

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра геоморфологии и геоэкологии

**Создание автоматизированного программного ГИС-модуля мониторинга  
морского льда арктического региона на основе открытых данных  
пассивного микроволнового зондирования**

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

студента 4 курса 431 группы

направления 05.03.03 Картография и геоинформатика

географического факультета

Александрова Владислава Олеговича

Научный руководитель

доцент, к.г.н.

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

Зав. кафедрой

доцент, к.с-х.н., доцент

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

В.А. Данилов

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

В.А. Гусев

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                   | л  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение                                                                                          | 3  |
| 1 Актуальность мониторинга Арктического региона                                                   | 5  |
| 1.1 Изменение природных условий Арктики                                                           | 5  |
| 1.2 Экономическая ценность Арктики                                                                | 6  |
| 1.3 Природопользование в Арктической зоне                                                         | 9  |
| 1.4 Риски освоения территорий Арктики                                                             | 11 |
| 2 Ледовая обстановка Арктического региона                                                         | 17 |
| 2.1 Климатические изменения                                                                       | 17 |
| 2.2 Изменения площади ледового покрова                                                            | 18 |
| 2.3 Связь изменения уровня мирового океана с таянием льдов Арктики                                | 20 |
| 2.4 Прибрежные области и акватория Северного морского пути                                        | 22 |
| 3 Создание программного ГИС модуля мониторинга морского льда                                      | 25 |
| 3.1 Система мониторинга «Лед», Арктического и Антарктического научно-исследовательского института | 25 |
| 3.2 Составные части систем мониторинга и реализация их функционала средствами ГИС                 | 30 |
| 3.3 Данные используемые для мониторинга состояния ледяного покрова                                | 32 |
| 3.4 Алгоритм мониторинга с использованием открытых данных на территорию Арктического региона      | 34 |
| 3.5 Создание прототипа системы мониторинга ледового покрова                                       | 37 |
| Заключение                                                                                        | 41 |
| Список использованных источников                                                                  | 43 |
| Приложения                                                                                        | 47 |
| Приложение А - Границы льда Арктики                                                               | 48 |
| Приложение Б – Блок схема работы алгоритма                                                        | 49 |
| Приложение В - Серия карт ледовой обстановки, результат работы модуля                             | 50 |
| Приложение Г – Материалы ГИС-модуля                                                               | 53 |

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема таяния ледников и льдов является глобальной, над ней уже несколько лет ведутся споры и выдвигаются различные гипотезы, но факт того, что изменения природных условий оказывает влияние на сокращение и уменьшение мощности ледового покрова в полярных областях неоспорим.

Важно понимать, что изменения природных условия напрямую влияют на развитие Арктического региона, реализацию различных экономических проектов. На данной территории важно учитывать современные изменения не только при проектировании сооружений или прокладке морских путей, но и их последствия, влияющие на адаптацию и связанные с этими рисками.

Наиболее ярким индикатором изменения природных условий является ледовая обстановка, которая играет одну из важнейших ролей в дальнейшем развитии Арктического региона. Поэтому оперативный мониторинг ледовой обстановки и влияющих на нее доминантных климатических факторов служит своевременным сигнализатором об возможных рисках и позволяет принять решения по их минимизации и вовсе предотвращению.

Цель данного исследования – создание автоматизированного программного модуля мониторинга ледовой обстановки Арктического региона с использованием открытых оперативных данных дистанционного зондирования (ДЗЗ).

Чтобы достигнуть поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Осуществить поиск и анализ наиболее подходящих открытых пространственных данных ДЗЗ Арктического региона.
2. Провести обзор существующих систем мониторинга ледовой обстановки и проанализировать алгоритмы их работы.
3. Разработать алгоритмы автоматизации процессов обработки, составления и оформления открытых данных ДЗЗ для ГИС.

4. Создать автоматизированный программный модуль мониторинга ледовой обстановки для ГИС.

В ходе исследования будет применяться описательный, картографический, научно-литературный и аналитические методы. Материалы, по которым проводилось данное исследование, представляют собой совокупность отечественных и зарубежных научных статей, печатных и электронных изданий, а также оперативных открытых иностранных радиометрических данных дистанционного зондирования.

Работа написана на основе 30 литературных источников, в том числе 3 электронных, и состоит из введения, трёх логических разделов, заключения и 8 приложений, в том числе 6 картографических предложенных автором.

В первом разделе поднимается вопрос экономического потенциала Арктики региона, современных проблемах арктического региона и актуальности мониторинга ее ледовой обстановки. Отмечается, что изменение климата умножает существующие и формирует новые риски для природных и антропогенных систем.

Во втором разделе рассматривается вопрос влияния климатических изменений на природные условия Арктики, которые впервые были отмечены в начале XX века и были связаны с изменением уровня мирового океана. Современные изменения определяются гидрометеорологическими процессами, которые вызывают объемные изменения уровня океана, а влиянием космогеофизических сил и геолого-геодинамических процессов можно пренебречь вследствие их малости.

В третьем разделе рассматриваются существующие системы мониторинга ледовой обстановки, анализируются данные на которых они основываются, и оценивается возможность применения отдельных составляющих этих систем в разрабатываемой программном модуле. Приводится описание процесса создания и программирования автоматизированного программного модуля мониторинга ледового покрова с применением ГИС-технологией, его алгоритмов работы и области его применения.

# **1 Актуальность мониторинга Арктического региона**

## **1.1 Изменение природных условий Арктики**

Арктика является уникальным регионом в том числе по причине своих сложных климатических условий. Погодные условия в регионе изменчивы и не постоянны, а в последнее время мы можем наблюдать интенсивное повышение средних температур и изменения погодных условий в целом. Подобные изменения, даже минимальные, не могут пройти бесследно для любых экосистем на планете, особенно для таких уникальных и хрупких.

За XX век температура воздуха в Арктике повышается, в отдельных точках отмечается повышение почти на 6 градусов по Цельсию, это в свою очередь повлияло на сокращение льдов или даже исчезновение определённых их видов. Теплые течения, проникающие в Арктику, так называемая «термальная бомба», заметно влияет на изменение ледовых условий особенно в западной части региона. Современные изменения ледовых условий, усиливают влияние других факторов, а именно изменение отражающих характеристик подстилающей поверхности, которые, в свою очередь, будут еще больше ускорять изменения в ближайшем будущем.

Под влиянием изменчивости микроклимата экосистемы Арктики, происходит изменения ее природных условий. Ледовый покров в некоторых областях переходит, из свойственного ему на протяжении последних 10 лет состояния и формы, в другое. Реки вскрываются раньше обычных сроков и позже замерзают, а некоторые притоки могут так и не покрыться льдом полностью. Все это в целом меняет Арктический регион и оказывает большое влияние на объекты и инфраструктуру.

Данные изменения отражаются на условиях жизни жителей всего арктического региона. Большой проблемой Арктики является загрязнение окружающей среды. В Арктике находится большое количество добывающих и обрабатывающих промышленных комплексов, вследствие их эксплуатации

(например, разрывы трубопроводов) возможны риски утечек и других техногенных катастроф. Нефтехимические соединения являются стойкими и могут годами накапливаться в окружающей среде и впоследствии попадать в снег, лед, воду, почву, мерзлоту. При дальнейшем изменении условий, становится трудно контролировать возрастающую опасность для среды обитания человека в Арктике, что в свою очередь влияет на развитие крупных экономических проектов и сложность их реализации. Повышение температуры также может влиять на ускорение разрушения вечной мерзлоты, из-за этого возрастает опасность миграции токсичных средств из мест захоронения отходов разного рода.

Жизнь и деятельность человека в Арктике в значительной мере осложняется подобными изменчивыми условиями. Транспортировка жизнеобеспечивающих грузов в Арктике возможна только по открытой воде во время периодов низкой ледяной концентрации по северным морям вдали от многолетнего льда. Сезонный морской ледяной цикл затрагивает человеческую деятельность и среду обитания биологических видов. В последние годы площадь морского льда сокращалась. Таяние льда в Северном Ледовитом океане летом открывает доступ к ископаемым источникам энергии в зоне шельфа, что способствует общему освоению Арктики. [1]

## **1.2 Экономическая ценность Арктики**

В настоящее время многие эксперты говорят, что в ближайшем будущем развитие мировой экономики будет зависеть от освоения территории Арктики и разработки огромных запасов природных ресурсов, которые до этого были мало изучены и использовались ограниченно или вовсе не разрабатывались.

Освоение ресурсов Арктики будет во многом влиять на экономическое развитие нашей страны в XXI веке, и есть ряд причин почему так считают. Плановая полноценная разработка ресурсов арктического региона нашей страны дает исключительную возможность устойчивого экономического развития. По

словам исследователей, данная стратегия развития Арктики, в частности освоение ресурсов, позволит нашей стране сбалансировать рост экономики на протяжении века и еще на достаточно долгое время.

Журнал Science в 2010 году опубликовал проведенное учеными по оценке залегающих ресурсов в Арктическом регионе [2]. По мнению данной группы ученых, под ледовым покровом может находиться почти 86 млрд. баррелей нефти, примерно 10 млрд. т, это составляет почти 15% от общих неразработанных запасов мира.

Что касается природного газа, по данным исследования, его количество составляет почти 1550 трлн. м<sup>3</sup>. При этом если смотреть на местоположения залегания ресурсов, большая часть запасов нефти находится в районе Берингово пролива близ берегов Аляски, а почти все запасы природного газа находится в акватории арктического региона нашей страны, на прибрежных территориях. Если верить ученым, глубина залегания природного газа составляет менее 500 метров.

В целом в акватории «российской Арктики» выявлено более 250 перспективных нефтегазодобывающих объектов, помимо уже открытых объектов, численностью несколько десятков, среди них:

- Шельф Печорского и Баренцева моря – здесь находится 11 месторождений, из них четыре нефтяных («Приразломное», «Варандей-море», «Медынское-море», «Долгинское»), одно нефтегазоконденсатное («Северо-Гуляевское»), три газоконденсатных («Штокмановское, Поморское, Ледовое»), и три газовых («Северо-Кильдинское, Мурманское, Лудловское»);
- Тазовская и Обская губа, шельф Карского моря – также 11 месторождений, в том числе два нефтегазоконденсатных («Салекаптское», «Юрхаровское»), два газоконденсатных («Ленинградское», «Русановское»), семь газовых («Антипаютинское», «Семаковское», «Тота-Яхинское», «Каменномысское-море», «Северо-Каменномысское», «Гугорьяхинское», «Обское»);
- Шельф Охотского моря – восемь месторождений, из них два нефтяных («Одопту-море», «Северный купол»), пять нефтегазоконденсатных

(«Пильтун-Астохское», «Одопту-море», «Аркутун-Дагинское», «Чайво», «Лунское»), одно газоконденсатное («Кириновское»), одно газовое («Вениновское»).

Если рассматривать материковую часть, то в Арктике находятся огромное количество уникальных запасов:

- медно-никелевые руды
- олово
- платиноидов
- различных агрохимических руд
- редких металлов и редкоземельных элементов
- большие запасы золота
- алмазов
- вольфрамов
- ртути
- черных металлов и многие др.

Минеральные ресурсы в основном сосредоточены в северной провинции Кольского полуострова, там находится большинство выше перечисленных ресурсов, а также: тантал, ниобий, хром и марганец.

В разных районах Таймырского полуострова находятся преобладают многие различные друг от друга группы ресурсов, это своего рода клад Арктики. Например, Таймыро-Норильской провинции располагаются медноникелевые руды, платиновые металлы. В Маймеча-Котуйской и Уджинской районах подтверждено залегание большого количества фосфора и железа. В Североземельской провинции полуострова обнаружены молибден, ванадий и прочие полиметаллы

В районе Анабарского залива и в Якутии, сосредоточены драгоценный металлы и камни: алмазы, золото, редкие металлы. Территории Чукотки также удивляет своим многообразием металлов: олово, золото, ртуть, вольфрам, медь, молибден, серебро, платиноиды, полиметаллы.



Таким образом, если рассматривать арктические районы как будущие зоны добывающей промышленности, они являются по истине кладезем для дальнейшего развития экономики. Если суммировать вышесказанное, то в ведущих районах Арктике (Кольский полуостров, Таймыр, Чукотка, Якутия, Норильск) содержатся более 90% запасов апатитов, 85% никеля, около 60% меди, более 50% вольфрама, редкоземельных элементов более 95%, запасов платины свыше 98%, олова более 75%, ртути, золота и серебра почти 90%, алмазов более 99%, и это только запасы ресурсов, о которых на данный момент точно известно и точно нельзя сказать сколько неразведанно.

