

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВЛАДИВОСТОКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА
КАФЕДРА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ОТЧЁТ ПО УЧЕБНОЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ПРАКТИКЕ
(Получение первых навыков НИР)

Студент
гр. БПО2-24-БГ1



В.Д. Аверин

Руководитель
канд. техн. наук



В.Н. Макарова

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВЛАДИВОСТОКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВВГУ»)

ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА
КАФЕДРА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ
на учебную научно-исследовательскую практику (получение первичных навыков НИР)

Студенту: гр. БПО2-24-БГ1

Аверину Владимиру Дмитриевичу

Место прохождения практики: кафедра естественных наук ФГБОУ ВО
«Владивостокский государственный университет»

Срок прохождения практики: с «6» июля 2026 г. по «25» июля 2026 г.

Задание 1. Определить цели и задачи практики (УК 1)

Задание 2. Изучить структуру научно-исследовательской работы, выделить объект и предмет, определить методы решения поставленных задач, в т.ч. современные информационные технологии (УК-1), ОПК-9).

Задание 3. Выполнить теоретическую и практическую часть работы в соответствии с целями и задачами практики (УК-1), ОПК-9).

Задание 4. Представить основные результаты работы в форме отчета по практике, придерживаясь следующей структуры:

Введение: определить цель и задачи практики, основные методы, необходимые для их достижения.

1 Обзор и список литератур отчета по практике

Сбор фактического и аналитического материала. Анализ литературных источников по выбранной проблеме:

2 Внедрение научно-исследовательской работы в учебную/внеклассную деятельность школьников (название главы формулируется самостоятельно)

Подготовить краткое изложение материала, согласно поставленным задачам по каждому пункту задания. По каждой главе сформулировать выводы. При написании работы использовать научный стиль изложения.

Заключение: сделать выводы о достижении поставленных целей и задач в ходе практики.

Список использованных источников (не менее 20 позиций): составить список литературы с использованием профессиональных баз данных и профессиональных Интернет-ресурсов. Оформить работу в соответствии со стандартами ВВГУ.

Руководитель практики:

доцент, канд. техн. наук


В.Н. Макарова

Задание получил, студент
гр. БПО2-24-БГ1


В.Д. Аверин

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ

«ВЛАДИВОСТОКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВВГУ»)

ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА
КАФЕДРА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН-ГРАФИК

учебная научно-исследовательская практика (получение первичных навыков НИР)
Студент Аверин Владимир Дмитриевич группы БПО2-24-БГ1

с «06» июля 2026 г. по «25» июля 2026 г.

Содержание выполняемых работ	Сроки исполнения	
	начало	окончание
Постановка целей и задач практики. Характеристика объекта, предмета и целей исследования	06.07.2026	07.07.2026
Подбор литературы и анализ литературных данных	07.07.2026	15.07.2026
Разработка педагогических решений в соответствии с целями и задачами практики	15.07.2026	17.07.2026
Формулировка выводов, написание заключения	17.07.2026	18.07.2026
Формирование отчета и оформление согласно стандартам, оформление отчетной документации, подготовка презентации.	18.07.2026	20.07.2026
Оформление и защита отчета	20.07.2026	25.07.2026

Студент-практикант

Аверин Владимир
Дмитриевич

Фамилия Имя Отчество
Макарова Вера Николаевна

Руководитель практики

Фамилия Имя Отчество

А. Д.

подпись

В. Н.

подпись

Содержание

Введение	3
1. Физико-географические условия и факторы формирования ледяного покрова.....	4
1.1 Физико-географическая характеристика Северного Ледовитого океана	4
1.2 Климатические и океанологические факторы динамики льда.....	7
1.3. Основные типы морских льдов и их характеристики	11
1.3.1. Возрастная (генетическая) классификация	11
1.3.2. Классификация по динамическому признаку: припай и дрейфующий лёд.....	13
2. Методы и средства анализа динамики морского льда	15
2.2 Судовые и авиационные наблюдения: история и современность.....	15
2.2 Спутниковые дистанционные методы	16
2.3. Математическое моделирование ледяного покрова	17
3. Внедрение результатов исследования в образовательный процесс школы.....	20
3.1. Педагогический потенциал темы и её место в школьном образовании	20
3.2. Интеграция научных знаний в урочную и внеурочную деятельность	20
Заключение.....	22
Список литературы.....	24

Введение

Северный Ледовитый океан является ключевым элементом климатической системы Земли, а его ледяной покров выполняет роль своеобразного «климатического щита», отражая солнечную радиацию и регулируя теплообмен между океаном и атмосферой. В последние десятилетия Арктика демонстрирует наиболее выраженные климатические изменения на планете, что выражается в устойчивом сокращении площади, толщины и возраста морского льда. Однако проблема заключается в том, что для корректной оценки современных трендов и построения надежных прогнозов недостаточно опираться лишь на спутниковые данные, доступные с конца 1970-х годов. Короткий временной ряд наблюдений создает иллюзию монотонного таяния, тогда как история Арктики знает периоды как значительного отступления, так и частичного восстановления ледяного покрова.

