

На правах рукописи

А. Максимов

Максимов Артем Алексеевич

**КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В
КАСПИЙСКОМ МОРЕ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ**

Специальность: 25.00.30 – «Метеорология, климатология, агрометеорология»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата географических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Научно-исследовательском центре космической гидрометеорологии «Планета» (ФГБУ «НИЦ «Планета»), в отделе тематической обработки и интерпретации спутниковой информации.

Научный руководитель: **Васильев Александр Александрович**, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»

Официальные оппоненты: **Репина Ирина Анатольевна**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующая лабораторией взаимодействия атмосферы и океана федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Степанов Валерий Викторович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией автоматизации и обработки ледовой информации федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Защита состоится «07» сентября 2022 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 327.003.01 при федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России») по адресу: Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.11.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Гидрометцентр России» и на сайте: <https://meteoinfo.ru/disserboard/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



М.В. Шатунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Каспийское море – крупнейший на Земле замкнутый водоем, расположенный в материковой части на границе Европы и Азии. В нем содержится 78 тыс. км³ воды, более 40% всего объема озерных вод мира. В Каспийское море впадает 130 рек, самой крупной из которых является р. Волга со среднегодовым водостоком 220 км³. На шельфе Каспийского моря более двух веков производится добыча нефти. В настоящее время нефтяной ресурс моря оценивается в 18 млрд. т, что составляет 3% мировых запасов нефти. В Каспийском море водится более ста видов рыб, в том числе осетровых пород, численность которых оценивается в 80% от всех запасов осетровых рыб планеты. Каспийское море является зоной национальных интересов 5 прикаспийских государств (России, Казахстана, Азербайджана, Туркменистана и Ирана), имеющих множество нерешенных проблем, в том числе проблему раздела морского дна и недр. Охрана природной среды Каспийского моря относится к приоритетным направлениям государственной политики Российской Федерации на ближайшие годы.

Гидрометеорологические и ледовые условия Каспийского моря характеризуются значительной изменчивостью, так как находятся под переменным влиянием холодных арктических воздушных масс, умеренных влажных морских, формируемых над Атлантикой, сухих континентальных из Казахстана и теплых тропических из средиземноморского региона.

Наибольшую опасность в зимний период для хозяйственной деятельности на Северном Каспии представляют его ледовые условия. Каспийское море относится к морям с сезонным ледяным покровом. В мелководной северной части моря лед образуется ежегодно, в средней части моря лед появляется у побережья только в суровые зимы, а в южной части он совсем отсутствует. Под воздействием гидрометеорологических факторов происходят динамические деформации льда (интенсивные подвижки, взлом, наслоение, торшение), в результате чего возникают опасные ледяные образования, такие как навалы, торосы, гряды торосов, стамухи и др., представляющие угрозу безопасности для судоходства и объектов инфраструктуры, расположенных на шельфе. Кроме того, характер и интенсивность ледовых процессов существенно зависит от колебаний уровня моря. В последние годы активизировались работы по разведке, добыче и транспортировке углеводородов на шельфе Северного Каспия, требующие проведения регулярных наблюдений ледовой обстановки.

Большое значение имеет изучение ледяного покрова Каспийского моря не только для морских отраслей, но и для биологических экосистем региона. В частности, изменение площади морского льда и продолжительности ледового

периода оказывают существенное влияние на основные жизненные циклы каспийского тюленя, который занесен в Красную Книгу.

К наиболее эффективным средствам наблюдения ледяного покрова Каспийского моря относятся спутниковые данные оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов, которые представляют информационную основу космического ледового мониторинга. Задачи изучения космическими средствами Каспийского моря условно можно разбить на три класса:

- оперативный обзорный спутниковый мониторинг всего моря;
- оперативный детализированный спутниковый мониторинг районов сосредоточения опасных ледовых образований;
- анализ долговременных рядов спутниковой информационной продукции по морскому льду.

Для решения задач первого класса необходимы: высокая оперативность получения данных в различных спектральных диапазонах; широкая обзорность; повышенное быстродействие обработки и распространения информации; привлечение данных наземных измерений и экспертных знаний. Для решения задач второго класса – высокое пространственное разрешение и высокая периодичность получения данных (в т.ч. всепогодных) в определенные ледовые периоды. Для решения задач третьего класса - создание и ведение архива многолетних рядов спутниковых наблюдений морского льда (индикаторов климатических изменений); обеспечение их непрерывности, а также геометрической и радиометрической совместимости.

Решение задач космического мониторинга требует создания эффективных методик и технологий обработки спутниковых данных. Создаваемые методики и технологии должны быть основаны на сочетании методических положений, выпущенных в 70 – 80-е годы прошлого столетия и современных сведений, полученных на опыте использования информации с новых космических аппаратов, новой бортовой аппаратуры, в том числе высокого пространственного разрешения (включая радиолокационную), а также более, чем тридцатилетнем опыте проведения в НИЦ «Планета» космического мониторинга морского ледяного покрова Арктики, Антарктики и замерзающих морей России, включающего построение ледовых карт.

Кроме того, технологии должны обеспечивать соответствие выходной информационной продукции, архивов и каталогов данных внутренним ведомственным и международным стандартам Всемирной метеорологической организации (WMO), Комитета по спутникам наблюдения Земли (CEOS), Координационной группы по метеорологическим спутникам (CGMS), а также требованиям Мирового центра данных по морскому льду (МЦД МЛ), в

котором хранятся ледовые карты Каспийского моря, созданные в НИЦ «Планета».

Решение этих проблем позволит осуществлять массовую обработку текущей и архивной спутниковой информации по Каспийскому морю, проводить оперативное картирование и исследовать его многолетнюю динамику ледяного покрова и, тем самым, глубже понять процессы формирования и развития ледяного покрова в связи с глобальными изменениями климатических процессов, происходящими в современный период.

Цель и задачи работы. Цель диссертационной работы состоит в развитии и усовершенствовании методик и технологий космического мониторинга, предназначенных для решения задач оперативного картирования ледовой обстановки, контроля опасных ледовых образований и изучении долговременных характеристик ледяного покрова Каспийского моря.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Анализ особенностей гидрометеорологического и ледового режимов Каспийского моря.
2. Развитие методов космического мониторинга морского ледяного покрова.
3. Развитие технологии оперативного построения ледовых карт по спутниковым данным в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat».
4. Изучение долговременных характеристик ледяного покрова Каспийского моря по результатам многолетних спутниковых наблюдений.

Методы исследования. Работа выполнялась поэтапно в соответствии с поставленными задачами. Проведен анализ и обобщение литературных источников. Основные результаты диссертационной работы получены с использованием методов комплексирования спутниковых данных различных спектральных диапазонов и разного пространственного разрешения с привлечением результатов наземных измерений ледовых параметров, а также экспертных знаний; автоматизированных методов цифровой обработки многозональных спутниковых изображений; методов интерактивного дешифрирования ледовых характеристик на спутниковых изображениях оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов; статистических методов исследования.