Огромные богатства Арктики, что содержатся в ее недрах, определенно поражает своим количеством и редкой ценностью, ведь как было вышеизложено, на суше, шельфе и архипелагах региона установлены прогнозные ресурсы всех категорий.

Арктические прогнозные ресурсы залегающих углей оцениваются как минимум в 780 млрд. т., энергетических в 599 млрд. т. и более 81 энергетических коксующихся. По оценкам стоимость минерального сырья в недрах приполярных районов нашей страны свыше 30 триллиона долларов, причём, больше половины приходится на долю энергоносителей. Общая ценность разведанных запасов составляет всего полтора триллиона долларов. Это свидетельствует о том, что мощный потенциал Арктики слабо или почти не реализован. Одной из главных причин, препятствующих развитию региона, являются тяжёлые природные условия, а последнее время и их нестабильность и непредсказуемость, вследствие постоянно меняющихся на данный момент природных условий. Даная изменчивость влияет на развития всех планируемых экономических проектов, разведанность ресурсов и инвестиционные оценки территорий.

### **1.3 Природопользование в Арктической зоне**

Особого внимания заслуживает природопользование Арктики. Сосредоточенные здесь ресурсы как было сказано выше определяет будущее

экономики России. Микроэкономика Арктического региона на данный момент, к сожалению, базируется в основном на добывающих отраслях, которые в свою очередь обладают большим риском загрязнения территорий, на которых ведётся разработка.

Северный регион в сохранении природоохранного равновесия играет весьма большую роль. От Арктики зависит мировой гидрологический цикл, также она по-своему регулирует термический режим атмосферы, является источником формирования чистых воздушных масс. Также природная среда Арктики имеет большое этническое и культурное значение для народов, населяющих данные районы. Переход от традиционного хозяйства к промышленному с начал XX века привело к определённым изменениям, ожидаемо значительно возросла антропогенная нагрузка.

На данный момент трудно сказать, как сильно экосистема Арктики изменилась именно под влиянием данного фактора, но факт деградации природной среды неоспорим. Последствия изменений экосистемы трудно предсказать, риски могут отразиться как на судьбе микро- или макрорегиона, так и привести к глобальным проблемам. Экстенсивное освоение российского севера начало препятствовать реализации традиционного хозяйства, а именно базовые отрасли в виде рыболовства, морского промысла и оленеводство. Добывающая отрасль заняла важное место в освоении и использовании природных ресурсов Арктики, данное очаговое природопользование тоже не обходится без последствий, влияние на природную среду оказывается колоссальное. Также к крупноочаговому природопользованию относятся и другие отрасли, развивающиеся в Арктике, например, транспортные, селитебные и военные типы и характерны для центров легкой и пищевой отраслей (как Тикси, Хатанга, Певек и другие).

Природоресурсные и природоохранные проблемы Арктики говорят о необходимости принятия правовых решений и нормативных актов. Реализация государственной политики должна проводиться с учетом национальных интересов и специфических особенностей региона. Принятые основы должны

стать своеобразным ориентиром в выработке общих и специфических правовых норм. При выборе хозяйственной деятельности в Арктической зоне требуется обоснование и сохранение баланса между отраслями хозяйства и рациональным природопользованием. Для осуществления любого проекта на этой территории актуальными становятся их техническая и публичная оценка. Важными являются общественные слушания, а также государственная и общественная экологическая экспертиза этих проектов. Нельзя и забывать про использование альтернативных источников энергии, а для развития производства на их основе широко использовать экономические стимулы. Значительного внимания заслуживает и такое направление, как экологический туризм в прибрежных морях и на подходах к Северному полюсу.

#### **1.4 Риски освоения территорий Арктики**

Ключевыми факторами, которые оказывают воздействие на социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации, являются:

а) экстремальные природно-климатические условия, в том числе низкие температуры воздуха, очень сильные ветра и существование ледяного покрова на всей акватории арктических морей;

б) повсеместное промышленно-хозяйственное освоение территорий с низкой плотностью населения;

в) отдаленность от ключевых индустриальных центров, вследствие чего значительная ресурсоемкость, большая зависимость населения в плане топлива, продовольствия и товаров ежедневного потребления от поставок из других регионов России;

г) нестабильность экосистем из-за воздействия даже небольших антропогенных воздействий, от которых зависит биологическое равновесие и климат Земли.

Настоящее положение социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации выражается следующими рисками:

а) в социальной сфере:

– отрицательная демографическая динамика во многих приарктических субъектах Российской Федерации, перераспределение трудовых ресурсов (в большей части высококвалифицированных) в южные регионы России и страны зарубежья;

– низкая степень оснащенности социального обслуживания населения, в том числе в образовании, здравоохранении, культуре, физической культуре и спорте;

– плохая ситуация с фондом жилищно-коммунального хозяйства, неудовлетворительное снабжение населения чистой питьевой водой;

– дефицит знаний в формировании эффективной системы подготовки кадров, нарушение равновесия между спросом и предложением трудовых кадров в территориальном и профессиональном отношении (нехватка специалистов рабочих и инженерных профессий);

– некачественные условия жизни у коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации, проживающих на территории Арктической зоны Российской Федерации;

б) в экономической сфере:

-отсутствие ориентации на создание аппаратно-технических средств и технологий для поиска, разведки и освоения морских месторождений углеводородов в сложных арктических условиях;

-инфраструктуры жизнеобеспечения населения имеют высокую степень износа;

-относительная неразвитость базовой транспортной инфраструктуры в отношении морской и континентальной составляющих (ухудшение состояния ледокольного флота, а также недостаток единиц малой авиации);

-высокая трудозатратность при низкой эффективности добычи природных ресурсов, негативные последствия северного производства при дефиците эффективных компенсационных источников, небольшая производительность труда;

-сильное различие в экономическом развитии между отдельными приарктическими территориями и регионами, районы в отношении развития занимают только позиции либо лидирующих, либо депрессивных;

-недостаток в стратегическом развитии навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения мореходства;

-необходимость заимствования иностранных средств и источников наблюдения для комплексного космического мониторинга территорий и акваторий Арктики ввиду отсутствия отечественного информационного обеспечения;

-информационно-телекоммуникационная инфраструктура не является современной технологией в краях арктической зоны, тем самым не позволяет осуществлять качественную услугу связи населению и субъектам хозяйства;

-энергетическая система основана на нерациональной структуре генерирующих мощностей, в связи с этим высокая себестоимость генерации и транспортировки электроэнергии

в) сфера науки находится на низкой стадии готовности к переходу на современный уровень развития, поскольку наблюдается дефицит технологий и аппаратного обеспечения для освоения арктических зон Российской Федерации;

г) в сфере природопользования и охраны окружающей среды:

-существует увеличение техногенной и антропогенной нагрузки на окружающую среду в некоторых районах и акваториях Северного Ледовитого океана с последующим достижением всех предельных величин;

-формирование критично отрицательных зон с радиоактивным загрязнением и высоким уровнем экологического ущерба от этого.

Глобальное потепление на Земле идет неравномерно. Если на экваторе температурные изменения незначительны, то в средних широтах, а особенно на полюсах, речь идет о повышении на 1-2 градуса, за последние 20 лет. Наблюдения показали, что за последний век температура на территории России в среднем повысилась на 3,5°C. А наиболее значительное потепление было

отмечено в северных районах страны. Согласно данным спутниковых измерений, в 2019 году площадь морского льда была на 33% ниже среднего уровня 1981—2010 годов [4], [5]. Толщина морского льда также уменьшилась. Таким образом, Арктика – один из наиболее уязвимых к изменению климата регионов.

Изменение климата умножает существующие и формирует новые риски для природных и антропогенных систем (повышение уровня моря, уменьшение массы ледников, ускорение таяния льда в Арктике, перераспределение осадков, экстремальные погодные явления, изменения в цветении растений и в ареалах видов их распространения). По оценкам Всемирной метеорологической организации риски распределяются неравномерно и можно говорить о них, если на определённой территории наблюдаются опасные или неблагоприятные явления и существует некий реципиент риска, который находится под их вероятным воздействием и уязвимый для них.

Для того чтобы предупредить данные опасные явления в Арктической зоне, повысить безопасность и усовершенствовать навигационные условия на Северном морском пути необходимо увеличить надёжность гидрометеорологических прогнозов.

Метеорологическая сеть России остановилась в своем развитии в 1986 г., когда на ее территории насчитывалось 2308 станций и 3274 поста. В период с 1987 по 2005 годы в связи с переходом на новые экономические условия число метеорологических станций уменьшилось почти на 30%, а гидрометеорологических постов – на 35%, динамика количества станций представлена на рисунке 1.

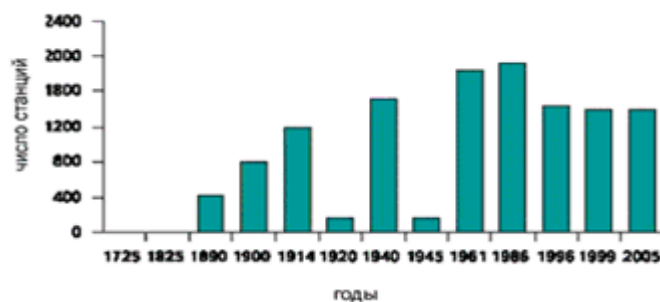


Рисунок 1 - Динамика количества метеорологических станций С 1725 г. по 2005 г. [6]

Средняя по России плотность существующей метеорологической сети (на одну станцию приходится 10,5 тыс. км<sup>2</sup>) сопоставима с плотностью в начале эры освоения космического пространства. При этом плотность метеорологической сети остается крайне неравномерной, а в отдельных регионах и на арктическом побережье она в 8–10 раз меньше чем в центральных и южных районах Европейской части России. Многие российские метеостанции до сих пор не имеют возможности дистанционного мониторинга и управления, а данные наблюдений продолжают снимать с них вручную.

Достоверное прогнозирование и правильная статистическая обработка результатов эффективной нефтедобычи в арктических зонах требует учёта различных гидрометеорологических характеристик: скорость и направление ветра, течений или ледового дрейфа, опасность появления айсбергов и т.д. Также, без этих параметров не обойтись при построении модели риска нефтяного разлива в зоне добычи и транспортировки нефти.

В настоящее время включение гидрометеорологических характеристик, получение которых не входит в стандартный объем проектных изысканий, преимущественно ориентировано на изучение локальных условий в местах проведения работ с целью определения предельных воздействий и нагрузок. Исходные данные для моделирования риска разливов нефти требуют задания всех возможных гидрометеорологических условий в районах добычи и на

маршрутах транспортировки нефти. Подготовка таких исходных данных - задача весьма трудоемкая, но только в этом случае могут быть проверены, оценены и обоснованы плановые стратегии и технологии борьбы с разливами, выявлены объективные ограничения для реагирования по природным и гидрометеорологическим условиям и обеспечено оперативное прогнозирование с целью управления операциями. [7]

Арктика — это исключительно сложный регион, сложный объект для наблюдений, всевозможных исследований, физико-математического моделирования и прогнозирования. Большая трудность освоения Арктической зоны заключается в том, что она находится в криолитозоне, где верхняя часть земной коры характеризуется отрицательными температурами. Глубина исследований может составлять только от 1 м до 1 км с температурными изменениями от 0° С до -16° С. Учитывая тот факт, что площадь России равна 17 млн км<sup>2</sup>, а вечномёрзлые грунты занимают 11 млн км<sup>2</sup>, то криолитозона составляет более 60% территории. В связи с этим фактом и постоянным развитием минерально-сырьевой базы, освоение криолитозоны идёт быстрее обоснования безопасного и рационального недропользования.

Климатические изменения многолетнемерзлых грунтов ведут к снижению их несущей способности и содействуют развитию некоторого числа деструктивных геоморфологических процессов. Это существенно усиливает геокриологические риски для инженерной инфраструктуры и главное экосистемы криолитозоны. Прогнозы направлены на то, что такие изменения будут увеличиваться в последующие несколько десятилетий, что повлечет за собой риски повреждения и разрушения различных сооружений и объектов транспортной инфраструктуры. [8]



## 2 Ледовая обстановка Арктического региона

### 2.1 Климатические изменения

Наблюдаемые изменения в температурном режиме Арктики, такие как среднее повышение температуры, уменьшение ледяного покрова, накопление стока рек и трансформация многолетней мерзлоты, показательны для самых значительных изменений по сравнению с другими районами Земли. Этому способствует ряд особенностей формирования климата Арктики. Динамика таяния ледника представлена на рисунке 2.

Во-первых, климат арктической зоны образуется при меньшем притоке тепла от Солнца, нежели климат других регионов.

