

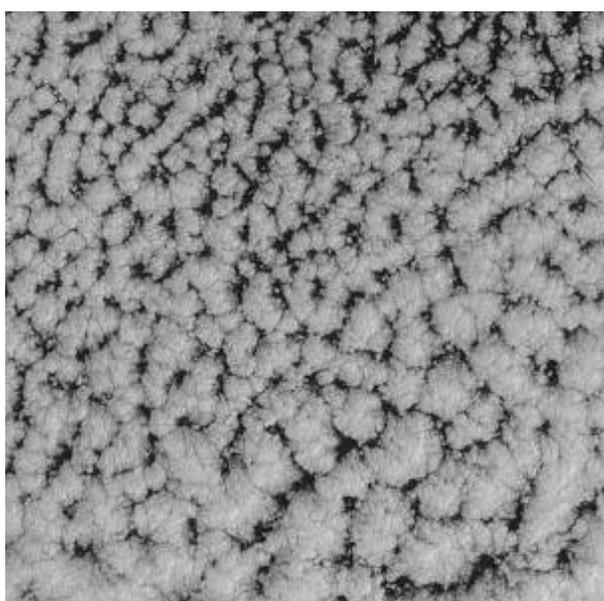


Рис.2.12. Открытые конвективные  
ячейки, TERRA/MODIS 10.03.2017 г.

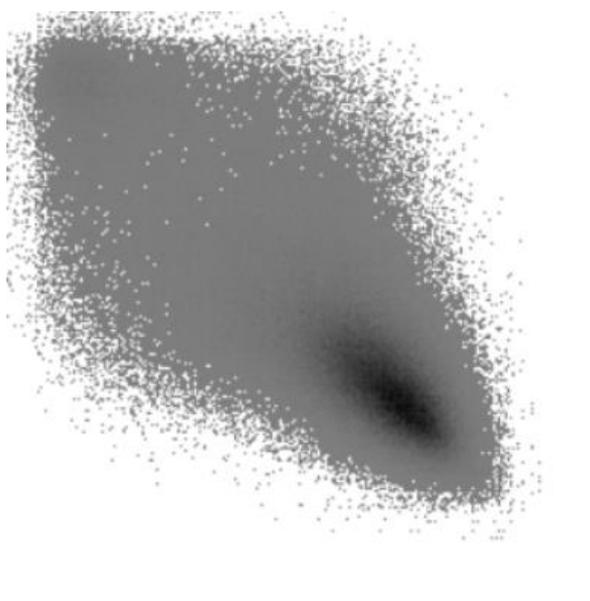


Рис.2.13. Матрица смежности для  
Рис.2.12

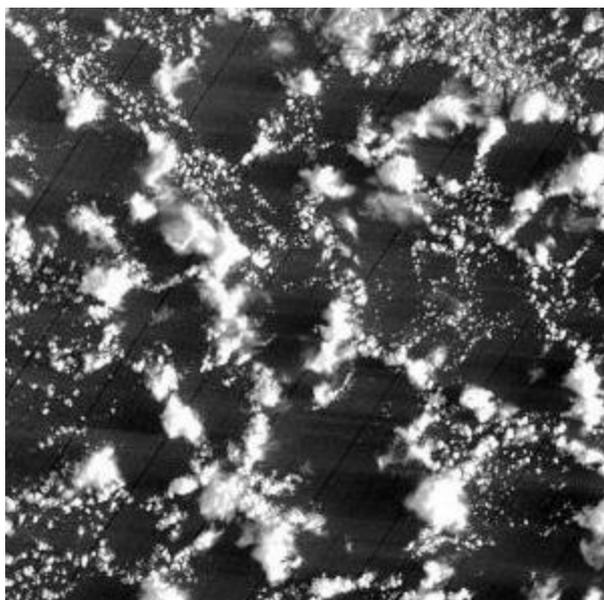


Рис.2.14. Закрытые конвективные ячейки, TERRA/MODIS 06.02.2016 г.

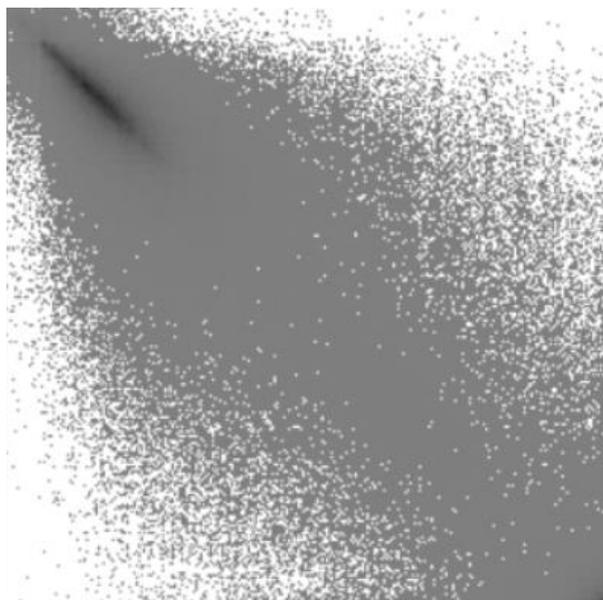


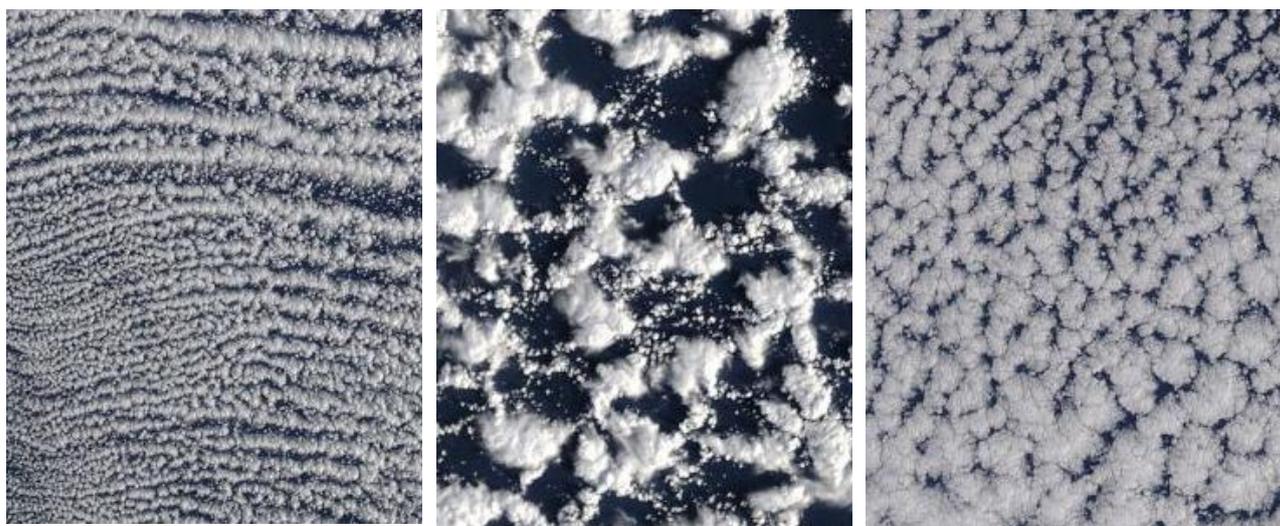
Рис.2.15. Матрица смежности для Рис.2.14

Как мы видим, каждый тип облачности имеет свой характерный рисунок в матрице смежности. Также различаются и текстурные признаки, используя которые, можно найти определенную связь между ними и другими компонентами снимка.

## ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЗОМАСШТАБНЫХ ОБЛАЧНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ЯЧЕЕК И ГРЯД ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ

### 3.1. Формирование архива спутниковых снимков мезомасштабных облачных конвективных ячеек и гряд

Для анализа характеристик мезомасштабных облачных ячеек и гряд был сформирован архив спутниковых снимков, состоящий из: 30 фрагментов снимков облачных гряд, 30 фрагментов открытых конвективных ячеек и 30 фрагментов закрытых конвективных ячеек (Рис.3.1). Итого 90 снимков. Все снимки были сделаны в акватории Баренцева моря в период с 2014 по 2023 гг. Каждое изображение имеет одинаковый размер, который составляет 300x300 пикселей и было получено датчиком MODIS/TERRA.



Облачные гряды,  
TERRA/MODIS  
05.04.2023 г.

Открытые конвективные  
ячейки, TERRA/MODIS  
21.03.2023 г.

Закрытые конвективные  
ячейки, TERRA/MODIS  
12.04.2023 г.

Рис.3.1. Фрагменты изображений мезомасштабной конвективной облачности.

Сам спутник TERRA является одним из ключевых космических аппаратов NASA, входящих в состав программы Земля-наблюдение в рамках

Миссии по исследованию земной системы (Earth Observing System, EOS). Спутник был запущен 18 декабря 1999 года с космодрома Ванденберг в Калифорнии. На борту спутника Terra размещается несколько приборов, включая важный инструмент MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), предназначенный для наблюдения и измерения характеристик земной поверхности и атмосферы. MODIS является высокоуровневой оптико-электронной системой, способной предоставлять данные о состоянии и динамике планеты Земля в различных спектральных диапазонах. Также MODIS предоставляет данные с различным пространственным разрешением, включая 250 м, 500 м и 1 км, что позволяет анализировать и изучать разнообразные процессы на земной поверхности.

Все наши снимки были сделаны с пространственным разрешением 500 м.

### 3.2. Тематическая обработка изображений

После создания архива снимков была построена матрица смежности по каждому фрагменту, а также по формулам (2.1-2.4) вычислены четыре текстурных признака, такие как: обратный момент, контраст, энтропия и однородность. Признак однородности отсутствует в анализе, так как его значения для всех снимков было равно нулю при заданной точности.

В табл.3.1. приведены значения текстурных признаков, полученных по фрагментам снимков облачных гряд. Анализ таблицы показал, что среднее значение обратного момента составляет 0,053, при этом значение среднеквадратического отклонения равно 0,021, т.е величина обратного момента колеблется от 0,032 до 0,074. При этом, значение контраста варьируется от 0,011 до 0,027, соответственно среднее значение этой величины составляет 0,019, а среднеквадратическое – 0,008. Разброс значений энтропии составляет  $\pm 0,042$  при среднем значении 0,748.

Табл. 3.1. Текстурные признаки облачных гряд.

№	Обратный момент	Контраст	Энтропия
1	0,038	0,021	0,76
2	0,049	0,013	0,747
3	0,058	0,012	0,746
4	0,033	0,026	0,788
5	0,033	0,026	0,788
6	0,03	0,033	0,81
7	0,064	0,014	0,731
8	0,083	0,005	0,653
9	0,05	0,016	0,731
10	0,043	0,022	0,767
11	0,075	0,008	0,683
12	0,03	0,031	0,801
13	0,144	0,002	0,593
14	0,081	0,009	0,689
15	0,123	0,004	0,66
16	0,058	0,012	0,718
17	0,035	0,024	0,773
18	0,04	0,02	0,75
19	0,032	0,024	0,783
20	0,052	0,01	0,73
21	0,031	0,037	0,82
22	0,095	0,006	0,671
23	0,036	0,026	0,793
24	0,036	0,025	0,781
25	0,034	0,023	0,789
26	0,041	0,019	0,777
27	0,033	0,027	0,793
28	0,036	0,024	0,783
29	0,034	0,024	0,783
30	0,054	0,015	0,735
Среднее значение	0,053	0,019	0,748
Среднеквадратическое отклонение	0,021	0,008	0,042

В табл.3.2. приведены значения текстурных признаков, полученных по фрагментам снимков открытых конвективных ячеек. Анализ таблицы показал, что среднее значение обратного момента составляет 0,099, при этом значение

среднеквадратического отклонения равно 0,023, т.е величина обратного момента колеблется от 0,076 до 0,122. Значение контраста варьируется от 0,016 до 0,024, соответственно среднее значение этой величины составляет 0,020, а среднеквадратическое – 0,004. Разброс значений энтропии составляет  $\pm 0,021$  при среднем значении 0,753.

Табл. 3.2. Текстурные признаки открытых конвективных ячеек.

№	Обратный момент	Контраст	Энтропия
1	0,146	0,013	0,73
2	0,109	0,011	0,728
3	0,055	0,031	0,796
4	0,065	0,024	0,784
5	0,088	0,024	0,776
6	0,063	0,021	0,774
7	0,096	0,022	0,748
8	0,077	0,018	0,775
9	0,083	0,02	0,774
10	0,11	0,02	0,728
11	0,116	0,018	0,739
12	0,078	0,015	0,769
13	0,125	0,017	0,747
14	0,141	0,015	0,729
15	0,084	0,013	0,777
16	0,135	0,015	0,726
17	0,077	0,024	0,752
18	0,111	0,02	0,73
19	0,16	0,02	0,679
20	0,14	0,013	0,721
21	0,103	0,027	0,753
22	0,078	0,021	0,777
23	0,124	0,021	0,73
24	0,088	0,026	0,752
25	0,119	0,017	0,745
26	0,074	0,023	0,778
27	0,072	0,019	0,781
28	0,08	0,018	0,777
29	0,095	0,022	0,752
30	0,08	0,018	0,769

№	Обратный момент	Контраст	Энтропия
Среднее значение	0,099	0,020	0,753
Среднеквадратическое отклонение	0,023	0,004	0,021

В табл.3.3. приведены значения текстурных признаков, полученных по фрагментам снимков закрытых конвективных ячеек. Анализ таблицы показал, что среднее значение обратного момента составляет 0,114, при этом значение среднеквадратического отклонения равно 0,047, т.е величина обратного момента колеблется от 0,067 до 0,161. Значение контраста варьируется от 0,002 до 0,012, соответственно среднее значение этой величины составляет 0,007, а среднеквадратическое – 0,004. Разброс значений энтропии составляет  $\pm 0,066$  при среднем значении 0,655.

Табл. 3.3. Текстуальные признаки закрытых конвективных ячеек.