Научная новизна. Усовершенствованы технологии оперативного построения ледовых карт в растровом и векторном форматах по спутниковым данным, в том числе с новых космических аппаратов (включая радиолокационные).

Разработано и одобрено на заседании ЦМКП Росгидромета «Методическое пособие по созданию карт морского ледяного покрова на основе спутниковых данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat»».

Изучены условия формирования и пространственно-временной изменчивости опасных ледовых образований в Каспийском море на основе спутниковых данных среднего и высокого пространственного разрешения. Сформулированы требования для изучения по спутниковым данным опасных ледяных образований (стамух) в Каспийском море.

Построены карты границ распространения припая и плавучего льда Каспийского моря с периодичностью 1 раз в неделю за 2004-2021 гг. и проведен их совместный анализ с синоптическими материалами.

В технологии ледового картирования Каспийского моря впервые использованы данные МСУ-ИК-СРМ российского космического аппарата Каноус-В-ИК (длина волны 8,4 – 9,4 мкм, пространственное разрешение 200 м, ширина обзора 2000 км) для детализированного мониторинга ледовой обстановки, что особенно важно для построения ледовых карт в бухтах, заливах, проливах и в других непротяженных акваториях.

Практическая значимость. Внедрение в оперативную практику НИЦ «Планета» усовершенствованного многофункционального отечественного программного комплекса «PlanetaMultiSat», в программной среде которого проводится полный цикл построения ледовых карт по спутниковым данным, в том числе в международном векторном формате Sigrid-3.

Усовершенствованные технологии построения ледовых карт внедрены в оперативную практику НИЦ «Планета». Ежегодно по данным технологиям выпускается более 20 карт-схем ледовой обстановки Каспийского моря и столько же карт границ распространения припая и плавучего льда.

Внедрение усовершенствованной технологии картирования ледовой обстановки в ФГБУ «Северное УГМС» Росгидромета.

Ледовые карты Каспийского моря размещаются в Мировом центре данных по морскому льду, наряду с ледовой продукцией различных национальных ледовых служб и ведущих спутниковых центров мира.

Карты ледовой обстановки Каспийского моря применяются в качестве исходной информации для оперативной прогностической модели Каспийского моря в Лаборатории морских прикладных исследований

«Гидрометцентра России», что позволяет использовать модель в ледовый период.

Долговременные ряды ледовой продукции по Каспийскому морю, выпускаемой в НИЦ «Планета», размещаются на русскоязычном (СЕАКЦ) и англоязычном (SEAKC) сайтах Северо-Евразийского климатического центра и используются в качестве индикаторов изменения климата.

Результаты работы использовались при реализации (в кооперации с ФГБУ «ААНИИ», ФГБУ «Гидрометцентр России», ФГБУ «ГОИН им. Н.Н. Зубова») по заказу нефтяной компании «Лукойл» масштабного проекта по исследованию гидрометеорологических и ледовых условий в районе обустройства нефтегазового месторождения им. В. Филановского на шельфе Каспийского моря.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методики обработки спутниковых данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов новых космических аппаратов, в том числе высокого пространственного разрешения (включая радиолокационные).

2. Усовершенствованная технология оперативного построения на основе спутниковых данных ледовых карт в растровом и международном векторном формате Sigrid-3.

3. Результаты совместного анализа многолетних рядов ледовых карт Каспийского моря, построенных по спутниковым данным, и синоптических материалов, как индикаторов изменения климата.

4. Результаты использования разработанных методик и технологий для оперативного картирования ледовой обстановки, мониторинга опасных ледовых образований и изучения долговременных характеристик ледяного покрова Каспийского моря.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов подтверждается результатами апробации созданных технологий на реальных данных, сравнением с результатами, полученными в других российских и зарубежных ледовых центрах, а также с данными наземных наблюдений, результатами массовой обработки спутниковой информации в оперативном режиме, стабильным спросом потребителей на выходную информационную продукцию, созданную с помощью разработанных методик и технологий.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на ряде совещаний, семинаров, международных и российских конференций, в том числе: конференции молодых специалистов, посвящённой 50-летию НПО «Тайфун» (Обнинск, ноябрь, 2010 г.); Всероссийской конференции с международным участием «Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата», (Архангельск, сентябрь, 2014 г.);

Международной научно-практической конференции «Обеспечение гидрометеорологической и экологической безопасности морской деятельности» (Астрахань, октябрь, 2015 г.); 8-й международной конференции пользователей данных метеорологических и других спутников наблюдения Земли среди стран Азиатского региона и Океании AOMSUC-8 (Владивосток, октябрь, 2017 г.); II Всероссийской конференции молодых ученых «Комплексные Исследования Мирового Океана» (Москва, апрель, 2017 г.); Международной конференции «Трансграничное сотрудничество России и Казахстана: формирование единого геоинформационного обеспечения системы рационального природопользования». ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ 2018 XIV Международная выставка и научный конгресс «Электронное геопространство на службе общества» (Новосибирск, апрель, 2018 г.); XII-XVIII Всероссийских открытых ежегодных конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, ноябрь, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 гг.); 8-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» (Москва, 2020 г.); заседании Совета РАН по космосу (Москва, апрель, 2022 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 5 - в рецензируемых научных изданиях, 3 из которых, в рекомендованном действующим перечне ВАК и индексируемых Scopus и Web of Science, 14 публикаций - в материалах международных и всероссийских научно-практических конференций. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Постановка рассматриваемых в работе задач и основные научные и практические результаты принадлежат лично автору. Из работ, в которых он участвовал в качестве соавтора, в диссертацию вошли только те результаты, в получении которых автор принимал непосредственное творческое участие на всех этапах работы.

При создании технологий обработки спутниковой информации и мониторинге опасных ледовых образований учитывались достижения и опыт специалистов ФГБУ «АНИИ», ФГБУ «Гидрометцентр России», ФГБУ «ГОИН им Н.Н. Зубова», ФГБОУ ВО «РГРТУ им. В.Ф. Уткина».

Внедрение. При выполнении настоящей работы было подготовлено Методическое пособие по созданию карт морского ледяного покрова на основе спутниковых данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat» (в соавторстве). Пособие одобрено ЦМКП Росгидромета и рекомендовано к

использованию в практике работы учреждений и НИУ Росгидромета (Приказ № 140-08930/20и от 23 ноября 2020 г.).

Осуществлено внедрение усовершенствованной технологии картирования ледовой обстановки в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat» в ФГБУ «Северное УГМС» Росгидромета.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения, списка литературы из 127 наименований и 3 приложений. Общий объем работы составляет 150 страниц, включая 36 рисунков и 12 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю, д.г.н., профессору А.А. Васильеву за всестороннюю помощь при работе над диссертацией. Автор благодарен коллективу ФГБУ «НИЦ «Планета» за оказанную поддержку, многолетнюю совместную работу и ценные советы, в особенности д.ф.-м.н., профессору В.В. Асмусу, к.ф.-м.н. В.А. Кровотынцеву, И.С. Трениной, Н.П. Ивановой, О.Н. Григорьевой.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи, аргументированы научная новизна, практическая значимость, а также приведены положения, выносимые на защиту, и структура работы.