Во-вторых, это район, который является наиболее чувствительным к изменениям парниковых газов в атмосфере.

В-третьих, геомагнитный полюс формирует хорошие условия для вторжения в атмосферу заряженных солнечных и космических частиц.

В настоящий момент специалисты чаще склоняются к четырём возможным факторам современных климатических изменений:

- антропогенный эффект парниковых газов;
- усиление потока приходящей солнечной радиации;
- сокращение аэрозольного рассеяния;
- внутренние колебания климатической системы;



Рисунок 2 - Таяние ледника Купол Вавилова [9]

В последнее время большое внимание уделено антропогенному изменению состава атмосферы, как одному из факторов усиления парникового эффекта. Факт связан, в первую очередь, с ростом концентрации двуокиси углерода и метана. Такой быстрый рост и воздействие на атмосферные слои Земли является последствием интенсификации человеческой деятельности.

Климат Земли зависит от Солнечной энергии при нынешних астродинамических параметрах. Солнце является источником происхождения потоков заряженных частиц и потоком космических лучей, которые непосредственно несут влияние на атмосферные циркуляции с изменениями в погоде и климате.

Астродинамические условия – это основа развития радиационных компонентов климата планеты. Гравитационная связь Земли с планетами и спутником воссоздает вариации в скорости движения Земли по орбите, в отклонениях от нормальной орбиты, изменяет скорость вращения Земли вокруг своей оси. В результате связи меняется расстояние от Земли до Солнца, что определяет космическую часть процессов, формирующих климат Земли.

## **2.2 Изменения площади ледового покрова**

В 2019 году в море Бофорта у Чукотки летом началось раннее таяние ледового покрова и наблюдались высокие температуры поверхности моря. Минимальная протяженность Арктического морского льда в сентябре 2020 года показывала те же значения, что и в 2007 и 2016 годах, что представлено на рисунке 3. В декабре Чукотское море полностью покрылось льдом, Гудзонов залив также обледенел, а морской лед простирался на юг в Берингово море. К 2019 году Берингово море было полностью покрыто льдом. При изучении становится ясно что, определяющей чертой десятилетия 2010-х годов была неизменно низкая площадь арктического морского льда по сравнению с долгосрочными средними значениями.

Протяженность морского льда за февраль 2020 года обозначается показателями ниже среднего, что является тринадцатым самым низким среднемесячным значением в спутниковой записи. Короткая пауза в росте льда в середине февраля была связана с региональной картиной ветра. Как и в последние несколько месяцев, изменение Арктического колебания находилось в постоянно положительной фазе. Это проявлялось в необычно низком давлении на уровне моря над атлантической стороной Северного Ледовитого океана и высоком давлении над Восточной Евразией, распространяясь на восток в Арктическую Канаду.

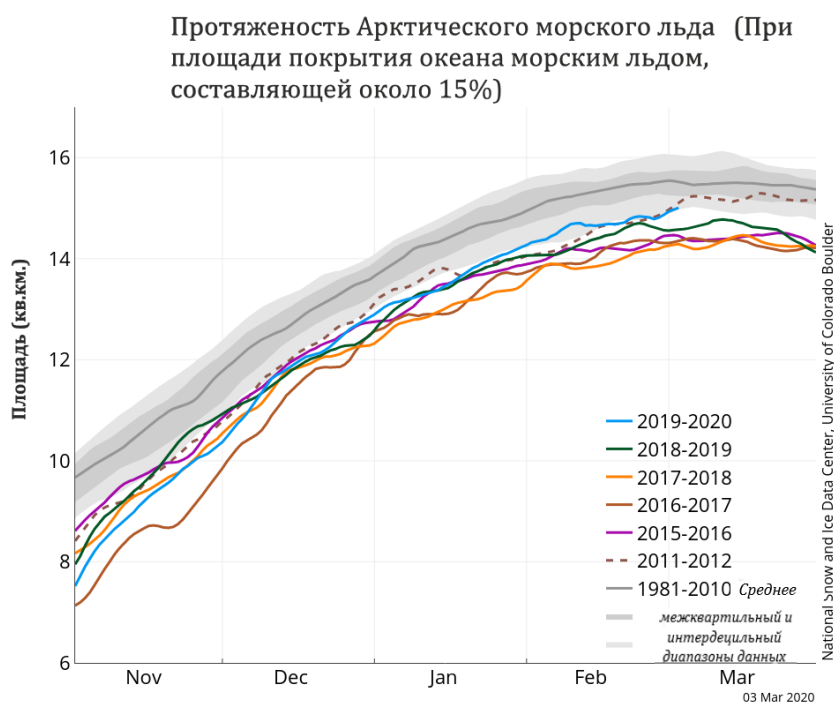


Рисунок 3 - Площадь ледового покрова (составлено автором)

Протяженность арктического морского льда за февраль 2020 года составила 14,68 млн. км<sup>2</sup>, что является тринадцатым самым низким показателем за историю спутникового мониторинга. Это на 620 млн. км<sup>2</sup> ниже среднего показателя за февраль с 1981 по 2010 год и на 710 млн. км<sup>2</sup> выше рекордно низкой отметки за февраль, установленной в 2018 году. В конце февраля протяженность льда была ниже среднего показателя обледенелости Баренцева и

Карского морей, и восточной части Гренландского моря. В течение месяца морской лёд рос в среднем на 22 тысячи км<sup>2</sup> в день, что довольно близко к средней скорости за период с 1981 по 2010 год, составляющей 20 тысяч млн. км<sup>2</sup> в день, на рисунке 3 представлена протяженность льда в зависимости от года.

Температура воздуха на уровне 770 метров над поверхностью, была на 1-7 С° выше средней на большей части Северного Ледовитого океана, особенно с большими отклонениями от средней нормы по полуострову Таймыр. В то же время на севере Аляски, в Чукотском и Бофортском морях температура была на 6 С° ниже средней.

В рамках курсовой работы на 3 курсе мною были созданы модели границ ледового покрова за 2015-2019/2020 год с отображением встречаемости данного льда на определённой территории, что предоставлено в приложениях А.1 и А.2, основанные на мультисенсорном анализе морского льда за последние 4-5 лет, предоставленные национальным центром данных по снегу и льду.

На отображенной территории, особенно заметно, что тенденция сокращения льда сохраняется и при этом намерзание льда в зимний период также охватывает большую территорию акватории Арктики, но меняется удельная толщина льда, если верить данным CryoSat – 2, искусственного спутника, предназначенного для измерения толщины ледового покрова.

### **2.3 Связь изменения уровня мирового океана с таянием льдов Арктики**

Важнейшим индикатором глобального потепления является изменение уровня Мирового океана, связанного с многими гидродинамическими процессами как в самом океане, так и при его взаимодействии с атмосферой.

Первые изменения уровня мирового океана были отмечены еще в начале XX века, определённое тогда повышение уровня составлял порядка 1,8 мм/год. По современным альтиметрическим данным установлено, что среднегодовой прирост заметно увеличился и составляет почти 3,5 мм/год. По некоторым прогнозам, к концу XXI века оно может составить уже 40-100 см и будет зависеть

от интенсивности таянья ледников особенно в полярных областях. Поэтому проблему изучения долговременных колебаний уровня Мирового океана и особенно построения методов его долгосрочного прогноза следует отнести к числу важнейших проблем современности.

В общем случае на уровенную поверхность океана действует большое число различных по своей природе факторов, которые можно объединить в три большие группы: космогеофизические силы, геолого-геодинамические процессы, гидрометеорологические процессы.

При глобальном осреднении в межгодовом масштабе времени в современных условиях влиянием космогеофизических сил и геолого-геодинамических процессов (вертикальных движений земной коры и донным осадконакоплением) на уровень мирового океана можно пренебречь вследствие их малости.

Определяющим фактором, вызывающим объемные изменения уровня океана, являются гидрометеорологические процессы. Это эвстатические колебания, возникающие за счет составляющих пресноводного баланса (испарение, осадки, речной и айсберговый сток) и стерические колебания, обусловленные изменениями плотности морской воды.

Основываясь на сокращении объемов льдов полярных регионов, тот факт, что именно таянье ледников оказывает свое влияние на повышение уровня мирового океана, является очевидным. На рисунке 4 представленная взаимосвязь изменения температуры, уровня моря и площади снежного покрова.

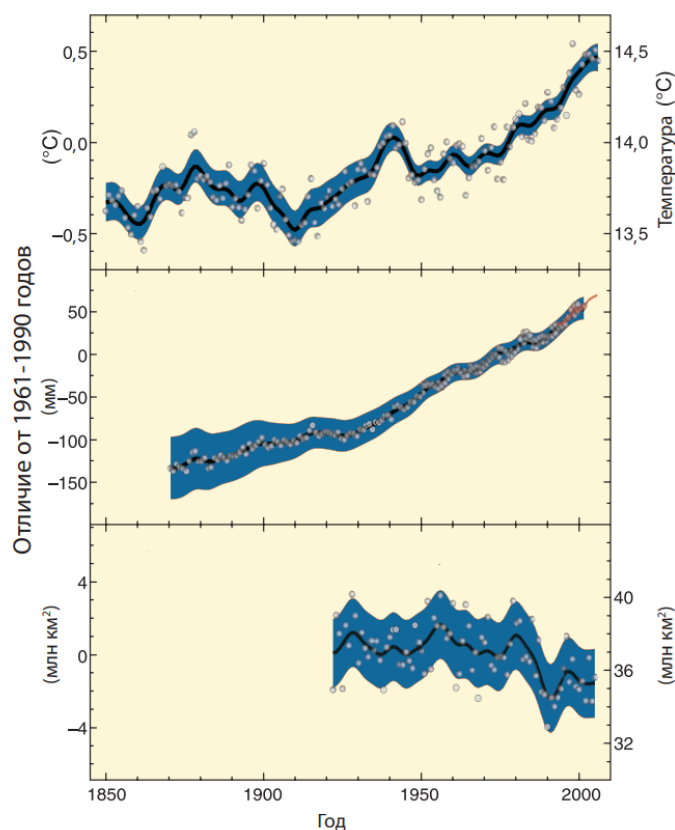


Рисунок 3 - Изменение температуры, уровня моря и площади снежного покрова в северном полушарии

## 2.4 Прибрежные области и акватория Северного морского пути

Как отмечено ранее, уровень мирового океана каждый год поднимается приблизительно на 3 мм/год без процесса снижения. Ретроспективные исследования и оценки указывает на повышение уровня мирового океана уже на 17 см за предыдущее столетие, что является наибольшей величиной за прошедшие 2000 лет. При сохранении таких темпов развития через 100 лет объем воды возрастет до 60 см.

Одним из самых негативных последствий глобального потепления считается трансгрессия. Процесс напрямую зависит от расширения водных масс из-за тепла и сокращения материковых льдов. Из-за данного воздействия береговая линия в мире в среднем сокращается со скоростью 20-60 см каждый год.

Российская Арктика включает в себя берега с мерзлыми грунтами и высоким содержанием льда до 20-50%. Летний сезон для береговой зоны характеризует быстрые процессы и явления оттаивания мерзлоты, где основным процессом является термоабразия. Последний процесс влечет за собой тепловое влияние воздушных и водных масс, а также механического действия морских волн.

Хозяйственное освоение Арктики началось и продолжается на берегах: строительство портов, нефтенакопительных терминалов, перерабатывающих заводов, вследствие этого изучение процессов термоабразии является главным вопросом для формирования деятельности полярных областей и функционирования инфраструктуры. Основная часть береговой линии, а это примерно 56% представляет собой вечномерзлые ледовые комплексы, основанные из термокарстовых процессов. В связи с этим фактом темпы отступления арктической зоны очень велики в сравнении с площадью береговой линии (около 50 тыс. км). [19]

Уничтожение таких берегов сопряжено с несколькими факторами: скорость увеличения уровня океана, энергия волн и прибой, таяние мерзлых пород. Все это вызывают процессы обваливания, осыпания и оползания морских берегов.

Подробные исследования современной динамики берегов арктической зоны выявили, что доля берегов с процессами разрушения (термоабразия) составляет одну пятую часть. На некоторых побережьях скорость трансгрессии достигает до 2 м/год. Если рассматривать, например, район восточного сектора Арктики, то около трети береговой линии будут склонны к термоабразии. Согласно модельному прогнозу побережья данного района, который включает в себя влияние температуры летнего сезона и энергии волнового воздействия, то максимальные темпы разрушения предвидятся в течении 20 лет. За последние 15 тысяч лет береговая линия морей восточного сектора российской Арктики сократилась повсеместно к югу на расстояние 300-800 км.