№	Обратный момент	Контраст	Энтропия
1	0,136	0,002	0,597
2	0,045	0,016	0,753
3	0,066	0,009	0,704
4	0,121	0,004	0,618
5	0,155	0,002	0,597
6	0,089	0,005	0,652
7	0,063	0,009	0,71
8	0,161	0,002	0,577
9	0,115	0,004	0,639
10	0,214	0,001	0,56
11	0,104	0,004	0,643
12	0,216	0,001	0,537
13	0,249	0,001	0,539
14	0,138	0,003	0,614
15	0,143	0,002	0,582
16	0,108	0,005	0,64
17	0,082	0,007	0,677
18	0,197	0,001	0,563

№	Обратный момент	Контраст	Энтропия
19	0,132	0,004	0,627
20	0,061	0,01	0,722
21	0,112	0,003	0,622
22	0,063	0,012	0,728
23	0,061	0,01	0,73
24	0,046	0,019	0,784
25	0,04	0,023	0,792
26	0,049	0,02	0,784
27	0,044	0,021	0,783
28	0,073	0,008	0,686
29	0,194	0,001	0,565
30	0,13	0,003	0,62
Среднее значение	0,114	0,007	0,655
Среднеквадратическое отклонение	0,047	0,005	0,066

В целом максимальное среднее значение обратного момента и среднеквадратического отклонения характерно для закрытых конвективных ячеек, а минимальное для облачных гряд.

Максимальное среднее значение контраста характерно для открытых конвективных ячеек, а максимальное значение среднеквадратического отклонения для облачных гряд, минимальное среднее значение наблюдается у закрытых конвективных ячеек, а минимальное значение среднеквадратического отклонения у открытых конвективных ячеек.

Максимальное среднее значение энтропии характерно для открытых конвективных ячеек, а максимальное значение среднеквадратического отклонения для закрытых конвективных ячеек, минимальное среднее значение наблюдается у закрытых конвективных ячеек, а минимальное значение среднеквадратического отклонения у открытых конвективных ячеек.

На Рис.3.2. приведен график повторяемости значения обратного момента для различных типов мезомасштабной облачности. Как видно из рисунка,

наиболее близкие значения этого текстурного признака встречаются для облачных гряд, что делает его наиболее показательным при дешифрировании этого вида облачных структур. Наоборот, повторяемость значений этого признака для закрытых ячеек примерно одинаково для всего диапазона, т.е для данного вида облачных структур он является наименее информативным.

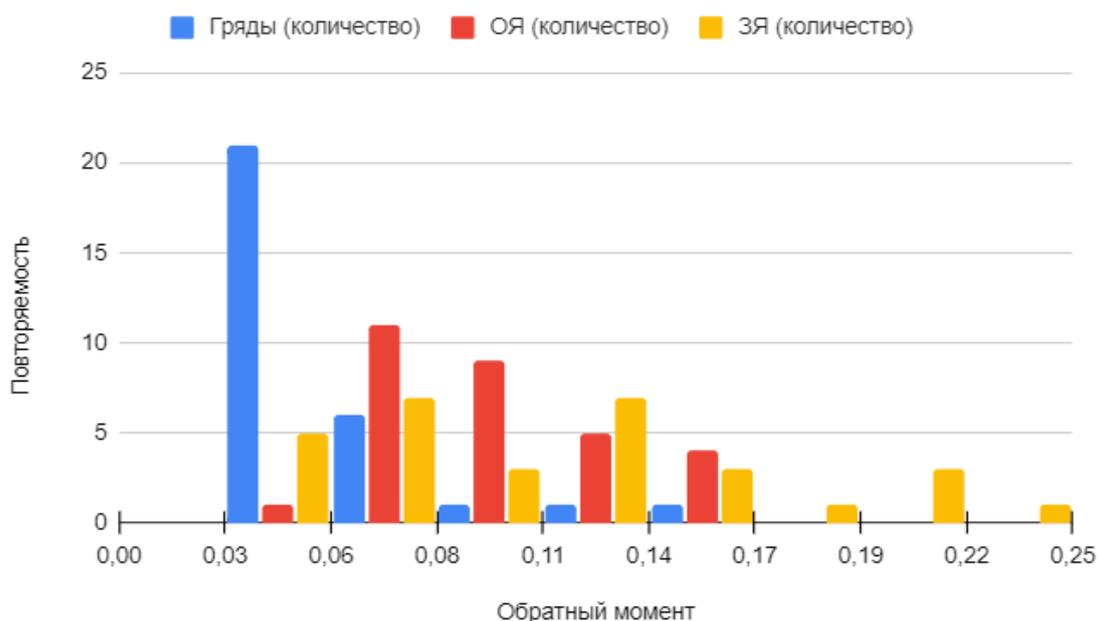


Рис.3.2. Гистограмма повторяемости значения обратного момента для различных типов мезомасштабной облачности.

На Рис.3.3. приведен график повторяемости значения контраста для разных типов мезомасштабной облачности. На рисунке можно увидеть, что наиболее близкие значения этого текстурного признака встречаются для закрытых конвективных ячеек, что делает его наиболее показательным при дешифрировании этого вида облачных структур. Наоборот, повторяемость значений этого признака для облачных гряд примерно одинаково для всего диапазона, а значит для данного вида облачных структур он является наименее информативным.

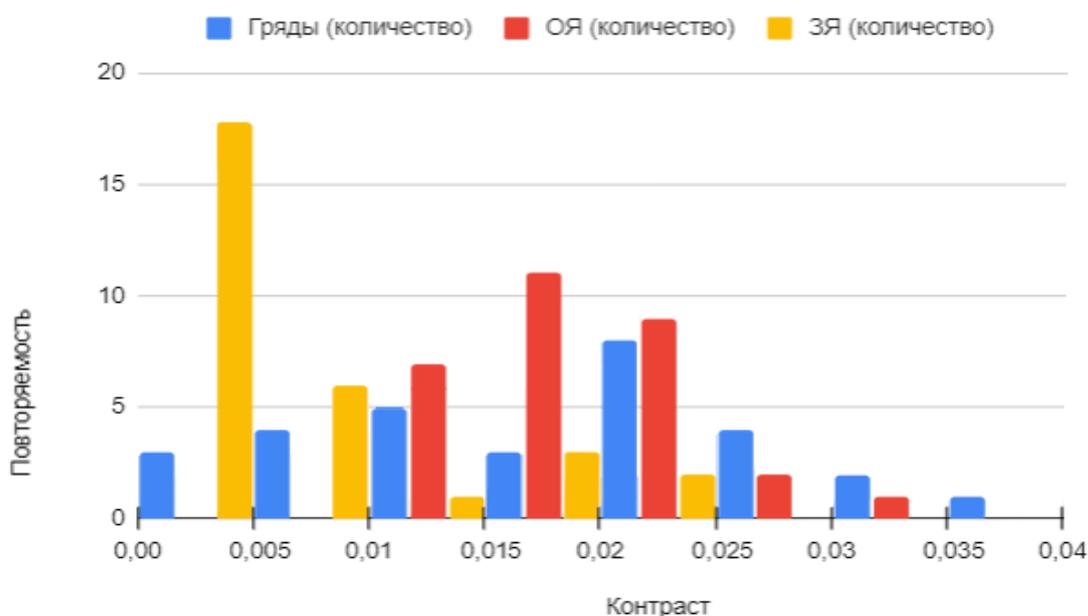


Рис.3.3. Гистограмма повторяемости значения контраста для различных типов мезомасштабной облачности.