Первая глава посвящена обзору и анализу общих региональных характеристик, особенностей гидрометеорологических и ледовых условий Каспийского моря, спутниковых данных, используемых для мониторинга ледяного покрова.

В разделе 1.1. приводится описание физико-географической характеристики Каспийского моря, согласно которой, совместно с морфологическими особенностями дна, принято условно разделять море на три части – Северный, Средний и Южный Каспий. Каждая из частей моря имеет свои особенности гидрометеорологических условий. С учетом того, что ледяной покров ежегодно образуется только в Северном Каспии более пристальное внимание уделено именно этой части моря.

Раздел 1.2. посвящен обзору ледовых условий Каспийского моря, которые характеризуются сложностью и изменчивостью в течение холодного периода. В северной мелководной части Каспийского моря устойчивый ледяной покров образуется каждый год, в средней части – в суровые зимы. В Южном Каспии лед образуется редко и только в самые суровые зимы, так например, в январе 2008 года дрейфующий лед отмечался в районе Ленкорани, заливах Туркменбаши и Туркменский.

Важной отличительной особенностью ледового режима Каспийского моря является то, что под совместным влиянием гидрометеорологических и

динамических факторов создаются условия для торошения, наслоения, подсовов льда, образования стамух, навалов льда на берег и острова, взаимодействия льда с донным грунтом. Это приводит к существенному увеличению «мощности» ледяного покрова и представляет наибольшую опасность для безопасности мореплавания и других видов морской деятельности.

В разделе 1.3. проанализировано современное состояние космических систем наблюдения Земли, предназначенных для мониторинга различных характеристик морского ледяного покрова. Рассмотрены преимущества и недостатки спутниковых данных видимого, инфракрасного и микроволнового диапазонов, получаемых с отечественных и зарубежных космических аппаратов.

Вторая глава посвящена развитию методов и технологий мониторинга морского ледяного покрова.

В разделе 2.1. приведен анализ методического обеспечения картографирования параметров морского льда и построения ледовых карт, которые осуществляются специалистами гидрометеорологами на основе ряда методических документов, большинство из которых было выпущено в 70-80 годы прошлого столетия. В основу этих документов положены методы визуального (интерактивного) дешифрирования различных характеристик морского льда на спутниковых изображениях. Следует отметить, что в настоящее время основные положения методов визуального дешифрирования ледовых характеристик по спутниковым данным не изменились, и они по-прежнему используются в оперативной практике национальных ледовых служб и ведущих спутниковых центров мира.

В настоящее время значительно увеличился объем спутниковых данных, которые применяются для космического мониторинга ледовой обстановки. На сегодняшний день используются данные низкого, среднего и высокого пространственного разрешения с российских (серий Метеор-М, Электро-Л, Канопус-В, Арктика-М) и зарубежных (серий Metop, EOS (Terra/Aqua), Landsat-8,-9, Sentinel-1,-2, Suomi NPP) космических аппаратов.

В связи с этим, при мониторинге ледовой обстановки появилась возможность использовать больший объем данных и улучшить его качество. Например, получение разновременных спутниковых изображений ледовой обстановки одной и той же территории в течении суток, в условиях перемещающейся облачности позволяет с помощью комплексирования информации с большого количества космических аппаратов картографировать параметры ледяного покрова на участках свободных от облачного покрова.

Среди новых российских разработок бортовой аппаратуры следует особо отметить сканирующий инфракрасный радиометр среднего пространственного разрешения МСУ-ИК-СРМ, установленный на борту космического аппарата «Канопус-В-ИК». Прибор функционирует в диапазоне длин волн 8,4-9,4 мкм с пространственным разрешением 200 м и с полосой обзора 2000 км. Данные ИК-радиометра МСУ-ИК-СРМ используются для детализированного мониторинга ледовой обстановки, что особенно важно для построения ледовых карт в бухтах, заливах, проливах и в других непротяженных акваториях.

Наиболее эффективными для мониторинга морского ледяного покрова являются спутниковые радиолокационные методы. В отличие от информации видимого и инфракрасного диапазонов, радиолокационные данные являются всепогодными (не зависят от освещенности и облачного покрова). На радиолокационных изображениях уверенно распознаются однолетние и многолетние льды за счет четкого радиолокационного контраста между этими типами льда, а также другие характеристики ледяного покрова (положение кромки дрейфующего, граница припайного льда, сплоченность, формы льда, торосы, стамухи, каналы, разводья, полыньи). Помимо преимуществ радиолокационные данные имеют и свои недостатки, например, схожие значения коэффициента радиолокационного обратного рассеяния между различными типами льда, существенно отличающимися по толщине (нилас и тонкий однолетний лед), гладким льдом и спокойной морской поверхностью, а также сглаживание контрастов возрастных градаций морского льда в период таяния и невозможность определения границы «лед-вода» при наличии ветрового волнения в прикромочной зоне.

В связи с вышеизложенным, появилась необходимость подготовки современных принципов интерактивного дешифрирования ледовых объектов с использованием комплексирования спутниковых данных различных спектральных диапазонов и разного пространственного разрешения.

В разделе 2.2. представлены рекомендации по визуальному дешифрированию ледовых объектов и параметров морского льда на спутниковых изображениях, разработанные автором данной диссертационной работы в соавторстве с ледовыми специалистами НИЦ «Планета», на основе анализа спутниковых данных с новых космических аппаратов, новой бортовой аппаратуры, в том числе высокого пространственного разрешения, а также опыте применения этой информации для картографирования характеристик морского ледяного покрова.

Визуальное дешифрирование ледовых объектов на спутниковых изображениях – процесс, включающий в себя определение качественных и

некоторых количественных характеристик этих объектов, выявление взаимосвязи с внешними факторами, воздействующими на них, а также представление результатов дешифрирования в графическом виде. При дешифрировании спутниковых изображений используются прямые (тон, структура, тень, размер, форма) и косвенные (местоположение и взаимная связь ледовых объектов, следы воздействия объекта на его окружение) дешифровочные признаки.

Установлено, что для улучшения качества спутникового изображения (повышение контрастности, фильтрация, синтез каналов др.) необходимо проводить яркостные преобразования. Например, отделение облачности ото льда является важнейшим звеном визуального дешифрирования, позволяющее избежать грубых ошибок при определении ледовых характеристик. На оптических изображениях видимого диапазона трудно отделить облачность ото льда, так как эти объекты имеют высокую спектральную яркость. Было определено опытным путем, что повышение степени делимости облачности и ледяного покрова можно добиться комбинированием различных спектральных каналов при составлении цветного изображения. Для этого рекомендуется использовать комбинацию каналов видимой и инфракрасной областей спектра так как спектральная яркость ледовых объектов в ближней и средней инфракрасных зонах спектра меньше яркости облачных образований.