В геологической истории нашей планеты довольно точно определены и периоды повсеместного, а также глобального нивелирования уровня вод Мирового океана. Антропогенное потепление стало причиной доминирования трансгрессии спустя достаточно большой промежуток времени равновесного его колебания с регрессий. Во время последней такой трансгрессии полному разрушению подвергались озерно-термокарстовые низины, а более крепкие структуры ледового комплекса превращались в острова. Однако даже устойчивые структуры были подвержены термоабразии, значительно изменялись или даже полностью исчезали.

Отрицательное воздействие повышения уровня мирового океана, проявляется не только на самой береговой линии, но также и на хозяйственную деятельность населения прибрежных зон. Если при всех учитываемых факторах верны результаты статистической обработки моделей данных и будет наблюдаться дальнейшее повышение уровня воды, то потребуются переселение людей и значительные финансовые ресурсы на строительство защитных береговых сооружений. В частности, уже сейчас на Чукотском полуострове береговая абразия и эрозия, а также подтопление приносит много проблем и сложностей. [20]



### **3 Создание программного ГИС модуля мониторинга морского льда**

#### **3.1 Система мониторинга «Лед», Арктического и Антарктического научно-исследовательского института**

В настоящий момент существует ограниченное количество систем мониторинга ледовой обстановки. Как правило в литературе представлены описания множество прототипов или разработки неких алгоритмов функционирования подобных систем. Успешно реализованных проектов мало, что может быть связано с недостатком финансирования или определенной закрытостью. Одним из немногих ярких и успешно реализуемых проектов является экспериментальный программно-аппаратный комплекс (ЭАПК) спутникового мониторинга и прогнозирования ледовой обстановки «Лед», разработанный Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом [23].

Задачей разработки ЭАПК «Лед» является создание экспериментального аппаратно-программного комплекса мониторинга и прогноза ледовой обстановки как составной части информационно-телекоммуникационной инфраструктуры комплексного высокоточного спутникового мониторинга опасных гидрометеорологических процессов и явлений в Западной Арктической зоне РФ. ЭАПК «Лед» предназначен для автоматизации процесса определения сплоченности и возраста морского льда по спутниковым снимкам высокого пространственного разрешения и выполнения краткосрочного прогноза ледовой обстановки.

ЭАПК «Лед» состоит пяти основных подсистем:

- подсистема «Возраст льда»;
- подсистема «Частная сплоченность»;
- подсистема «Общая сплоченность»;
- подсистема «Прогнозирование ледовой обстановки»;
- подсистема «Нарушения сплошности».

Все пять подсистем ЭАПК «Лед» работают под управлением единой управляющей оболочки, состоящей из модулей управления, обработки и хранением усвоенной информации, визуализации и управления режимами отображения и представления данных. Информация обрабатывается компонентами программного обеспечения ЭАПК «Лед» на трёх рабочих станциях и представлена на рисунке 5.



Рисунок 4 - Организационная структура ЭАПК "ЛЕД"

ЭАПК «Лед» реализует следующие автоматизированные функции:

1. По подсистеме «Возраст льда» (программа “Ice Classification”):
  - усвоение спутниковых радиолокационных данных;
  - предварительная обработка спутниковых данных с выполнением угловой коррекции РЛ-изображения и вычислением удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР);
  - автоматизированное определение характеристик ледяного покрова (возрастной состав) по спутниковым радиолокационным изображениям высокого разрешения;
  - преобразование классифицированных спутниковых данных в изображение с классифицированными возрастными характеристиками льда.
2. По подсистеме «Частная сплоченность» (программа

“Get\_Concentration”):

- усвоение радиолокационных спутниковых данных с визуализацией спутниковой информации;

- усвоение спутниковых данных о возрасте морского льда, представленных в виде географически привязанного цифрового двумерного массива с цветовой кодировкой возраста льдов по номенклатуре ВМО;

- определение частной сплоченности ледяного покрова в квадратах регулярной сетки по спутниковым данным о возрасте морского льда; – сохранение данных о сплоченности льда в файлах обменного формата.

3. По подсистеме «Общая сплоченность» (программа “Ice Finder”):

- усвоение спутниковых данных оптического спектрального диапазона с визуализацией спутниковой информации;

- определение общей сплоченности ледяного покрова по спутниковым данным оптического диапазона;

- сохранение данных о сплоченности льда в файлах обменного формата.

4. Для подсистемы «Прогноз ледовых условий»:

- установка прогностического расчета – подготовка данных по атмосферному форсингу;

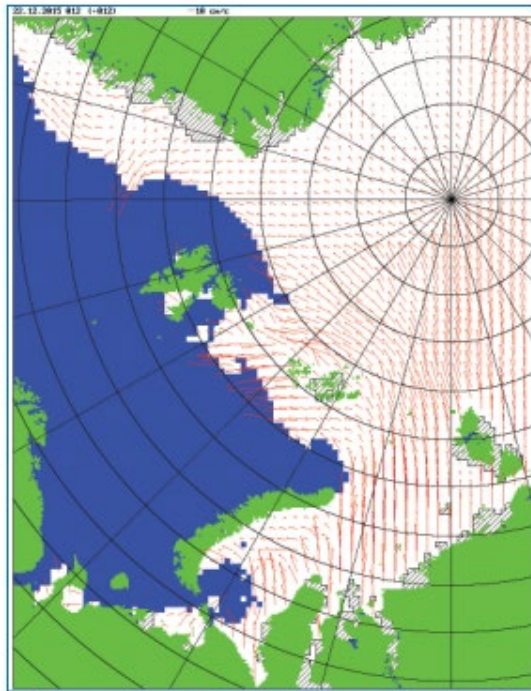
- подготовка данных по термохалинной структуре океана;

- подготовка данных по состоянию ледяного покрова;

- функция выполнения собственно прогностического расчета;

- экспресс-визуализация результатов прогноза

- преобразование результатов прогностического расчета в обменный формат.



Пример прогноза дрейфа льда в Западной Арктической зоне.

Рисунок 5 - Прогноз дрейфа льда

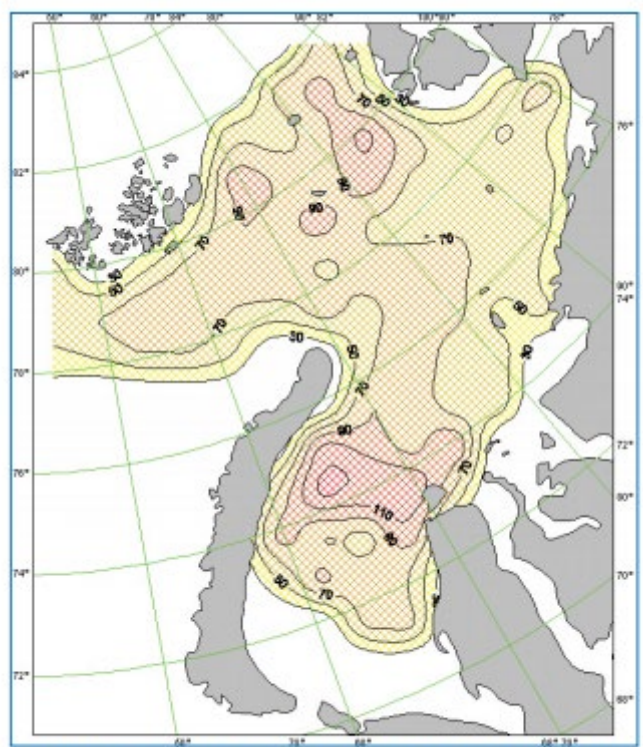
5. По подсистеме «Разрывы в ледяном покрове»:

- выбор характеристик региона (масштаб, сетка и т.п.);
- выбор характеристик нарушения сплошности ледяного покрова (удельная длина, ориентация и т.д.);
- расчет режимно-статистических характеристик нарушения сплошности;
- определение параметров изображения;
- хранение результатов расчета.

Выполнение всех функций ЭАПК «Лед» позволяет получить автоматизированное определение возраста, частной и общей сплоченности льда, как в зимний, так и в летний период.

В результате автоматизации функций ввода исходной информации, расчета и визуализации расчетных данных ЭАПК «Лед» позволяет получить прогностические поля основных характеристик ледяного покрова — сплоченность, толщина, торосистость, сжатия и дрейф льда. Обращение к подсистеме «Нарушения сплошности» позволяет получить режимно-статистические характеристики нарушений сплошности ледяного покрова

(трещины, каналы, разводья или разрывы), такие как удельная длина, модальное направление, протяженность, среднее расстояние между разрывами. На рисунке 7 показан пример представления протяженности разрывов по климатическим данным.



Пример представления характеристик нарушения сплошности ледяного покрова в виде протяженности разрывов (км) по климатическим данным.

Рисунок 6 - Представление протяженности разрывов

Также, как было сказано выше, существуют другие прототипы системы мониторинга. Например, мониторинг основанный на статистической обработке данных построенный методом гармонических весов. Этот алгоритм мониторинга, позволяет рассчитать климатическую модель и построить тренды ледовитости Арктических морей, или же составить точечные или интервальные прогнозы. Результаты этой системы просты, но не информативны касательно ледовой обстановки, и заключаются только в графиках и наборов показателей, без возможности отображения на карте. [24]

Следующие типы прототипов относятся к алгоритму автоматизированной обработки массивов радиолокационных ДДЗ. Данные системы в будущем

вероятно станут самым наилучшим решением для мониторинга, с условием того что будет действовать большое количество радиолокационных спутников, на полярных широтах чтобы обеспечить регулярность, что является достаточно трудоемкой и затратной космической миссией [25, 26].

### **3.2 Составные части систем мониторинга и реализация их функционала средствами ГИС**

Все рассмотренные в рамках анализа системы и прототипы, содержат следующий набор компонентов:

- Модели оценки характеристик льда по данным ДЗЗ (возраст, сплоченность, трещиноватость, торосистость и т.д.);
- Механизма составления карты или же картосхемы с вектором направления атмосферных характеристик, влияющих на движения льда;
- Моделирования синтезированной модели вариантов возможного движения льда по результатам предыдущих наблюдений;
- Модуля составления краткосрочно прогноза ледовой обстановки;

Для оценки общей сплоченности ледяного покрова в ЭАПК «Лед» применяется автоматизированная сегментация оптического изображения морских льдов на зоны различной сплоченности ледяного покрова. Сегментация производится в два этапа. На первом этапе реализуется пороговая классификация, при которой каждый пиксел морской поверхности ассоциируется либо с ярким объектом (морской лед), либо с темным фоном (вода). Территория суши исключается из рассмотрения с помощью наложения маски в виде шейп-файла береговой линии, хранящегося в базе данных. Аналогично исключаются из анализа участки, занятые облачностью и туманом.

На втором этапе обработки изображения морских льдов выполняется расчет сплоченности льдов по квадратам регулярной сетки. Шаг сетки может меняться в зависимости от района и расчетной сетки прогностической ледовой модели. По спутниковым данным проводится оценка сплоченности морских

льдов в баллах для каждого элемента сетки.

Выполнение данной процедуры осуществимо с применением ГИС-технологий, а также посредством проведения классификации с обучением. В классификации изображений с обучением используются спектральные сигнатуры, полученные из обучающих выборок. С помощью панели инструментов Arcgis Классификация изображений (Image Classification) можно создать обучающие выборки, соответствующие классам, которые нужно извлечь. Также можно создать из обучающих выборок файл сигнатур, который затем будет использоваться инструментами многомерной классификации для классификации изображения.

Поскольку движение ледяных полей в открытом морском пространстве обусловлено направлением и силой ветра, необходимо визуализировать данные движения воздушных масс в удобной для восприятия форме. После классификации сплоченности ледовых масс можно предопределить их движение воспользовавшись открытыми данными по состоянию атмосферы в данном регионе, например, NCAR Research Data или ресурсом Windy. Используя данные скорости ветра, его порывов и направления, можно сформировать поле точек, на основании которых построить векторы направления движений ледовых масс. Что также решается возможностями программного обеспечения ГИС пакета Arcgis, Qgis и др. [27].

Рассмотренные системы мониторинга используют не в полной мере возможности ГИС-технологий, при желании можно полностью адаптировать данные системы под распространённые ГИС-пакеты, что позволит реализовать данные системы для значительного круга пользователей.

Разрабатываемый программный ГИС модуль, который будет основываться на технологии краткосрочных (1-3 суток) ледовых прогнозах может автоматически генерировать набор данных о ледовой обстановке и публиковать результаты в виде автоматизированных картосхем или анимацией движения.