На Рис.3.4. приведен график повторяемости значения энтропии для разных типов мезомасштабной облачности. На рисунке можно увидеть, что наиболее близкие значения этого текстурного признака встречаются для облачных гряд и открытых конвективных ячеек, что делает его наиболее показательным при дешифрировании этого вида облачных структур. Самой менее информативной считается облачная структура закрытых конвективных ячеек, так как значения этого признака имеют примерно одинаковую повторяемость для всего диапазона.

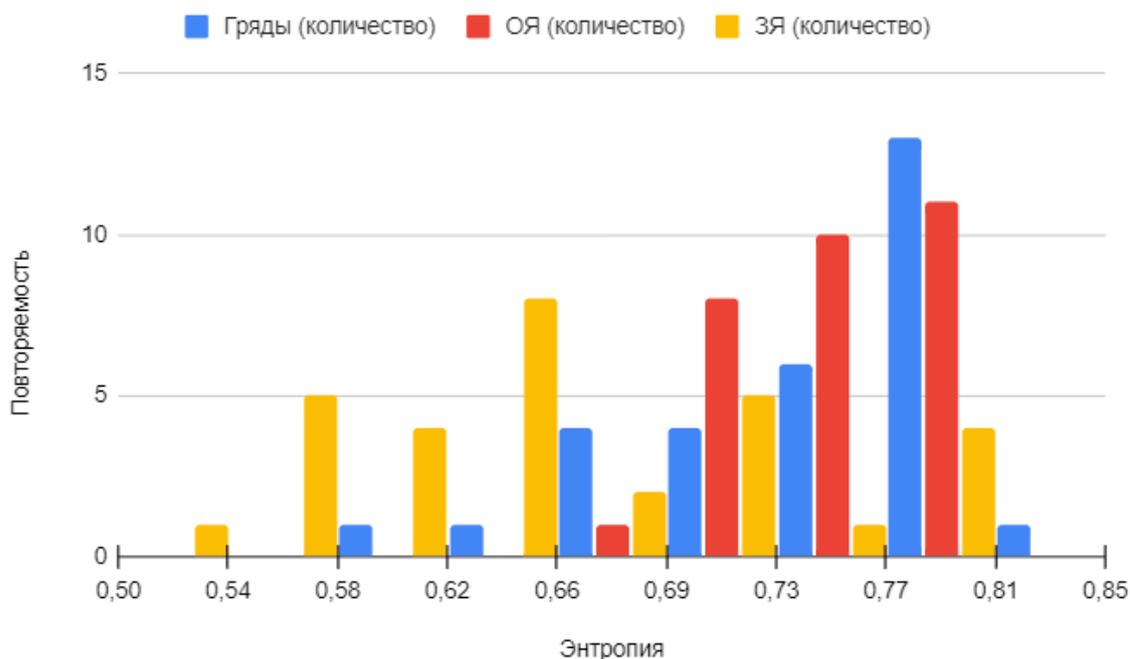


Рис.3.4. Гистограмма повторяемости значения энтропии для различных типов мезомасштабной облачности.

### 3.3. Анализ характеристик облачных систем

По фрагментам снимков были измерены следующие характеристики: расстояние между облачными грядками и диаметр открытых и закрытых конвективных ячеек (Табл.3.4).

Табл. 3.4. Пространственные характеристики различных типов мезомасштабной облачности.

№	Расстояние между грядками	Диаметр ОЯ	Диаметр ЗЯ
1	8,5	31,3	17,9
2	6,4	25,9	13,3
3	12,7	18,9	11,3
4	7,7	15,2	17,3
5	7,4	30	11

№	Расстояние между грядками	Диаметр ОЯ	Диаметр ЗЯ
6	8,5	15,9	15,3
7	7,7	24,3	24,2
8	8,9	20,4	11,3
9	7,7	23,7	6,8
10	5,3	29,4	28,3
11	9,9	25,5	15,6
12	5,2	24,5	6,5
13	8,8	30,3	5
14	8,2	30	9,1
15	9,3	20,9	8,5
16	6,3	31,8	15,6
17	7,2	18,9	10
18	10,6	19,2	11,3
19	4	27,7	19
20	6,1	31,1	10,9
21	6,6	25,4	13,1
22	13,4	23,2	9,6
23	6	30,7	12,4
24	6,5	24,8	11,6
25	6,4	21,8	15,9
26	10	22,6	13,5
27	11	24,9	12,4
28	8,7	21,2	10,8
29	5,1	29,7	10,4
30	6,1	28,9	10
Среднее значение	7,9	24,9	12,9
Среднеквадратическое отклонение	1,7	3,9	3,6

В ходе работы были также проанализированы связи между текстурными признаками и пространственными характеристиками различных типов конвективных облачных структур.

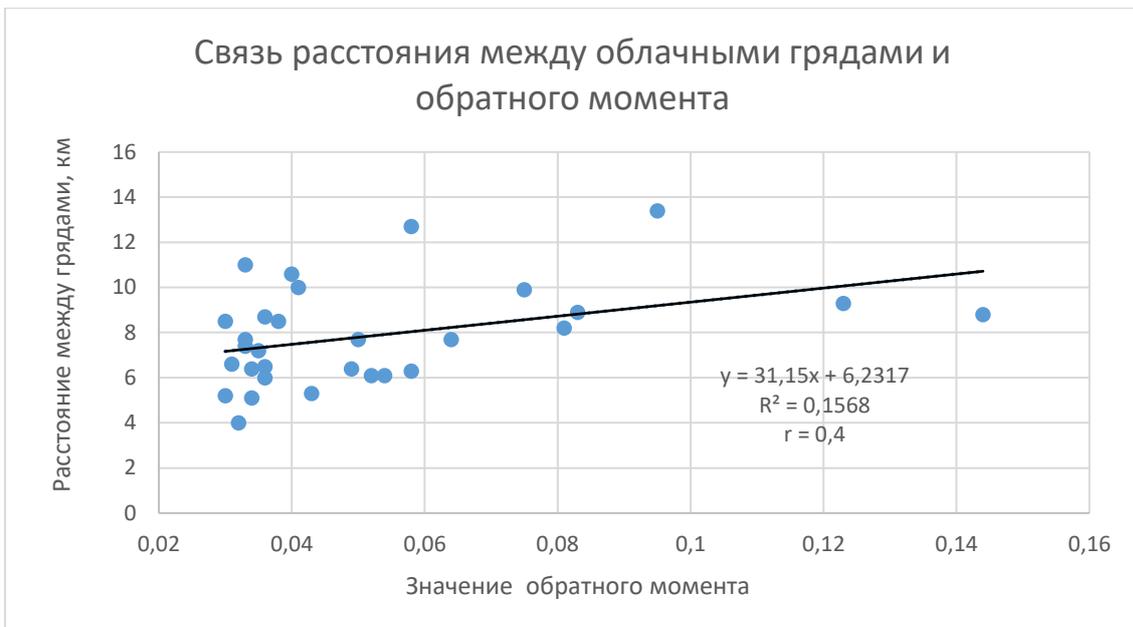


Рис.3.5. Связь расстояния между облачными грядками и обратного момента.