Достоверность дешифровочных признаков ледовых характеристик зависит от количества сопоставлений исходных спутниковых данных в различных диапазонах с разным пространственным разрешением. Чем больше количество сопоставлений, тем выше достоверность интерпретации спутниковой информации. Например, на основе комплексного анализа данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов дешифрирование кромки дрейфующего льда, как правило, не вызывает затруднений. Однако, когда морской лед на границе сильно разрежен, определение кромки может быть проблематично. На оптических и инфракрасных изображениях кромка дрейфующего льда уверенно различается при безоблачной ситуации, а по радиолокационным изображениям на фоне взволнованной поверхности она частично неразличима. В практике интерактивного дешифрирования не редки случаи, когда по данным микроволновых радиометров происходит занижение площади плавучих льдов т.к. кромка льда отображается с существенными отклонениями по сравнению с более точными данными радиолокаторов. Особенно это проявляется в случаях, когда наблюдаемый участок в течение длительного времени подвергался влиянию сильного ветра.

Современные спутниковые данные высокого пространственного разрешения приближены к информации, получаемой при ледовой

авиаразведке и существенно восполняют опыт аэровизуального восприятия ледовой обстановки при картографировании характеристик морского ледяного покрова. Кроме того, позволяют отслеживать опасные ледовые явления (в том числе торосы, гряды торосов, стамухи, мелкие айсберги), которые нельзя было определять по спутниковым данным малого пространственного разрешения. Пример совместного использования спутниковых данных высокого разрешения КА Канопус-В/МСС, ПСС (разрешение 2,1 м) с данными КА Sentinel-2/MSI, (разрешение 10 м) и данными среднего разрешения КА AQUA/MODIS (разрешение 250 м) приведен на рис. 1.

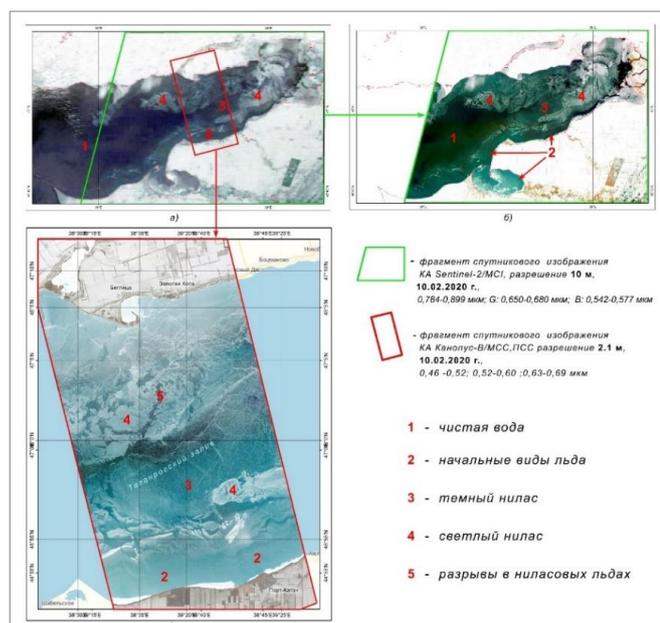


Рис. 1. Изображение начальных видов льда, темного и светлого ниласа на спутниковых изображениях видимого диапазона среднего и высокого разрешений. Таганрогский залив Азовского моря. КА AQUA/MODIS (0.620-0.670, 0.545-0.565, 0.459-0.479 мкм), разрешение 250 м (а), КА Sentinel-2/MSI, (0.784-0.899, 0.650-0.680, 0.542-0.577 мкм), разрешение 10 м (б) и КА Канопус-В/МСС, ПСС, (0.46-0.52, 0.52-0.60, 0.63-0.69 мкм), разрешением 2,1 м 10.02.2020 г.

Повышение качества интерактивного дешифрирования характеристик ледяного покрова может быть достигнуто посредством привлечения дополнительной информации, полученной на основе спутниковых и наземных данных. С целью определения положения кромки льда и перемещения однотипных ледовых зон, при построении ледовой карты, проводится анализ карт направления и скорости дрейфа льда. Использование информации поступающей с прибрежных гидрометеорологических станций существенно дополняет спутниковые наблюдения, а данные о толщине припайного льда по станциям являются опорными при картографировании возрастных характеристик, но всегда следует учитывать, что эти наблюдения фиксируют ледовую обстановку лишь в окрестностях станции в пределах видимости с берега.

Автором было подготовлено (в соавторстве) «Методическое пособие по созданию карт морского ледяного покрова на основе спутниковых данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat»». В него вошли уточненные положения и новые изменения, касающиеся методик построения ледовых карт. Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета пособие рекомендовано для использования в практике работы учреждений и НИУ Росгидромета (Решение №140-08930/20и от 23.11.2020 г.).

В разделе 2.3. представлены рекомендации по визуальному дешифрированию опасных ледяных образований – стамух на спутниковых изображениях морского ледяного покрова. Стамухи – торосистые ледяные образования, сидящие на мели. Сформулированы признаки выявления стамух, а также описаны наиболее эффективные спутниковые данные для их обнаружения.

В разделе 2.4. приводится описание усовершенствованной технологии оперативного картографирования характеристик морского льда, в разработке которой автор принимал непосредственное участие. Она представляет собой практическую реализацию методов дешифрирования ледяного покрова по спутниковым данным оптического, инфракрасного, микроволнового диапазонов в многофункциональном программном комплексе «PlanetaMultiSat». В программной среде этого комплекса проводится полный цикл построения ледовых карт.

Первая версия программного комплекса (ПК) построения ледовых карт по данным КА серии NOAA была разработана в НИЦ «Планета» в кооперации с Рязанским государственным радиотехническим университетом в начале двухтысячных годов. В дальнейшем ПК «PlanetaMultiSat» постоянно развивался на основе рекомендаций, поступающих от специалистов-дешифровщиков, осуществляющих построение ледовых карт Арктики, Антарктики и замерзающих морей России (включая Каспийское море). Последней крупной доработкой ПК, в которой принимал непосредственное участие автор данной диссертационной работы, было создание дополнительного модуля построения ледовых карт в векторном формате Sigrid-3 (формат для международного обмена), что позволило создать собственную отечественную технологию для подготовки и предоставления карт ледовой обстановки не только в графическом, но и в международном векторном формате.

В третье главе представлен анализ долговременных изменений ледового режима и климатических условий Каспийского моря, который был проведен

на основе анализа многолетних рядов ледовых карт, построенных автором на основе спутниковых данных и синоптических карт.

В разделе 3.1. проведено исследование изменчивости характеристик ледяного покрова Каспийского моря в период 2004-2021 гг. Выполнен анализ приземных синоптических карт за зимний период (ноябрь-март) 2004-2021 гг., предоставленных из архива Гидрометцентра России.