### 3.3 Данные используемые для мониторинга состояния ледяного покрова

Для решения поставленной задачи и создания программного модуля в первую очередь важно найти данные которые будут отвечать следующим обязательным требованиям:

- эти данные должны быть открытого пользования;
- они должны корректно отображать интересующую нас область;
- быть регулярными и постоянно обновляемыми.

Казалось бы, что данные требования просты и многие современные данные дистанционного зондирования подойдут под это описание, но все не так просто. Первая сложность заключается в недостатке достаточного количества общедоступных спутников в полярных областях, в связи с чем наблюдается ограниченность в выборе данных дистанционного зондирования.

Данные с общедоступных ресурсных спутников таких как – Landsat, Terra MODIS, OrbView или специализированного Cryostat, могут частично использоваться, но далеко не так регулярно обновляются и покрывают полностью исследуемую территорию, что изначально противоречит идеи оперативного мониторинга. Во-вторых, у полярных спутниковых систем метеорологического назначения преимущественно представлены данные низкого пространственного разрешения, на данные которых оказывает существенное влияние атмосферные явления, что затрудняет использование этих данных.

Для решения данной проблемы нами предлагается использование современных типов радиолокационной съемки Земли, а именно спутниковое пассивное микроволновое зондирование. Её преимущества заключается в глобальности по охвату, регулярности обновления, почти полной независимости от времени суток и различных погодных условий. Это в полной мере может обеспечить выполнение наших требований.

Кроме того, ее особенность в фиксации температуры отражённых яркостей позволяет нам регистрировать изменения поверхности, или же если



съёмка проводится в плотных слоях атмосферы, фиксировать определенные климатические явления, такие как сила и направления ветра.

Основываясь на анализе яркостей поверхности можно установить изменения концентрации и сплоченности морского льда, согласно алгоритму NASA TEAM. Данный алгоритм рассчитывает концентрацию морского льда, сравнивая отношения между тремя вертикальными (V) и горизонтальными (H) каналами яркостной температуры. Алгоритм основан на девяти связующих точках, каждая из которых представляет комбинацию типа поверхности (свободный ото льда, однолетний морской лед и многолетний морской лед) и канала (19H, 19V и 37V), используемых в алгоритме. Существуют уникальные наборы связующих точек для каждого полушария и каждого датчика, используемого в продукте данных. Регулировка связующих точек между датчиками выполняется посредством взаимной калибровки с использованием периодов перекрытия датчиков [28, 29].

Одним из важных наборов данных для исследования Арктики является данные SSMR и SSM/I-SSMIS. Этот массив данных является весомым, и содержит в себе дневные данные пассивного микроволнового зондирования полярных областей. Для обработки этих данных используется вышеупомянутый алгоритм NASA TEAM. Эти данные охватывают период с 26 октября 1978 года по настоящий момент времени, и публикуются в режиме «near-realtime», так называемом «почти реальном времени», когда на следующий день есть данные вчерашнего дня. Данная информация представляет собой матрицы оценки общей сплоченности морского льда в процентах по ячейкам сетки полярной стереографической проекции размерностью 25 на 25 км. Эти данные имеют низкое разрешение, и известные ограничения и погрешности – занижение сплоченности для разрушенного льда в период таяния, полос и пятен. Однако данный массив предоставляет уникальные возможности для оценки вероятностных характеристик сплоченности льда, а также положения кромки льда и общей ледовитости.

### **3.4 Алгоритм мониторинга с использованием открытых данных на территорию Арктического региона**

Имея доступ к таким открытым данным, которые обновляются в так называемом режиме «почти реального времени», мы можем наложить их друг на друга и отследить динамику изменений с течением времени. Но этого недостаточно для организации постоянного оперативного мониторинга.

Задачи обработки, оформления и вывода данных, достаточно затратны по времени и рутинные по своему исполнению. Если этот процесс должен выполняться постоянно, важно оптимизировать данные задачи, хотя бы частично. И сделать его для пользователя автоматизированным или даже автоматическим, при наличии достаточных физических ресурсов.

Поэтому в рамках разработки программного модуля, в первую очередь требуется создания алгоритма, который позволит оптимизировать данные задачи и сделать их незаметными, легко и быстро выполнимыми для пользователя, а именно решить проблему автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования.

Предлагаемый алгоритм, основывается на простой логике, а именно на том что, если пользователю понадобилось выполнить оценку ледовой обстановки территории и отразить произошедшие изменения за определённый отрезок времени ему потребуется только подгрузить данные и запустить программный модуль обработки.

Реализация данной простой логики в ГИС приложении требует выполнения ряда картографических операций и аналитических функций. Их можно представить в виде блок-схемы работы автоматизированного алгоритма, представленного в приложении Б.1, который основывается на открытых данных дистанционного зондирования.

Операции, выполняемые пользователем отмечены красными цифрами и линиями, самостоятельная работа алгоритма - синими стрелками. Как можно

отметить, все что требуется пользователю, это поместить в специальную папку данные с алгоритмом и запустить его (цифра 2).

Этапы работы алгоритма:

1. Алгоритм начинает обрабатывать данные находящиеся в папке, и создает для них вспомогательные файлы с метаданными, описывающими характеристики данных как растрового слоя и определяет проекцию для правильного отображения полярного региона. Этот этап делает данные доступными для программы ArcMap, так как изначально они зашифрованы в бинарном формате, поставляемым со спутника, не имеют пространственной привязки, и не обладают данными о проекции, только набор неструктурированных числовых значений пикселей. Метаданные описывают структуру пикселей растрового поля, и задают характеристики пространственного отображения. На основании крайних пикселей, с заданными координатами, происходит определение специальной проекции. Для данных пассивного микроволнового зондирования используются универсальная полярная стереографическая проекция NSIDC, основанная на эллипсоиде Хьюза 1980 г. Блок-схема проектирования алгоритма представлена на рисунке 8.

Полярная стереографическая проекция NSIDC определяет плоскость проекции или сетку, касательную к поверхности Земли на  $70^\circ$  северной и южной широты. Хотя это увеличивает искажение на полюсах на шесть процентов и уменьшает искажение на границах сетки на ту же величину, широта  $70^\circ$  была выбрана так, чтобы искажение было небольшим или отсутствовало совсем в краевой зоне льда.(1).

2. Оформление слоёв согласно шаблону, находящемуся в соседней папке «оформление». Данный шаблон является заранее созданным тематическим оформлением, созданным способом картограммы, воспринимаемый программой ArcMap, по желанию пользователь может заменить его на другой или же воспользоваться вариантом, созданный автором (2).

3. Автоматизированное создание рабочий набор ГИС-приложения с добавлением в него всех обработанных и подводящих по критериям пользователю данных.

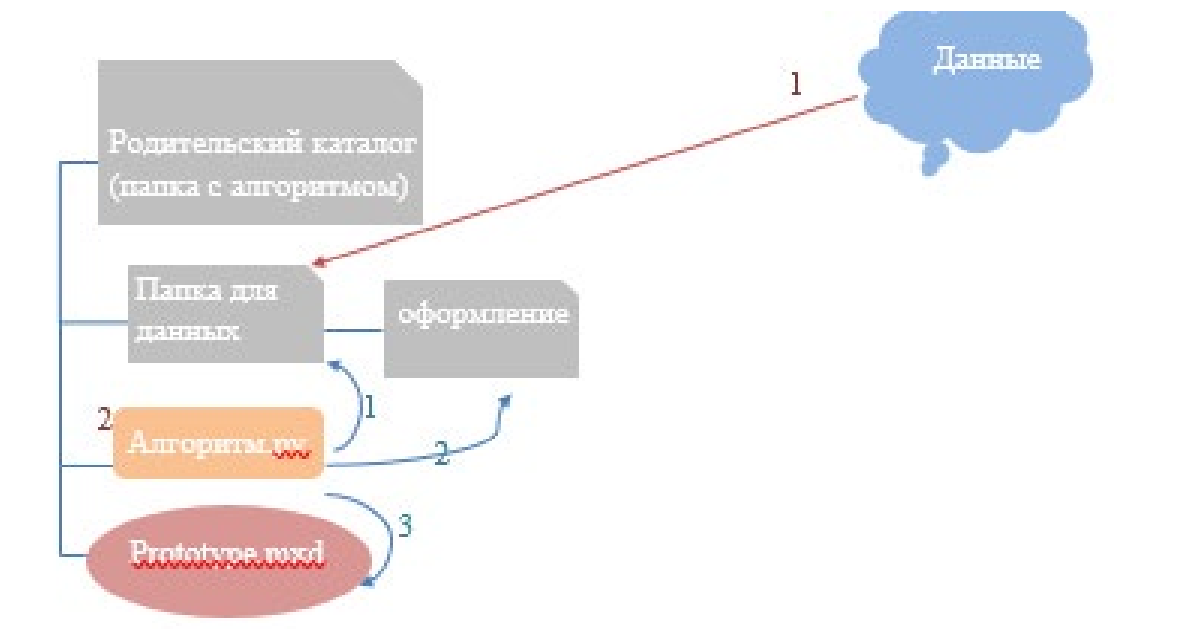


Рисунок 7 - Блок-схема проектирования алгоритма

В завершении пользователю остаётся только выбрать удобный способ визуализации полученных данных (серия карт или анимация на разные даты), воспользоваться другими функциями ГИС для проведения анализа или экспортировать их в необходимом формате, что остаётся на его усмотрение.

Важно отметить, что предложенный алгоритм может свободно обрабатывать последовательно или одновременно сразу несколько наборов данных дистанционного зондирования. Например, данные приповерхностного (приводного) ветра или волновых движений получаемые со скаттерометров или данные солёности поверхностного слоя воды с помощью микроволнового радиометра, что позволяет реализовать полноценную систему оперативного мониторинга с учётом и наложением разнообразных факторов, влияющие на ледовую обстановку.

По своей практической сути предложенный алгоритм по своей производительности упирается в вычислительные ограничения системы и может

в автоматизированном режиме обрабатывать и комплексировать огромные массивы накопленных и прогнозных данных (недельные и годовые), представляя результат в считанные минуты, при том что пользователю данную задачу оперативно решить невозможно.

### **3.5 Создание прототипа системы мониторинга ледового покрова**

Для создания прототипа программного ГИС модуля оперативного мониторинга ледовой обстановки использовалась программная среда Python версии 2.7 и программное обеспечение ГИС Arcgis версии 10.4.

При написании скрипта для выполнения ряда картографических операций и аналитических функций использовались следующие модули языка:

- Модуль OS - набор функции для работы с операционной системой;
- Модуль glob – модуль, работающий с абсолютными и относительными путями;
- Модуль shutil – дает доступ к функциям высокого уровня, по обработке файлов, папок или групп файлов
- Пакет Arcpy – этот пакет устанавливается вместе с ПО Arcgis, обеспечивает функциями для анализа географических пространственных данных, их конвертации управления, и автоматизации представления и отображения картографических материалов.

Во-первых, нужно создать набор определённых каталогов папок и шаблонов рабочего набора и файлов оформления. В родительский каталог помещается папка с набором исходных данных и файлами шаблонов оформления. В зависимости от количества обрабатываемых исходных наборов данных создастся несколько, две или одна папки для размещения исходных данных, которые будут автоматизировано обрабатываться функциями алгоритма.

После первого этапа автоматизированной обработки программный модуль согласно созданного пользователем шаблона оформления продолжает обработки

временных данных для того чтобы они стали доступными для прямой загрузки и отображения в среде ГИС приложения Arcgis.

В шаблоне пользователем определяются следующие параметры:

- количество классов и их пороговые значения;
- цветовая шкала для оформления классов;
- тип передискретизация изображения;
- пространственный экстенд отображения, по желанию пользователя его можно изменить и отобразить локальную часть территории Арктики;

Полученные и обработанные данные соответственно будут автоматически помещены в папки «Input» и «Output».

Для задания при отображении в ГИС пакете созданных на основании классификации данных в папку с оформлением помещается специально подготовленный файл слоя с расширением lyr, (работает для ArcGIS) в котором для значений 0 — это водная поверхность, а значение 250-254 - территория суши задаётся один из образцов цветовой схемы тематического картографирования (раскраски).

Далее в «родительском» каталоге создается рабочий набор в формате mxд и определяется нужный набор панелей, надстроек и функций, который будет использоваться как шаблон для создания рабочего набора с оформленными данными.

После завершения создания каталогов и шаблонов файлов непосредственно создается исполнительный файл, программируемый на языке Python, где прописываются все вышеперечисленные действия, операции и функции пакетной обработки в ГИС модуле, по которому будет выполняться алгоритм скрипта.