Коэффициент корреляции ( $r$ ) между значением обратного момента и расстоянием между грядками составляет 0,4, что соответствует уровню значимости 0,05 ( $r_{0,05} = 0,361$ ) [16].

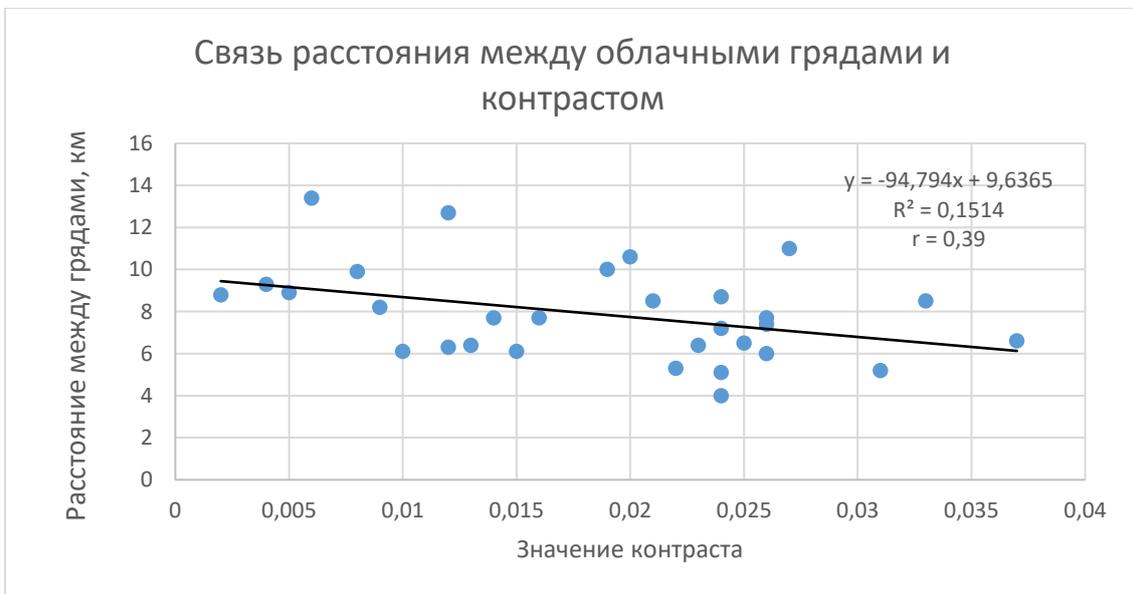


Рис.3.6. Связь расстояния между облачными грядками и контрастом.

Коэффициент корреляции ( $r$ ) между значением контраста и расстоянием между грядами составляет 0,39, что соответствует уровню значимости 0,05 ( $r_{0,05} = 0,361$ ) [16].

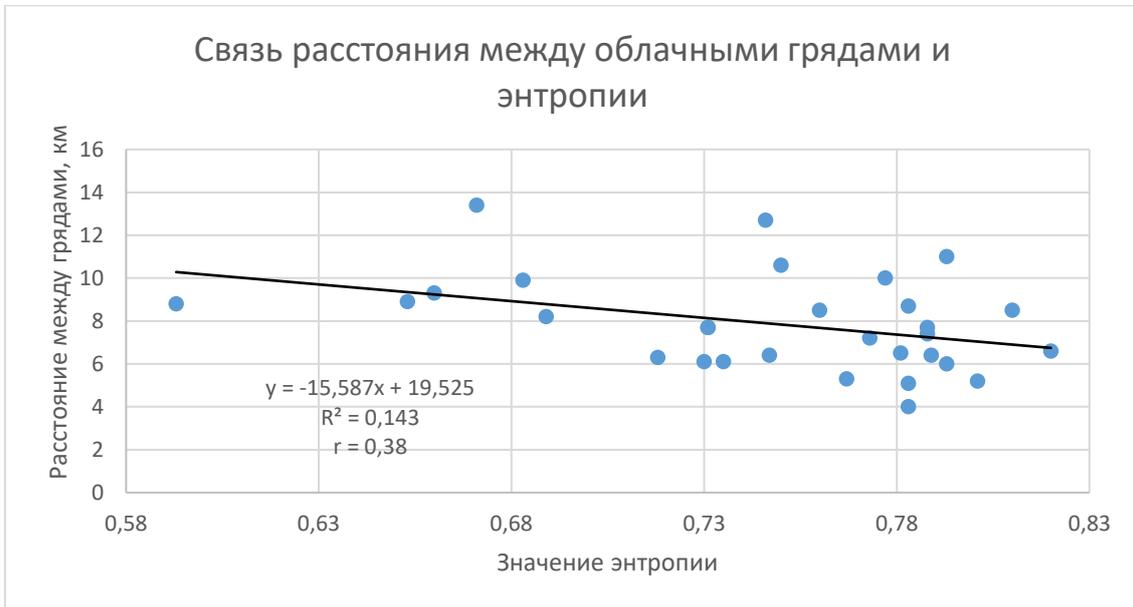


Рис.3.7. Связь расстояния между облачными грядами и энтропии.

Коэффициент корреляции ( $r$ ) между значением энтропии и расстоянием между грядами составляет 0,38, что соответствует уровню значимости 0,05 ( $r_{0,05} = 0,361$ ) [16].

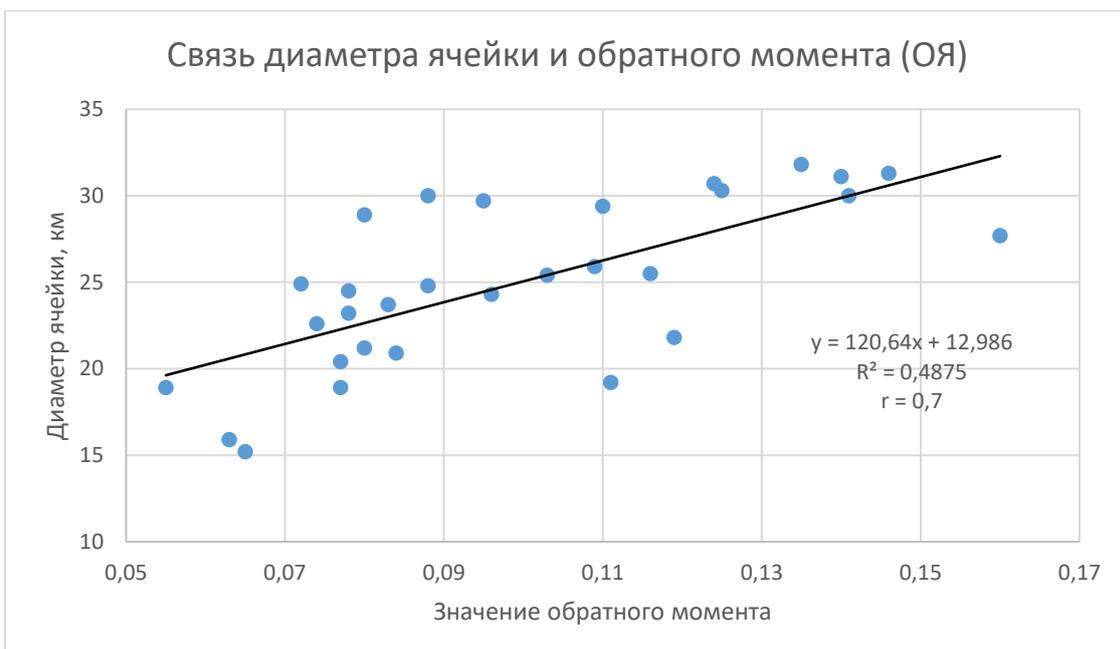


Рис.3.8. Связь диаметра ячейки и обратного момента.