На основе многолетнего ряда карт ледовой обстановки Каспийского моря (ледовые карты за период 2010-2021 гг. построены лично автором), были получены ежедекадные значения ледовитости и составлены графики её сезонных изменений. Анализ этих графиков показал, что за 17-летний период спутниковых наблюдений часто (>40% случаев) ледообразование начиналось с отклонением от средних многолетних дат. В 2005 г. и 2009 г. процессы образования льда отмечались в 3-й декаде ноября, что незначительно отличается от среднемноголетних дат (2-я декада ноября), в ряде случаев - с запозданием (2005, 2010, 2012, 2013, 2015, 2017 гг.) – в 1-й и 2-й декадах декабря. В половине случаев за последнее десятилетие отмечен сдвиг сроков первого появления льда со второй декады ноября на начало декабря. При этом, по степени суровости зим только ледовый сезон 2015/16 гг. отнесен к мягкому типу зим, а все остальные сезоны (2010/11 гг., 2012/13 гг., 2013/14 гг., 2017/18 гг.) – к умеренному типу зим. Анализ влияния циркуляции атмосферы, проведенный на основе синоптических карт, позволил определить два типа синоптических ситуаций в результате которых ледообразование начинается в более поздние сроки. При первом типе, траектория перемещения атлантических циклонов проходила южнее, через север Средиземного моря и далее по центральным районам европейской территории России, из-за образовавшегося блокирующего антициклона с центром над Норвежским и Гренландским морями, не вызывая адвекции холода из северных широт. Во втором типе – из-за обширного антициклона, распространившим свое влияние на Европу и Казахстан, в результате влияния которого, траектория перемещения атлантических циклонов проходила севернее, и их влияние не сказывалось на погодных условиях Северного Каспия.

Типизация зим по степени суровости рассчитана И.О. Думанской и П.И. Бухарициным для п. Астрахань, расположенного на юго-западе Северного Каспия. Однако, ледовые условия северо-восточной части Каспийского моря более суровые и это вызвало необходимость определения иных критериев типизации зим по степени суровости для п. Атырау (Казахстан), расположенном на севере Северного Каспия. Были рассчитаны суммы градусодней мороза за последний 16-ти летний период (2005-2021 гг.) по данным наблюдений на ГМС Астрахань и Атырау, а также подсчитано

количество дней с циклональным и антициклональным типом погодных условий на основе анализа приземных синоптических карт (табл. 1).

Таблица 1.

Сумма градусодней мороза за последние 16 лет в п. Астрахань, п. Атырау (Казахстан) Северного Каспия и типизация зим по степени суровости (Тютнев Я.А., с дополнениями Валлера Ф.И. и Бухарицина П.И.; Думанская И.О.)

Ледовый сезон	Сумма градусодней мороза, °С		Тип зимы	Количество дней с циклональным типом погодных условий	Количество дней с антициклональным типом погодных условий
	ГМС Атырау (Казахстан)	ГМС Астрахань			
2005/2006	-728	-485	У	64	87
2006/2007	-301	-164	М	95	57
2007/2008	-891	-520	У	50	102
2008/2009	-585	-409	У	47	104
2009/2010	-641	-443	У	64	87
2010/2011	-674	-359	М(У)*	69	81
2011/2012	-1009	-713	С	67	84
2012/2013	-541	-274	М(У)*	54	97
2013/2014	-571	-323	М(У)*	72	79
2014/2015	-613	-332	М(У)*	39	112
2015/2016	-218	-154	М	99	53
2016/2017	-593	-421	У	70	81
2017/2018	-629	-307	М(У)*	49	103
2018/2019	-396	-175	М	61	90
2019/2020	-194	-111	М	56	95
2020/2021	-646	-386	М(У)*	52	99

(М-мягкая зима, У- умеренная зима, С- суровая зима)

*по классификации Думанской И.О., в случаях несовпадения с классификацией Тютнева Я.А. и др.

Исходя из полученных значений суммы градусодней мороза в п. Атырау и сравнению их со значениями в п. Астрахань (на основе критериев предложенных И.О. Думанской), были определены интервалы температур для умеренных и мягких типов зим для п. Атырау, с учётом рассчитанной средней разницы между суммами отрицательных температур на этих пунктах (41% - умеренные зимы, 43% - мягкие зимы). Для 16-ти летнего ряда наблюдений предлагаются следующие интервалы критериев суровости зим по суммам градусодней мороза для пункта Атырау:

- Менее 379 °С – мягкая зима;
- 379-902 °С – умеренная зима;
- Более 902 °С – суровая зима.

Однако, это требует дополнительного исследования, вызванного отличием ледовых условий юго-западной и северо-восточной частей Северного Каспия, длительностью ряда наблюдений и изменяющимся климатом.

Важным параметром, характеризующим ледовый режим моря, является ледовитость – площадь акватории моря, занятая льдом различной

сплоченности. Прежде всего, она зависит от метеорологических условий складывающихся в период образования, развития и разрушения ледяного покрова. В связи с меняющимися метеорологическими условиями от года к году, то и, естественно, происходят изменения в ледовом режиме.

Исследование сезонных и межгодовых изменений ледовитости Каспийского моря в период 2004-2021 гг. показало значительную изменчивость ледовитости, как в течение холодного периода, так и от года к году. Отмечено, что в период 2004-2010 гг. ледовитость достигала максимальных значений в 1-й и 2-й декадах января. В последующие годы максимум ледовитости отодвинулся на первые две декады февраля, что связано с увеличением количества дней с циклональным характером циркуляции атмосферы в январе. С 2016 г. прослеживается уменьшение влияния на рассматриваемый регион отрога Сибирского антициклона, что сказалось на развитии ледяного покрова Каспийского моря и вызвало уменьшение ледовитости. Однако, сроки очищения ото льда практически не изменились и приходились в основном на 3-ю декаду марта, за исключением зим 2009/2010 гг., 2010/2011 гг., 2011/2012 гг., 2017/2018 гг., когда был сформирован очень мощный по своим параметрам (возрастные характеристики, сплоченность) ледяной покров.

Учитывая более позднее ледообразование и сдвиг максимальных значений ледовитости с января на февраль, можно предположить о более интенсивных процессах таяния льда, протекающих в весенний период в последние годы.

Площади дрейфующего и неподвижного (припая) льда характеризуют изменения метеорологических и ледовых условий, протекающих в течение ледового сезона. Проведенный анализ построенных диаграмм распределения площади, занятой припайным и дрейфующим льдом Северного Каспия, по декадам ледового периода с 2004 по 2021 гг. (рис. 2) показал ее значительную межгодовую изменчивость. Так, только два ледовых периода (2004-2005 и 2017-2018 гг.) по показателям декадного распределения льда близки к средним значениям. К наиболее аномальным, с точки зрения декадного распределения площади дрейфующего и припайного льда относятся ледовые периоды 2006-2007 гг., 2015-2016 гг. и 2019-2020 гг. в части отклонения от среднемноголетних значений площади в меньшую сторону и 2011-2012 гг. – в большую сторону. После суровой зимы 2011-2012 гг. наибольшие площади дрейфующего льда, в сравнении со среднемноголетними значениями, стали отмечаться в первые месяцы после начала ледообразования (ноябрь, декабрь) в то время как, в предшествующий период они наблюдались в январе-марте.