Первый шаг работы скрипта заключается в пакетной конвертации расширения данных с BIN на BIL. В первом случае данные представлены в бинарном исходном формате и не могут быть считаны или визуализированы без конвертации напрямую ни в одном программном обеспечении ГИС.

В нашем случае выполнение данной процедуры позволяет ГИС программе ArcMap, «увидеть» и распознать исходные данные в качестве растра. Поскольку исходные данные имеют разные размерные характеристики и отличные системы координат, а также временные метки для их автоматизированного чтения для каждого файла нужно сопроводить вспомогательным файлом (метаданными) с его описанием.

Исходя из это следующим шагом скрипта является считывание всех файлов, находящихся в папке, и создание согласно их названию к каждому из них текстового документа в формате `hdr`, со следующим содержимым:

- `nrows 448` - Количество строк для записи пикселей, оптимальное значение для нормального отображения Северного полярного региона, для южного достаточно 332
- `ncols 304` – Количество столбцов для пикселей пропорционально количеству строк
- `nbands 1` – Число спектральных каналов изображения.
- `nbits 8` – Количество битов записи информации спутника в растр
- `layout bil` – Формат файла к которому относятся метаданные, определяющий организация каналов в файле изображения. `Bil` – значит каналы разделены по строкам
- `byteorder I` - Последовательность записи байтов информации спутника в растр, от старшего к младшему. Подобен привычному порядку записи «слево-направо»
- `skipbytes 300` – Пропуск записи данных, необходимое количество байт, где нет данных. Связан с областью начала данных изображения.
- `ulxmap 3837500` - x координата центра верхнего левого пиксела.
- `ulymap 5837500` - y координата центра верхнего левого пиксела.
- `xdim 25000` - Размер пиксела по оси x в единицах карты.
- `ydim 25000` - Размер пиксела по оси y в единицах карты.

После совершения этих шагов файлы готовы к автоматизированному конвертированию скриптом, в котором прописывается функция аналогичной инструменту «RasterToOtherFormat» (Раст в другой формат(несколько)) из программы ArcMap и происходит сохранение отдельных готовых растров в широко применяемом формате TIFF.

На следующем шаге скриптом в пакетном режиме определяется картографическая проекция для всех файлов TIFF, происходит автоматическое считывание исходных пространственных данных и регистрация, после чего полностью подготовленные растры сохраняются в формате GeoTIFF, содержащим проекцию и готового для визуализации.

На основании шаблонов, описанных выше, создаётся рабочий набор, куда автоматически подгружаются и комплексируются все обработанные данные дистанционного зондирования ледовой обстановки.

Завершающим шагом работы алгоритма и исполнения скрипта является открытие подготовленного рабочего набора с обработанными и оформленными слоями, после чего пользователю стандартными средствами ГИС пакета ArcMap остаётся только в зависимости от своих целей визуализировать, проанализировать или экспортировать данные.

Практическое тестирование подготовленного скрипта программного модуля мониторинга ледовой обстановки на ноутбуке марки Asus Vivobook 14 показало, что в среднем обработка примерно 365 файлов (размером почти 1 Гб) выполняется в течение 5 минут, ручная обработка одной сцены с единственной характеристикой занимает около 1 минуты и суммарно потребует порядка 5 часов. При этом стоит отметить, что при увеличении количества обрабатываемых параметров и при различии исходных размеров и разрешения сцен скорость ручной обработки будет существенно замедляться.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Природные условия и риски в Арктике становятся все более непредсказуемыми в связи с глобальным потеплением. В связи с этим становится все более актуальным изучение влияния природных условий на ледовую обстановку. Проанализированные нами данные дистанционного зондирования подтвердили возможность их применения для целей проведения более точной оценки природных рисков инвестиционных проектов, проведения прикладных НИР, мониторинга и прогноза ледовой обстановки в Арктическом регионе с учетом доминирующих метеорологических факторов, связанных с изменениями природных условий.

Обзор существующих систем мониторинга ледовой обстановки и анализа алгоритмов их работы показал, что на практике реализованы считанные единицы проектов, большинство из которых остаются закрытыми для массового пользователя. Одним из примеров подобных проектов является экспериментальный программно-аппаратный комплекс (ЭАПК) спутникового мониторинга и прогнозирования ледовой обстановки «Лед», разрабатываемый Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом.

На его примере были проанализированы алгоритмы функционирования и устройство реализуемого автоматизированного ГИС модуля. Анализ доступных и подходящих пространственных данных дистанционного зондирования показала, что оптимальным вариантом для арктического региона является массив данных сканирующего многоканального микроволнового радиометра (датчики SSMR и SSM/I-SSMIS), установленным на спутнике Nimbus-7.

Был разработан алгоритм автоматизации процессов обработки, составления и оформления, открытых данных дистанционного зондирования ледовой обстановки для ГИС приложения ArcMap. Сама разработка осуществлялась посредством написания инструмента скрипта, выполняющего определённый набор операций и функций среды ArcMap в оболочке Python. В следствие чего непосредственно был создан программный модуль.

Предложенный алгоритм и реализованной скрипт программного ГИС модуля автоматизирует выполнение рутинных задач пользователем и позволяет реализовать полноценную оперативную систему мониторинга ледовой обстановки Арктического региона по открытым данным ДЗЗ и загрузке дополнительных доминантных климатических факторов напрямую на нее влияющую.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Алексеев, Г. В., Радионов, В.Ф., Смоляницкий, В.М., Фильчук К.В., Итоги и перспективы изучения климата и климатического обслуживания в Арктике/ Г. В. Алексеев, В.Ф. Радионов, В.М. Смоляницкий, К.В. Фильчук, // Проблемы Арктики и Антарктики. Арктические и антарктические исследования – 2018. - № 64. - С. 262–269.

2 Assessment of Undiscovered Oil and Gas in the Arctic / Donald L. Gautier [et al.] // Science. 2009, vol. 324, no 5931, pp. 1175-1179.

3 Шерстюков, Б. Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата / Б. Г. Шерстюков // Арктика и Север. – 2016. - № 24. – С. 39-66.

4 Катцов, В. М., Порфирьев Б. Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики/ В. М. Катцов, Б. Н. Порфирьев // Арктик: экология и экономика. – 2012. - № 2(6). – С. 66–79.

5 Медведева Л. М., Лаврентьев А. В. Северный морской путь: опыт освоения и перспективы развития/ Л. М. Медведева, А. В. Лаврентьев // Ойкумена – 2014 - № 2 – С. 23-29

6 Милославский, В. Г. Освоение российской Арктики и арктических территорий: потенциал, конкуренция и проблематика / В. Г. Милославский // Молодой ученый. — 2017. — № 18 (152). — С. 157-161.

7 Брызгалов, Р. А. Северный морской путь: состояние и перспективы развития/ Р. А. Брызгалов // Научно-практический журнал «МИР». - 2011. – С. 103-103

8 Куватов, В. И. Потенциал Северного морского пути Арктической зоны России. Факторы и Стратегия развития/ В. И. Куватов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». - 2014. - № 6(25). – С. 1-16

9 Ускорение таяния льдов Арктики и Антарктики. Изменение климата [Электронный ресурс]: Информационно-аналитический портал. - URL: <https://geocenter.info> (дата обращения 25.11.2020). - Загл. с экрана. Яз. рус.

10 Малинин, В. Н. Изменения уровня мирового океана и климата/ В. Н. Малинин // Ученые записки - № 41 – С. 110-115

11 Исследование ООН показывает ускорение изменения климата на суше, на море и в атмосфере [Электронный ресурс]: Новости ООН. - URL: <https://news.un.org/en/> (дата обращения 20.02.2021). - Загл. с экрана. Яз. англ.

12 Новости и аналитика морского льда [Электронный ресурс]: Национального центра данных по снегу и льду. - URL: <https://nsidc.org/> (дата обращения 18.02.2021). - Загл. с экрана. Яз. англ.

13 Кочемасов, Ю. В., Моргунов, Б. А., Соломатин, В. И. Экологоэкономическая оценка перспективы развития Арктики // Экология и энергетика [Электронный ресурс]: [ecoenergy.ru/](http://www.ecoenergy.ru/) - URL: <http://www.ecoenergy.ru/Article54.html> (дата обращения 25.02.2021). - Загл. с экрана. Яз. рус.

14 Клименко, В. В., Астрина Н. А. Документальные свидетельства сильных колебаний климата российской Арктики в XV—XX вв. // История и современность: Журнал. — 2006. — № 1. — С. 179–217.

15 Филиппов, В. В., Жуков М. А. Проблемы экономического развития арктической зоны Российской Федерации // НЭП — XXI век. Наука Экономика Промышленность. — 2006. — № 2. — С. 19–22.

16 Юшкин, Н. П. Арктика в стратегии реализации топливно-энергетических перспектив / Под ред. В. Е. Фортова, Ю. Г. Леонова. — М.: Наука, 2006. — С. 254.

17 Рубан, Д. А. Глобальные изменения климата как фактор риска для Российской экономики: методологические вопросы / Д.А. Рубан, К.И. Серпова, Н.Н. Яшалова, В.С. Васильцов, Е.Н. Яковлева // Вестник НГУЭУ– 2018. - № 3. - С. 11–23.

18 Старцев, Я. Ю. Нормативное описание Российской Арктической политики: освоение сырьевой периферии или региональное развитие // ДискурсПи – 2016. - №3-4. – С. 193-206.

19 Коннова, Л. А., Львова, Ю. В. Возможные источники экологической опасности на территории субъектов Арктической зоны Российской Федерации

(Мурманской и Архангельской областей) // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России» - 2018. - №2. – С. 50 - 55.

20 Григорьев, М. Н. Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции / М.Н. Григорьев, С.О. Разумов, В.В. Куницкий, В.Б. Спектор // Криосфера Земли. – 2016. - Ч. 10 - №4 – С. 74-94.

21 Багдасарян, А. А. Основные экологические проблемы Северного морского пути в перспективе его развития. // Российская Арктика. – 2020. – №9. - С. 17-29.

22 Миронов, Е. У. Современное состояние и перспективы исследований ледяного покрова морей российской Арктики / Е.У. Миронов, С.В. Клячкин, В.М. Смоляницкий, А.В. Юлин, С.В. Фролов // Российская Арктика. – 2020. – №10. - С. 13-29.

23 Экспериментальный аппаратно-программный комплекс спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки / Миронов Е.У [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2017. - № 2(112). – С. 15-25.

24 Зеленина, Л. И., Антипин, А. Л., Льды Арктики: мониторинг и меры адаптации / Л.И. Зеленина, А.Л. Антипин // Арктика и Север. – 2015. - № 18. – С. 122-130.

25 Прогнозирование ледовой обстановки и оптимального маршрута прохождения судов в арктических широтах для безопасного судовождения / Чириков А. В. [и др.] // Проблемы Северного морского пути. – 2015. - № 3(19). – С. 96-103.

26 Казаков, Э. Э. Система оперативного мониторинга морского льда в Арктике основанная на открытых спутниковых радиолокационных данных / Э.Э. Казаков, В.А. Волков, Д.М. Демчев // Науки о Земле – 2012 - №4 – С. 12-22

27 Прогноз погоды на основе данных в реальном времени [Электронный ресурс]: Информационно-аналитический портал. - URL: <https://learn.arcgis.com/>

ru/projects/predict-weather-with-real-time-data/ (дата обращения 25.02.2021). -  
Загл. с экрана. Яз. рус.

28 Andersen, S., Tonboe, R., Kaleschke, L., Heygster, G., Pedersen, L. T. Intercomparison of passive microwave sea ice concentration retrievals over the high-concentration Arctic sea ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, vol. 112, no C8, pp. 1-18.

29 Cavalieri, D. J., P. Gloersen, and W. J. Campbell, Determination of sea ice parameters with the Nimbus 7 SMMR. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1984, vol. 89, no D4, pp. 5355-5369.