Коэффициент корреляции ( $r$ ) между значением обратного момента и диаметром ячейки составляет 0,7, что соответствует уровню значимости 0,05 ( $r_{0,05} = 0,361$ ) [16].

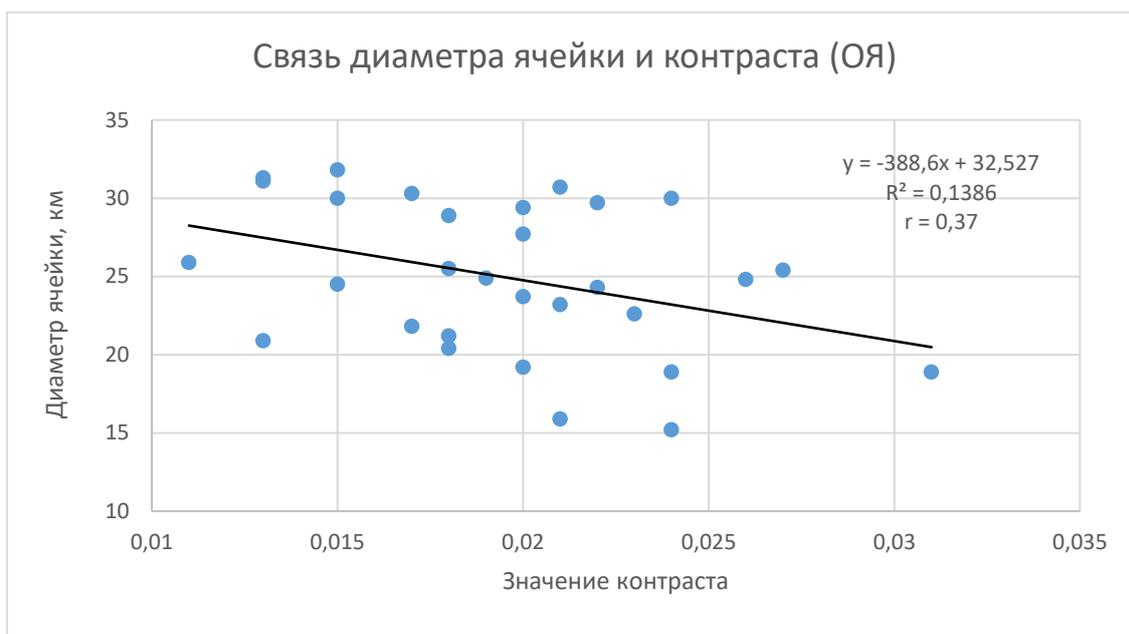


Рис.3.9. Связь диаметра ячейки и контраста.

Коэффициент корреляции ( $r$ ) между значением контраста и диаметром ячейки составляет 0,37, что соответствует уровню значимости 0,05 ( $r_{0,05} = 0,361$ ) [16].

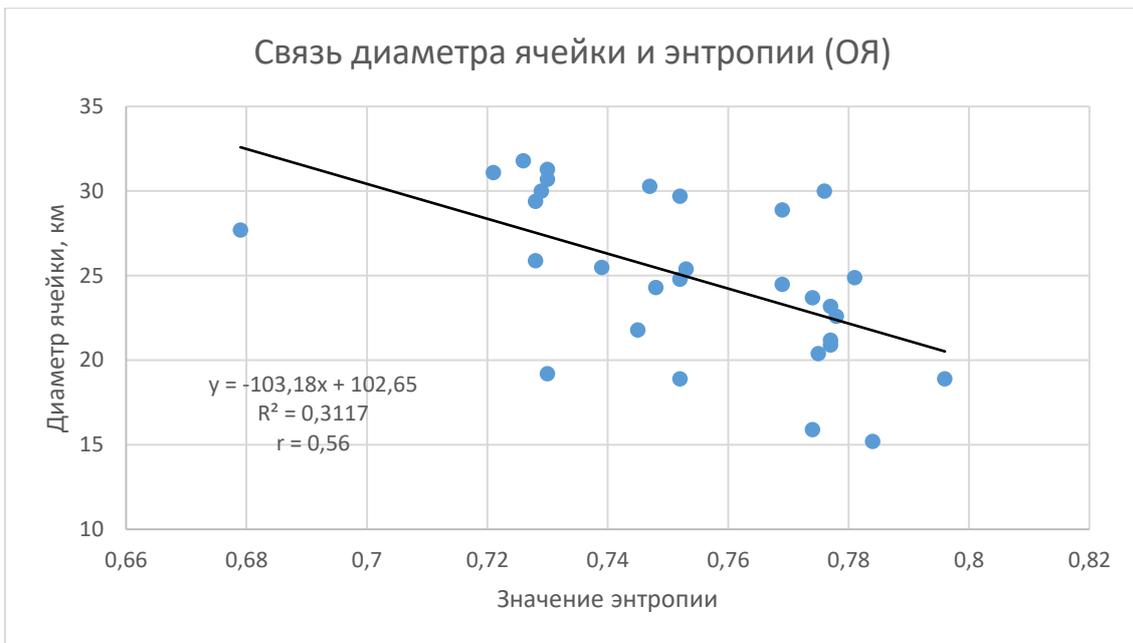


Рис.3.10. Связь диаметра ячейки и энтропии.

Коэффициент корреляции ( $r$ ) между значением энтропии и диаметром ячейки составляет 0,56, что соответствует уровню значимости 0,05 ( $r_{0,05} = 0,361$ ) [16].