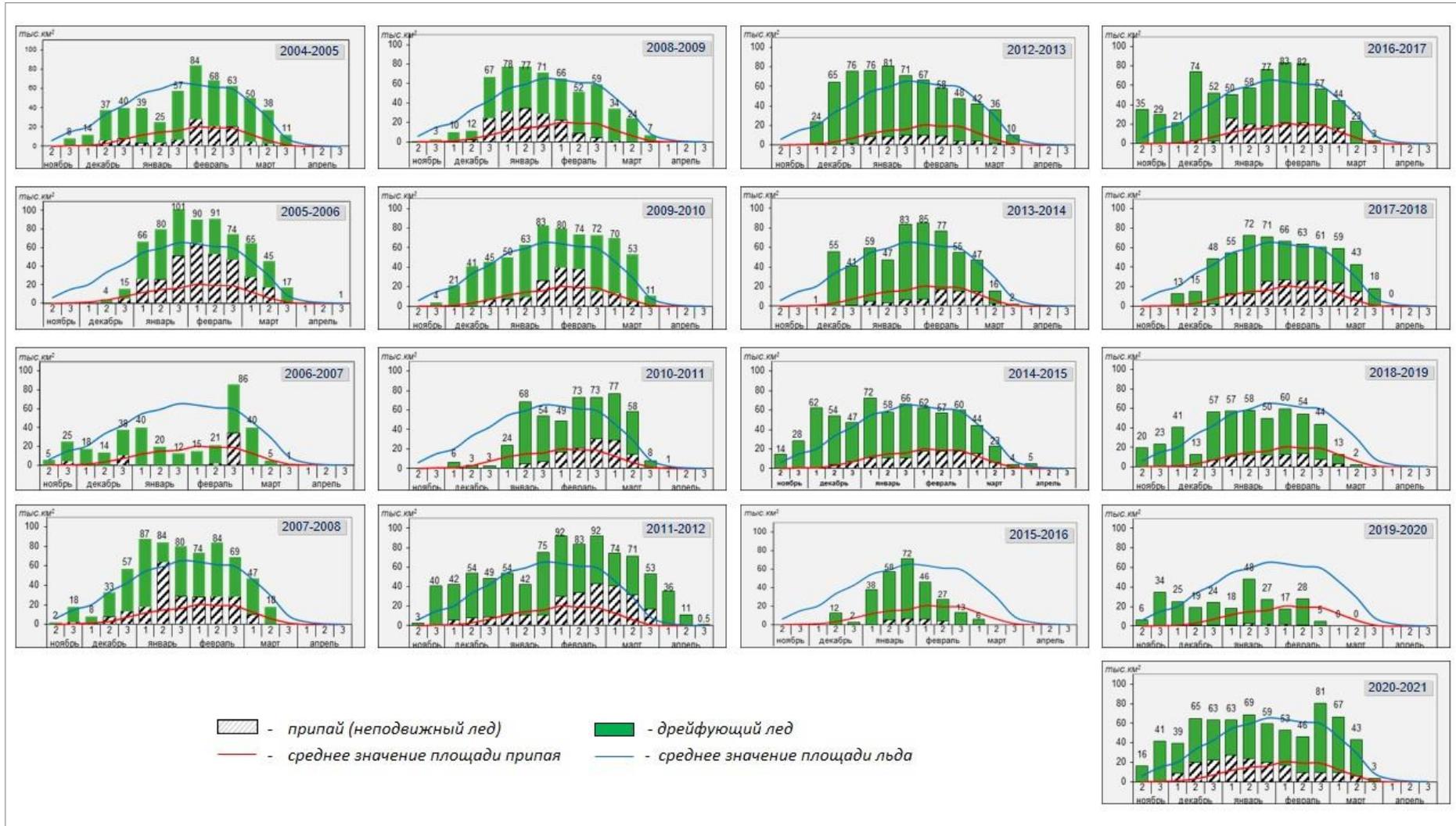


Рис. 2. Диаграммы распределения площади, занятой неподвижным (припаем) и дрейфующим льдом в Северном Каспии, по декадам ледового периода с 2004 по 2021 гг.

Проведенный анализ продолжительности ледовых периодов (рис. 2), показал, что средняя продолжительность ледового периода за последние 17 лет составила 12 декад. Самый короткий период – 9 декад (2015-2016 гг.). Самым продолжительным был холодный период 2011-2012 гг. (17 декад), который относится к одной единственной суровой зиме за последние 17 лет.

Наибольшие значения общей площади дрейфующего и припайного льда за исследуемый период достигли зимой 2005-2006 гг. и превысили ~ 100 тыс. кв. км. В этот же период зафиксировано и максимальное распространение припайного льда (~65 тыс. кв. км). Наименьшая площадь ледяного покрова Каспийского моря была отмечена в ледовом периоде 2019-2020 гг. и составила ~45.5 тыс. кв. км, а припай занимал площадь всего лишь ~2.4 тыс. кв. км.

В рамках данного исследования автором были обобщены основные параметры, характеризующие изменение метеорологических и ледовых условий Каспийского моря за период 2005-2021 гг. Рассчитана общая ледовитость и площадь припая (%), полученные по результатам картирования ледовой обстановки Каспийского моря на основе спутниковых данных и суммы градусодней мороза. Построены розы преобладающего направления ветра для каждого ледового периода. Отражена изменчивость общей ледовитости, площади припая и метеорологических условий в периоды образования, развития и разрушения ледяного покрова Северного Каспия (рис. 3). Анализ этих данных показал, что наблюдается значительная изменчивость суммы градусодней мороза в начальный период развития ледяного покрова (ноябрь-декабрь). В то же время автором отмечено уменьшение величин суммы градусодней мороза в январе-феврале, в период максимального развития ледяного покрова за последние 10 лет. Получены средние значения ледовитости северной части Каспийского моря в период начала ледообразования, его развития и разрушения. Средняя ледовитость в ноябре-декабре составила 51%, январе – феврале – 86%, марте – 37%. Отмечено сокращение площади неподвижного льда. До зимнего периода 2011-2012 гг. площадь припая имела большие значения, по сравнению с тем, что наблюдается в настоящее время. Средняя площадь (в %) Северного Каспия, занимаемая припаем до 2011-2012 гг., включительно, в ноябре – декабре составляла 22%, январе – феврале – 50%, марте – 14%, а в последующий период – 6%, 17%, 6% соответственно. Все это свидетельствует о том, что частая смена синоптических условий препятствует становлению устойчивого припая, он чаще подвергается взломам, в результате