30 Свейгарт, Эл, Автоматизация рутинных задач с помощью Python: практическое руководство для начинающих / Эл Свейгарт – пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2017. – 592 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

# Приложение А

## Границы льда Арктики

Границы льда Арктики, за весенний период 2015 - 2020 год

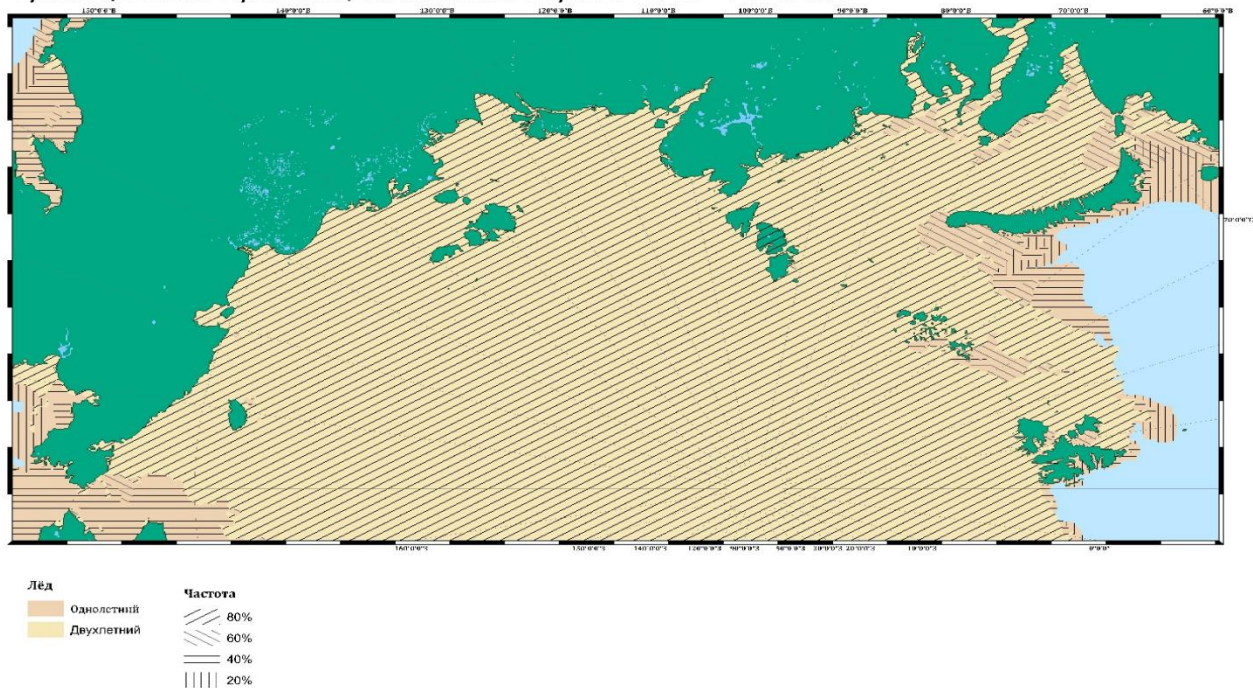


Рисунок А.1 - Границы льда Арктики за весенний период 2015 - 2020 год

Границы льда Арктики, за осенний период(сентябрь середина ноября) 2015 - 2019 год