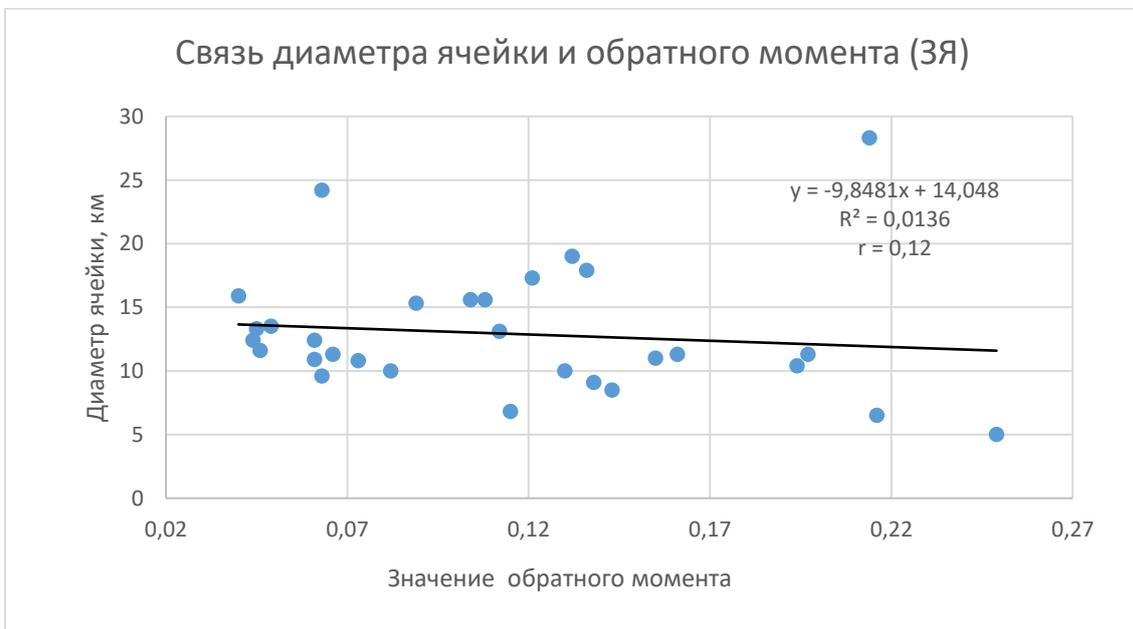


Рис.3.11. Связь диаметра ячейки и обратного момента.

Коэффициент корреляции ( $r$ ) между значением обратного момента и диаметром ячейки составляет 0,12.

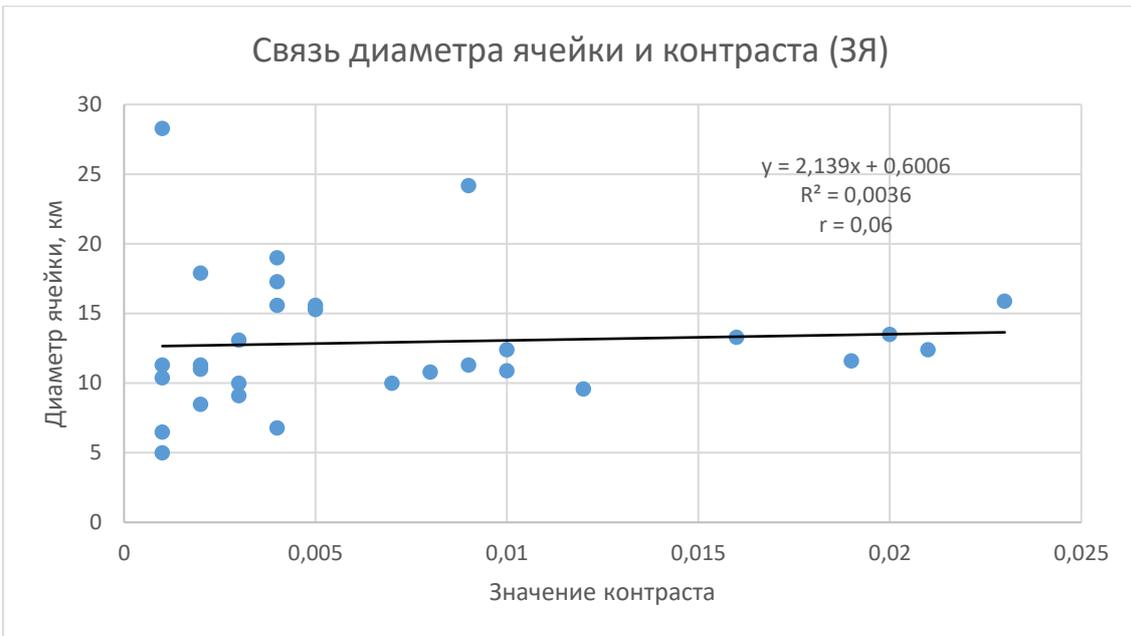


Рис.3.12. Связь диаметра ячейки и контраста.

Коэффициент корреляции ( $r$ ) между значением контраста и диаметром ячейки составляет 0,06.

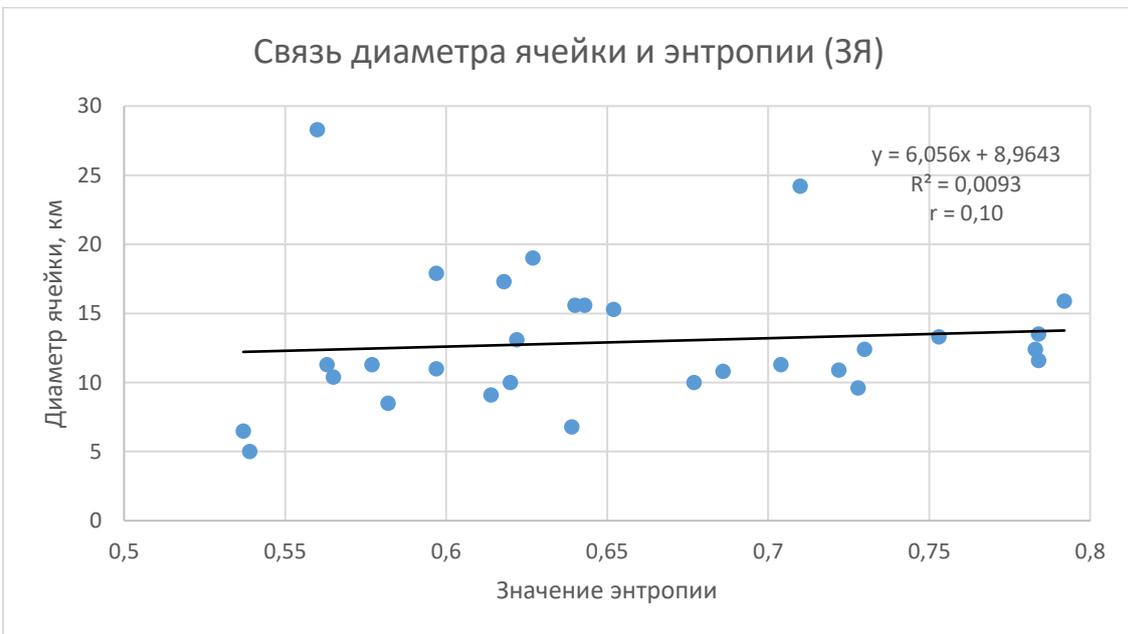


Рис.3.13. Связь диаметра ячейки и энтропии.

Коэффициент корреляции ( $r$ ) между значением энтропии и диаметром ячейки составляет 0,10.

Как следует из рисунков статистически значимая линейная зависимость (на уровне 0,05) [16] наблюдается между облачными грядками и открытыми конвективными ячейками, что позволяет, в принципе, использовать текстурные признаки для определения пространственных характеристик соответствующих облачных структур.

#### 3.4. Определение мощности конвективного слоя.

В дальнейшем на основании эмпирических формул (3.1, 3.2, 3.3) были рассчитаны мощности конвективного слоя для каждого типа конвективной облачности [12].

Мощность слоя для открытых конвективных ячеек:

$$h = D/30, \quad (3.1)$$

где  $D$  – диаметр открытых конвективных ячеек.