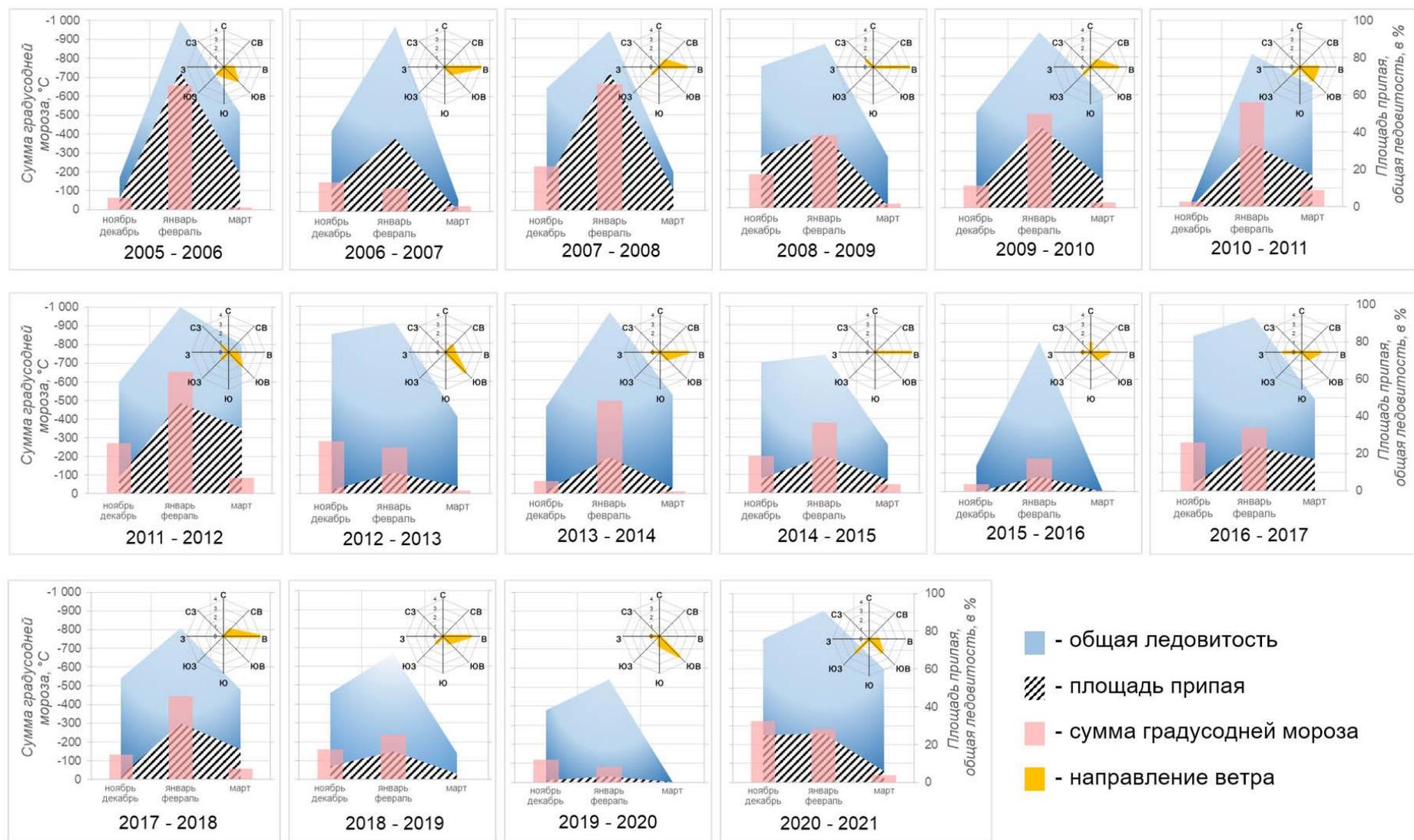


Рис. 3. Общая ледовитость и площадь припая (%) Северного Каспия, а также сумма градусодней мороза и роза преобладающего направления ветра в пункте Пешной за период 2005-2021 гг.

воздействия метеорологических параметров, а соответственно и занимает меньшую площадь.

Из проведенного исследования также видно, что с уменьшением площади припая и накопленной суммы градусодней мороза не наблюдается значительного сокращения ледовитости Каспийского моря, что в свою очередь говорит об изменении возрастного состава дрейфующего льда и подтверждается оценкой возраста морского льда карт ледовой обстановки Северного Каспия, составленных методами интерактивного дешифрирования спутниковых данных.

Раздел 3.2. посвящен выявлению стамух при дешифрировании спутниковых изображений морского ледяного покрова Каспийского моря.

В последние годы на Каспийском море всё меньшую площадь занимает припайный лед, и увеличивается площадь дрейфующего льда, который, как известно подвержен различного рода деформациям (торошению, наслоению и т.д.). Все это приводит к увеличению акватории охваченной процессами торошения, а соответственно увеличения количества и размеров стамух, торосов, гряд торосов.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты и выводы диссертационной работы:

1. Усовершенствованы методики построения ледовых карт Каспийского моря на опыте применения данных современных космических аппаратов и новой бортовой аппаратуры, в том числе высокого пространственного разрешения. Показано преимущество использования высокодетальных спутниковых изображений для картографирования ряда характеристик ледяного покрова.
2. Подготовлено методическое пособие по созданию карт морского ледяного покрова на основе спутниковых данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов. Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета пособие рекомендовано для использования в практике работы учреждений и НИУ Росгидромета (Решение №140-08930/20и от 23.11.2020 г.).
3. Разработана и внедрена в практику технология обработки разнородных (по спектральным диапазонам и пространственному разрешению) и разновременных спутниковых данных для оперативного картирования в многофункциональной программной среде «PlanetaMultiSat».
4. На основе ледовых карт Каспийского моря, построенных автором за период 2004-2021 гг. определена повторяемость еженедельных значений площади, занятой неподвижным (припаем) и дрейфующим льдом.

5. Исследованы сезонные и межгодовые изменения ледовитости Каспийского моря за период 2004-2021 гг. Выявлена значительная изменчивость ледовитости, как в течение холодного периода, так и от года к году. Отмечено, что в период 2004-2010 гг. ледовитость достигала максимальных значений в первые две декады января. В последующие годы максимум ледовитости все чаще стал приходиться на первые две декады февраля, что связано с увеличением количества дней с циклональным характером циркуляции атмосферы в январе. С 2016 г. прослеживается уменьшение влияния на рассматриваемый регион отрога Сибирского антициклона, что сказывается на развитии ледяного покрова Каспийского моря и вызвано изменяющимися климатическими условиями.
6. Получена пространственно-временная изменчивость характеристик припая и дрейфующего льда при разных синоптических ситуациях, как индикаторов климатических изменений. Отмечено существенное сокращение площади припайного льда в последнее десятилетие.
7. Выполнен анализ синоптических процессов, при которых происходило более позднее начало ледообразования в северной части Каспийского моря. В период 2009-2018 гг. (за исключением ледовых сезонов 2011-2012, 2014-2015, 2016-2017 гг.) ледообразование начиналось в 1-й, 2-й декадах декабря, что значительно позже среднемноголетних значений. Процессы таяния ледяного покрова в марте стали протекать значительно быстрее, что связано с увеличением влияния антициклонального характера погоды и более интенсивного прогрева подстилающей поверхности.
8. Установлено, что в последние годы фиксируется большее количество стамух, а также увеличиваются их размеры и акватория распространения.

В **приложении** представлены копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и акт внедрения усовершенствованной технологии картирования ледовой обстановки в ФГБУ «Северное УГМС» Росгидромета.