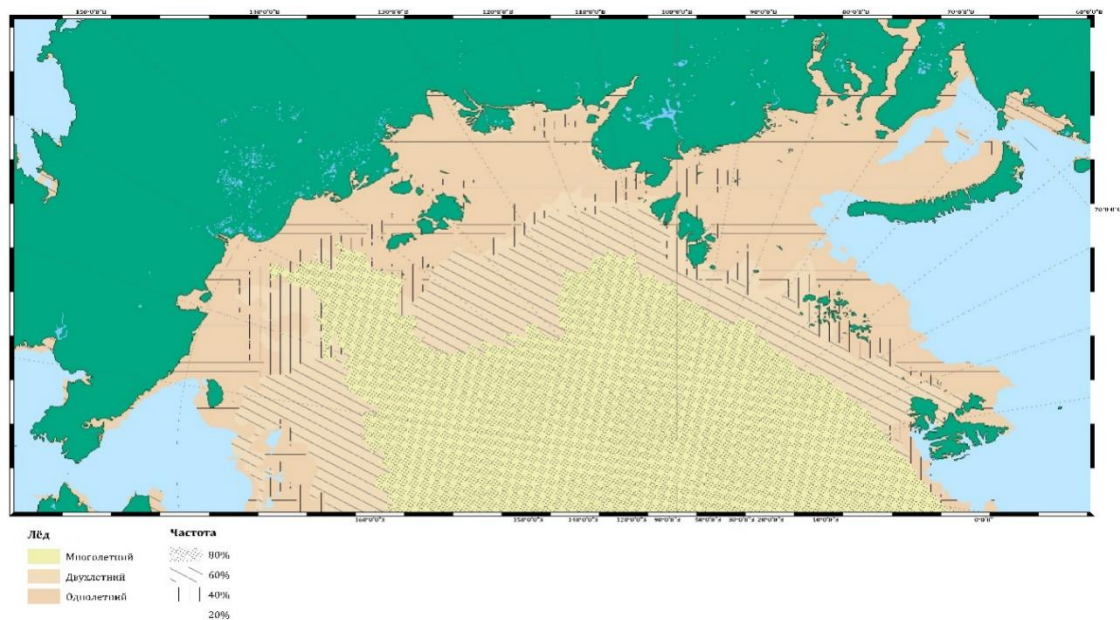


Рисунок А.2 - Границы льда Арктики за осенний период 2015 - 2019 год



Приложение Б  
Блок-схема работы алгоритма

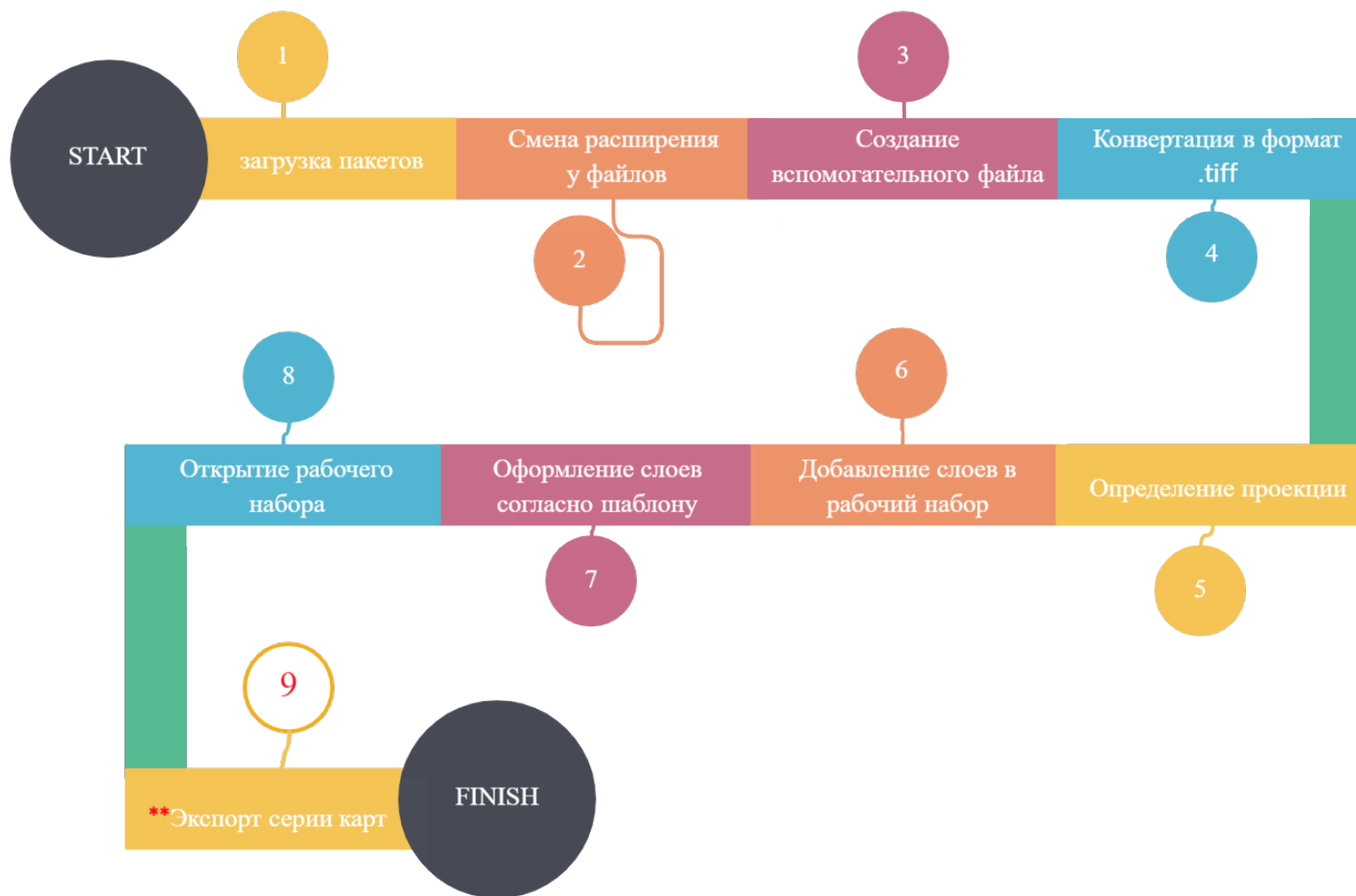


Рисунок Б.1 - Блок-схема работы алгоритма

## Приложение В

Серия карт ледовой обстановки, результат работы модуля

Концентрация и сплоченность льда на 01.01.21

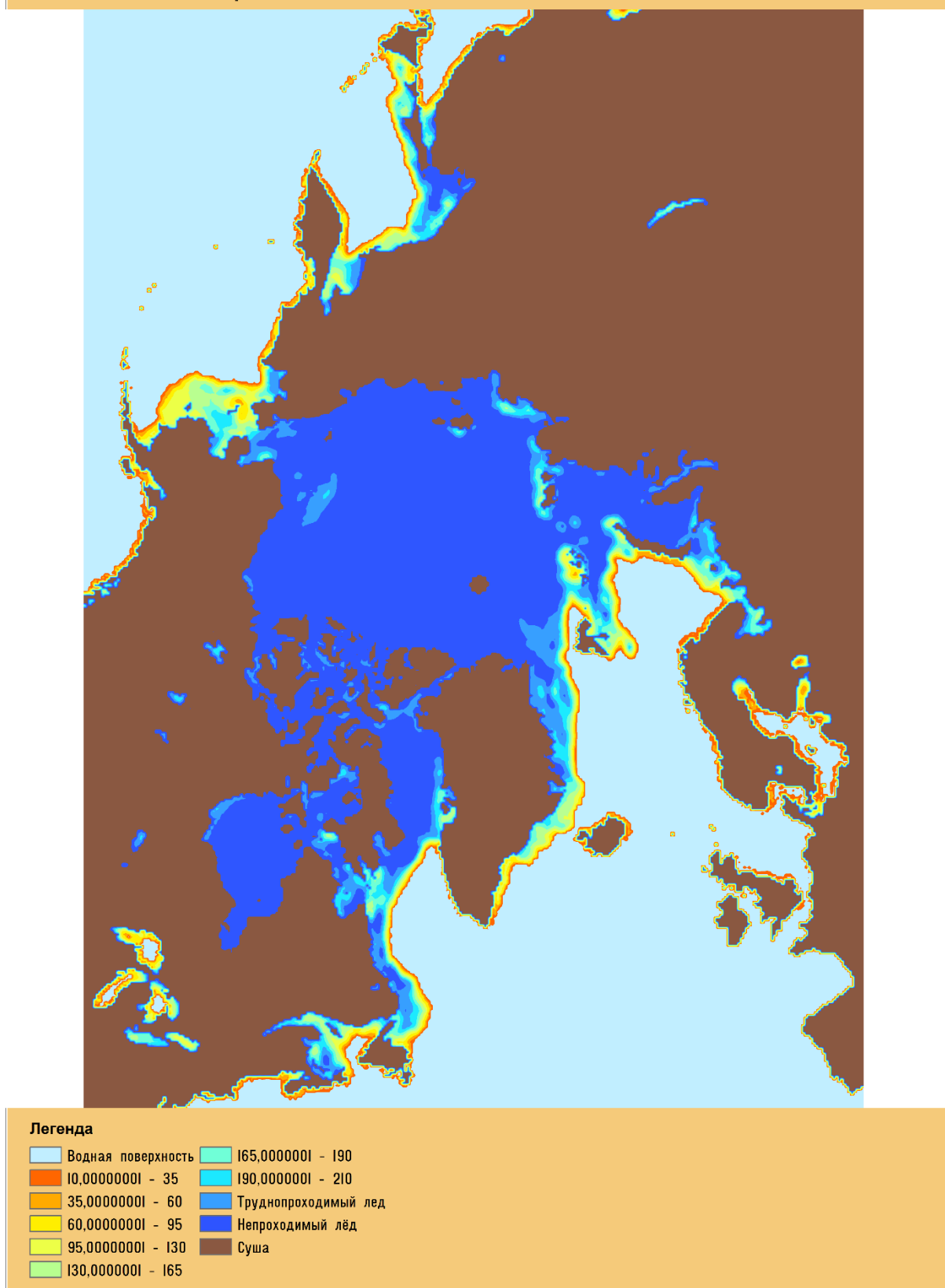
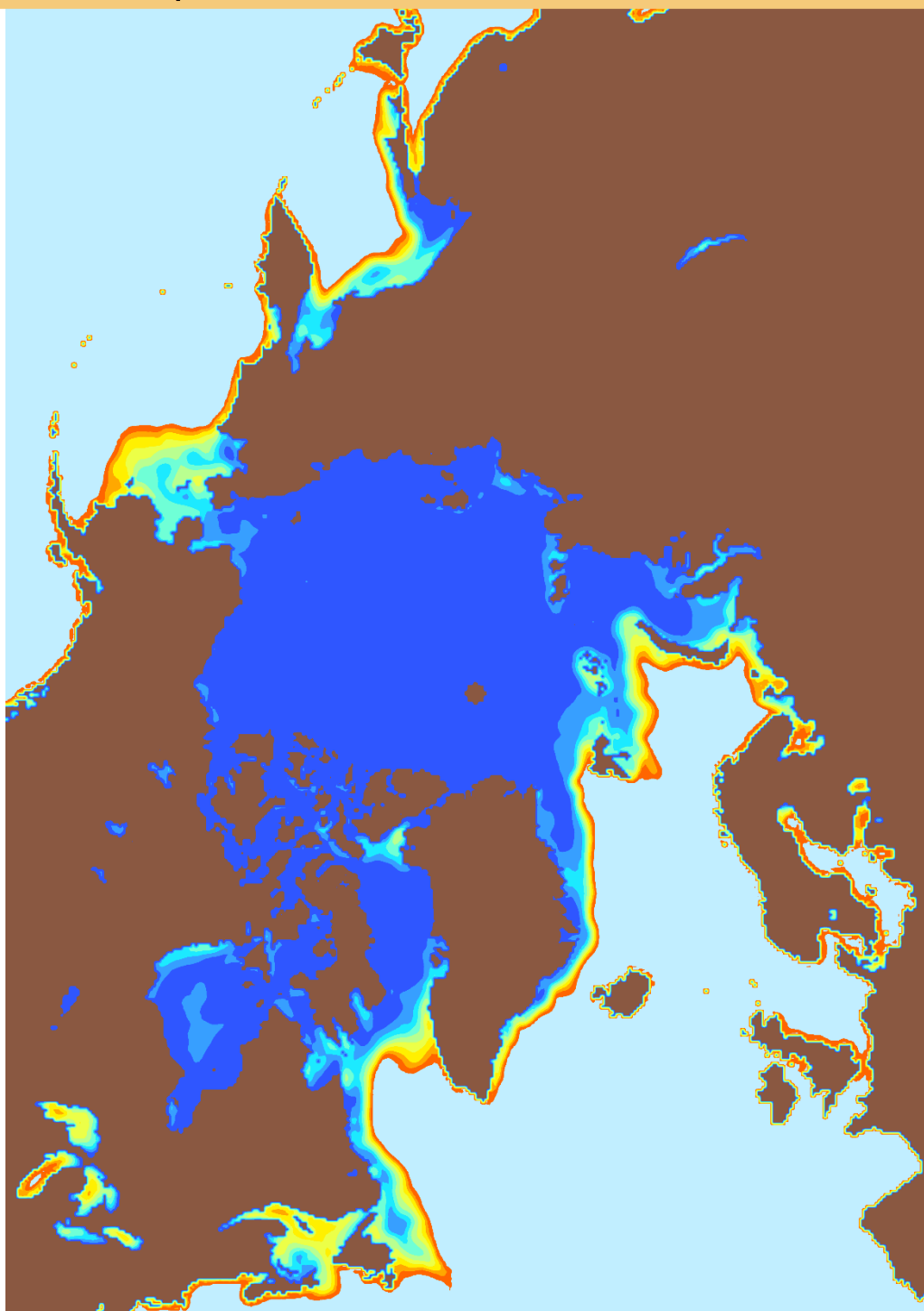


Рисунок В.1 - Концентрация и сплоченность ледового покрова на 01.01.21

## Концентрация и сплоченность льда на 05.01.21



### Легенда

|                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| Водная поверхность | 165,0000001 - 190    |
| 10,0000001 - 35    | 190,0000001 - 210    |
| 35,0000001 - 60    | Труднопроходимый лёд |
| 60,0000001 - 95    | Непроходимый лёд     |
| 95,0000001 - 130   | Суша                 |
| 130,0000001 - 165  |                      |

Рисунок В.2 - Концентрация и сплоченность ледового покрова на 05.01.21

## Концентрация и сплоченность льда на 09.01.21

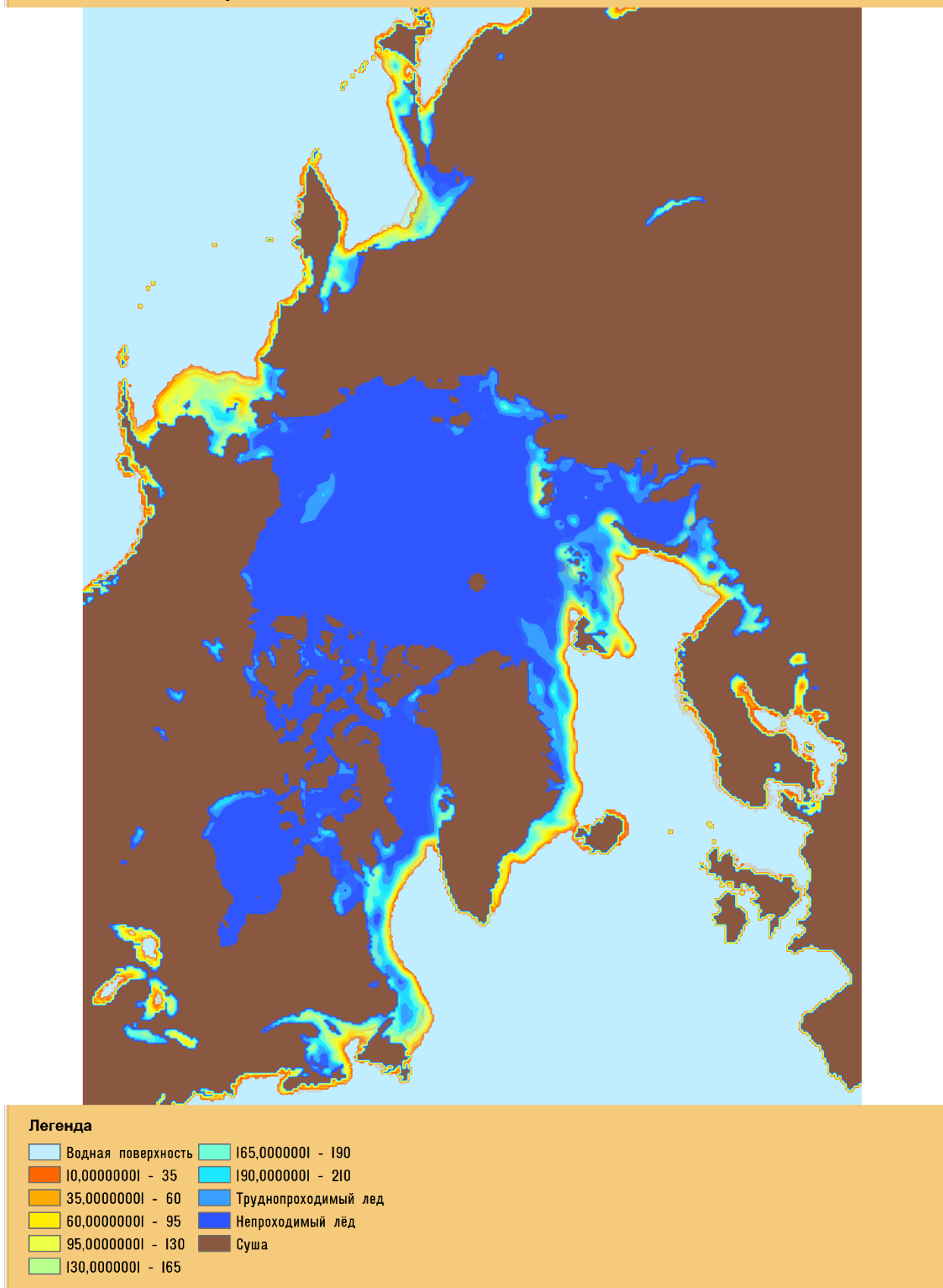


Рисунок В.3 - Концентрация и сплоченность ледового покрова на 09.01.21

**Приложение Г**  
**Материалы ГИС-модуля**

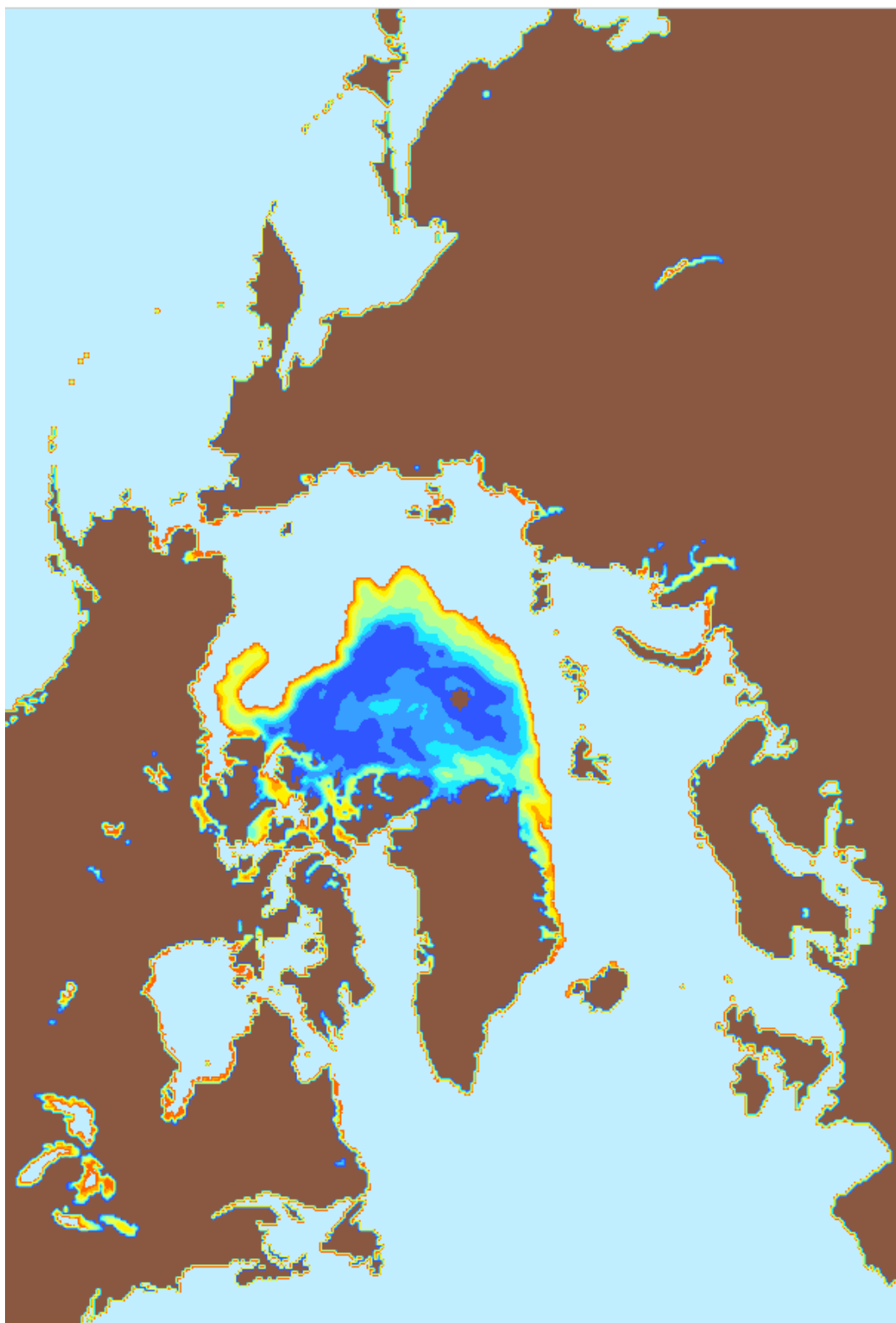


Рисунок Г.1 – Фрагмент анимации динамики изменений ледовой обстановки за 2020 г - записан на диск

Рисунок Г.2 - Оптический диск с записанными материалами