Мощность слоя для закрытых конвективных ячеек:

$$h = D/21, \quad (3.2)$$

где  $D$  – диаметр закрытых конвективных ячеек.

Мощность слоя для облачных гряд:

$$h = D/6, \quad (3.3)$$

где  $D$  – расстояние между облачными грядками.

После всех расчетов, значения были внесены в Табл. 3.5.

Табл. 3.5. Мощность конвективного слоя для различных типов мезомасштабных облачных структур.

№	Мощность конвективного слоя (облачные гряды)	Мощность конвективного слоя (ОЯ)	Мощность конвективного слоя (ЗЯ)
1	1,42	1,04	0,85
2	1,07	0,86	0,63
3	2,12	0,63	0,54
4	1,28	0,51	0,82
5	1,23	1,00	0,52
6	1,42	0,53	0,73
7	1,28	0,81	1,15
8	1,48	0,68	0,54
9	1,28	0,79	0,32
10	0,88	0,98	1,35
11	1,65	0,85	0,74
12	0,87	0,82	0,31
13	1,47	1,01	0,24
14	1,37	1,00	0,43
15	1,55	0,70	0,40
16	1,05	1,06	0,74
17	1,20	0,63	0,48
18	1,77	0,64	0,54
19	0,67	0,92	0,90
20	1,02	1,04	0,52
21	1,10	0,85	0,62
22	2,23	0,77	0,46
23	1,00	1,02	0,59
24	1,08	0,83	0,55
25	1,07	0,73	0,76
26	1,67	0,75	0,64
27	1,83	0,83	0,59
28	1,45	0,71	0,51
29	0,85	0,99	0,50
30	1,02	0,96	0,48
Среднее значение	1,31	0,83	0,62

№	Мощность конвективного слоя (облачные гряды)	Мощность конвективного слоя (ОЯ)	Мощность конвективного слоя (ЗЯ)
Среднеквадратическое отклонение	0,29	0,13	0,17

Средние диапазоны для значений мощности конвективного слоя для различных типов мезомасштабной облачности, выглядели следующим образом:

- Облачные гряды: 1,02 - 1,60.
- Открытые конвективные ячейки: 0,70 – 0,96.
- Закрытые конвективные ячейки: 0,45 – 0,79.

Анализируя полученные данные, мы можем сказать, что максимальное среднее значение и среднеквадратическое отклонение мощности конвективного слоя у облачных гряд. Минимальное у закрытых конвективных ячеек. Такое распределение минимальных и максимальных значений присуще этим типам мезомасштабной конвективной облачности. Аномалий не наблюдается [12].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были вычислены МСМ для спутниковых изображений облачных гряд, открытых и закрытых ячеек, а также по ним были рассчитаны текстурные признаки. Анализ полученных текстурных признаков, показал:

- Максимальное среднее значение обратного момента и среднеквадратического отклонения характерно для закрытых конвективных ячеек, а минимальное для облачных гряд.

- Максимальное среднее значение контраста характерно для открытых конвективных ячеек, а максимальное значение среднеквадратического отклонения для облачных гряд, минимальное среднее значение наблюдается у закрытых конвективных ячеек, а минимальное значение среднеквадратического отклонения у открытых конвективных ячеек.

- Максимальное среднее значение энтропии характерно для открытых конвективных ячеек, а максимальное значение среднеквадратического отклонения для закрытых конвективных ячеек, минимальное среднее значение наблюдается у закрытых конвективных ячеек, а минимальное значение среднеквадратического отклонения у открытых конвективных ячеек.

- Статистически значимая линейная зависимость (на уровне 0,05) наблюдается между облачными грядами и открытыми конвективными ячейками, что позволяет, в принципе, использовать текстурные признаки для определения пространственных характеристик соответствующих облачных структур.

- Максимальное среднее значение и среднеквадратическое отклонение мощности конвективного слоя у облачных гряд. Минимальное у закрытых конвективных ячеек. Такое распределение минимальных и

максимальных значений присуще этим типам мезомасштабной конвективной облачности. Аномалий не наблюдается.

Данные результаты могут оказаться полезными при разработке алгоритмов автоматического распознавания мезомасштабных конвективных типов облачности на спутниковых изображениях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Херрит де Вейр. Арктические плавания Виллема Баренца 1594-1597 гг. – Издательский дом «Рубежи XXI», 2011. – 279 с.
2. Деев М. Г. Баренцево море // Большая российская энциклопедия. Том 3. Москва, 2005. – 43-47 с.
3. Миронюк С. Г., Иванова А. А. Микро и мезорельеф гляциального шельфа Баренцева и Карского морей в свете новых данных // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. – 2018. – № 76. – 41-58 с.
4. Адров Н.М. Исследования Баренцева моря за 1000 лет. Часть I: От начала тысячелетия до первой половины XX века. – 2006. – 536 с.
5. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М., Изд-во МГУ, 1982. – 192 с.
6. Система Баренцева моря / под ред. академика А. П. Лисицына. – М.: ГЕОС, 2021. 672 с.
7. Langanen, Ø., at all. Ecosystem responses to climate and fishing in the Barents Sea. // *Advances in Ecological Research*. 2019. № 60, pp. 69-93.
8. Bluhm, B.A., at all. Arctic marine biodiversity: An update of species richness and examples of biodiversity change.// *Oceanography*. 2011. Vol. 24, № 3, pp. 232–248.
9. Kouraev, A.V., Zakharova, E.A., Rémy, F. et al. Clouds in the Arctic: Historical overview, climatology and trends from satellite observations. // *Polar Biol*. 2021. Vol. 44, pp.1775–1799.
10. Lang F., Ackermann L., Huang Y., Truong S. C. H., at all. A climatology of open and closed mesoscale cellular convection over the Southern Ocean derived from Himawari-8 observations. // *Atmos. Chem. Phys.*, 2022. Vol. 22. Issue 3, pp. 2135–2152.
11. Wood R., Hartmann D.L. Spatial Variability of Liquid Water Path in Marine Low Cloud: The Importance of Mesoscale Cellular Convection. // *Journal of climate*, 2006. Vol.19. Issue 9, pp. 1748-1764.

12. Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / Гидрометеорол. н.-и. центр СССР, Гос. н.-и. центр изуч. природ. ресурсов; Под ред. И. П. Ветлова, Н. Ф. Вельтищева. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1982. – 300 с.
13. Noteboom S. Open Cell Convection and Closed Cell Convection. – De Bilt. 2007. – 38с.
14. Воинов Н.Е., Кузнецов А.Д., Симакина Т.Е., Сероухова О.С. Текстуальный анализ спутниковых изображений мезомасштабной облачности. // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета №33. Санкт-Петербург, 2014 – 61-68 с.
15. Калинин Н. А., Толмачева Н. И. Космические методы исследований в метеорологии: Учебник / Перм. Ун-т. – Пермь, – 2005. – 348с.
16. Брукс К., Карузерс Н. Применение статистических методов в метеорологии. // Пер. с англ. Е. Ф. Ивановой и Л. Л. Френкеля; Под ред. Н. А. Багрова. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1963. - 416 с.