Список работ, опубликованный автором по теме диссертации
Публикации в журналах из перечня ВАК и индексируемых Scopus и
Web of Science:

1. Максимов А.А. Использование данных двухчастотного дождевого радиолокатора для мониторинга формирования и разрушения ледяного покрова на озере Байкал в осенне-зимний период 2015/2016 г. / Караев В.Ю., Панфилова М.А., Мешков Е.М., Баландина Г.Н., Андреева З.В., Максимов А.А. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – №1. – С. 206-220.
2. Максимов А.А. Космический мониторинг ледяного покрова и состояния водной среды Каспийского моря / Асмус В.В., Василенко Е.В., Затыгалова В.В., Иванова Н.П., Кровотынцев В.А., Максимов А.А., Тренина И.С. // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 10. – С. 81-95.
3. Максимов А.А. Использование космических средств и технологий для решения гидрометеорологических задач в Арктике / Асмус В.В., Волгутов Р.В., Дерюгина В.В., Кровотынцев В.А., Максимов А.А., Милехин О.Е., Тренина И.С. // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 4. – С. 54-69.

Другие публикации:

4. Максимов А.А. Особенности картирования ледовой обстановки в акваториях арктических морей по спутниковой информации, включая данные ИСЗ «Метеор-М» №1 / Волгутов Р.В., Максимов А.А., Маслова Н.А. // Сборник материалов конференции молодых специалистов, посвященной 50-летию «НПО «Тайфун», г. Обнинск. – 2010. – С. 35-36.
5. Максимов А.А. Информационная продукция спутникового мониторинга полярных акваторий Земли и замерзающих морей России / Кровотынцев В.А., Тренина И.С., Волгутов Р.В., Максимов А.А., Маслова Н.А. // Метеоспектр. – №2. – 2014. – С. 89-98.
6. Максимов А.А. Особенности построения карт ледовой обстановки в векторном формате в многофункциональной среде “PlanetaMultiSat” // Состояние арктических морей и территорий в условиях изменения климата: сб. тезисов Всероссийской конференции с международным участием. г. Архангельск: ИД САФУ. – 2014. – С. 69-70.
7. Максимов А.А. Использование спутниковой информации для мониторинга ледовой обстановки и опасных ледовых явлений / Максимов А.А., Тренина И.С. // Сборник докладов школы-семинара «Современные методы дистанционных исследований и прогноза параметров среды в Арктике» г. Таруса. – 2015. – С. 24-25.

8. Максимов А.А. Особенности обнаружения и мониторинга стамух в Каспийском море по спутниковой информации высокого и среднего разрешения // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Обеспечение гидрометеорологической и экологической безопасности морской деятельности», г. Астрахань. – 2015. – С. 127-129.
9. Максимов А.А. Сравнение полей разрежения и сжатия морского льда по измерениям спутниковыми радиометрами MODIS и МТВЗА-ГЯ / Максимов А.А., Бухаров М.В., Кровотынцев В.А., Тренина И.С. // Тезисы докладов Тринадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» г. Москва, ИКИ РАН. – 2015. – С. 286.
10. Максимов А.А. Веб-картографический сервис комплексированной спутниковой информационной продукции о гидрометеорологической и ледовой обстановке в замерзающих морях России / Затыгалова В.В., Василенко Е.В., Волгутов В.В., Кровотынцев В.А., Максимов А.А., Тренина И.С. // Тезисы докладов Четырнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», г. Москва, ИКИ РАН. – 2016. С. 78.
11. Максимов А.А. Мониторинг ледяного покрова Каспийского моря по спутниковой информации / Максимов А.А., Тренина И.С. // Тезисы докладов II Всероссийской конференции молодых ученых «Комплексные Исследования Мирового Океана» (КИМО-2017), ИО РАН, г. Москва. – 2017. – С. 162-163.
12. Maksimov A.A. Application of Dual-Frequency Precipitation Radar for Ice Cover Observation by the Example of the Lake Baikal / Karaev V.Yu., Panfilova M.A., Meshkov E.M., Balandina G.N., Andreeva Z.V., Maksimov A.A. // Тезисы докладов The Eighth Asia/Oceania Meteorological Satellite Users` Conference (AOMSUC-8), Россия, г. Владивосток. – 2017. [Электронный ресурс] URL:http://aomsuc8.ntsomz.ru/wp-content/uploads/2017/08/P-45_Karaev.pdf.
13. Maksimov A.A. Satellite application for sea ice cover monitoring of the Far Eastern region / Krovotyntsev V.A., Maksimov A.A., Trenina I.S., Volgutov R.V., Zatyagalova V.V. // Тезисы докладов The Eighth Asia/Oceania Meteorological Satellite Users` Conference (AOMSUC-8), г. Владивосток. – 2017. [Электронный ресурс] URL:http://aomsuc8.ntsomz.ru/wp-content/uploads/2017/08/P-35_Zatyagalova.pdf
14. Максимов А.А. Применение геоинформационных технологий для решения гидрологических и ледовых задач на основе спутниковых и наземных данных / Асмус В.В., Волгутов Р.В., Дерюгина В.В.,

- Кровотынцев В.А., Максимов А.А., Милехин О.Е., Тренина И.С. // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем», Татарский нефтегазохимический форум, г. Казань. – 2019. – С. 61-67.
15. Максимов А.А. Применение космической подсистемы наблюдений Росгидромета для оперативного гидрометеорологического обеспечения и мониторинга окружающей среды / Асмус В.В., Калашников А.В., Крамарева Л.С., Максимов А.А., Милехин О.Е. // Тезисы докладов Семнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН. – 2019. – С. 1.
16. Максимов А.А. Обзор ледового и синоптического сезона Охотского моря в 2018-2019 гг. / Волгутов Р.В., Максимов А.А. // Тезисы докладов Семнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН. – 2019. – С. 271.
17. Максимов А.А. Спутниковый мониторинг опасных ледовых явлений по данным высокого пространственного разрешения // Сборник тезисов докладов Восьмой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли», Москва, АО «Корпорация ВНИИЭМ». – 2020. – С. 56-57.
18. Максимов А.А. Применение спутниковых данных высокого пространственного разрешения для обнаружения и мониторинга опасных ледовых явлений / Максимов А.А., Тренина И.С. // Тезисы докладов Восемнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН. – 2020. – С. 226.
19. Максимов А.А. Методическое пособие по созданию карт морского ледяного покрова на основе спутниковых данных оптического, инфракрасного и микроволнового диапазонов в многофункциональной программной среде “PlanetaMultiSat” / Волгутов Р.В., Кровотынцев В.А., Максимов А.А., Тренина И.С. // Информационный сборник № 48. Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Под ред. канд. геогр. наук. А.А. Алексеевой. – М., Гидрометцентр России. – 2021. – С. 89-95.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

20. Максимов А.А. Программа для скачивания данных морских береговых станций из базы данных ФГБУ «Гидрометцентр России» с последующей конвертацией элементов БД согласно коду КН-02 SEA / Василенко Е.В., Волгутов Р.В., Максимов А.А. // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019618940 от 08 июля 2019 г.
21. Максимов А.А. Программа автоматического формирования крупномасштабной береговой линии российских морей при создании ледовых карт в векторном формате Sigrid-3 / Дерюгина В.В., Волгутов Р.В., Максимов А.А. // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019662823 от 03 октября 2019 г.