Целью данной работы является систематизировать современные научные данные о состоянии и морского ледяного покрова Арктики и разработать методологию их использования в системе общего образования для формирования климатической грамотности.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Выявить ключевые параметры, определяющие динамику льда (температура, альbedo, теплопроводность снега, приливные процессы), и оценить их вклад в наблюдаемые изменения.
2. Обобщить результаты модельных экспериментов по оценке продолжительности открытой воды в российской Арктике до конца XXI века.
3. Разработать комплекс учебных модулей для средней и старшей школы, основанных на реальных научных данных, включая работу с картами, графиками, историческими архивами и практическое моделирование.

В ходе практики применялись следующие методы: Метод обобщения и систематизации научной литературы, сравнительно-исторический метод, анализа данных, аналитико-синтетический метод

1. Физико-географические условия и факторы формирования ледяного покрова

1.1 Физико-географическая характеристика Северного Ледовитого океана

Северный Ледовитый океан (СЛО) представляет собой наименьший по площади и наиболее мелководный из океанов Земли, однако его роль в глобальной климатической системе трудно переоценить. Именно здесь формируется мощный ледяной покров, динамика которого определяет не только региональные, но и планетарные процессы тепло- и массообмена. Своеобразие ледового режима СЛО неразрывно связано с его физико-географическими условиями: конфигурацией береговой линии, строением дна, интенсивным материковым стоком и относительно изолированным характером водной толщи.

Географическое положение и границы. Акватория СЛО площадью около 14,75 млн км² почти симметрично окружает Северный полюс, располагаясь между Евразией и Северной Америкой. Его естественными рубежами служат: на западе — порог Нансена, отделяющий Гренландское море от собственно Арктического бассейна; на востоке — узкий (около 85 км) и мелководный (глубины менее 50 м) Берингов пролив, соединяющий его с Тихим океаном; на юге — материковое побережье и система проливов Канадского Арктического архипелага. Такая полузамкнутость имеет принципиальное значение: основной водообмен с Атлантическим океаном осуществляется через пролив Фрама (глубиной до 2600 м) и Баренцево море, тогда как поступление тихоокеанских вод лимитировано мелководностью Берингова пролива. Доминирующая роль атлантических вод в формировании теплового баланса океана напрямую сказывается на региональных особенностях ледового покрова.

Моря и проливы. Почти половину площади СЛО составляет обширная шельфовая зона, занятая окраинными морями. Вдоль берегов Евразии последовательно располагаются Баренцево, Карское, море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря, которые вместе образуют непрерывную цепь мелководных бассейнов, объединяемых понятием «евразийский шельф» [3]. У побережья Северной Америки лежат море Бофорта, море Линкольна и система проливов и заливов Канадского Арктического архипелага. Именно эти акватории служат главной ареной сезонного льдообразования и таяния, являясь, по образному выражению А. Ф. Трёшникова, «фабрикой арктического льда».

Система проливов обеспечивает обмен водными массами и ледовым материалом между различными частями океана. Ключевыми для динамики льда являются:

1. Пролив Фрама — главный канал выноса многолетнего пака в Гренландское море, где он впоследствии тает;
2. пролив Карские Ворота и пролив Вилькицкого, регулирующие связь Баренцева и Карского морей, что важно для трассы Северного морского пути;
3. проливы Дмитрия Лаптева, Санникова и Лонга — мелководные проходы между Новосибирскими островами и материком, через которые происходит сток распреснённых вод и вынос льда из моря Лаптевых в Восточно-Сибирское;
4. Берингов пролив, через который в летний период поступает относительно тёплая тихоокеанская вода, способствующая отступанию кромки льда в Чукотском море;
5. проливы Девисов, Барроу и Мак-Клур в Канадском архипелаге, играющие важную роль в транзите льда из центральной Арктики в море Баффина.

Рельеф дна. Батиметрия СЛО отличается резкой асимметрией и во многом предопределяет генеральную циркуляцию вод и дрейф льда. Основные орографические элементы ложа океана включают: хребет Ломоносова, срединно-океанический хребет Гаккеля, хребет Менделеева и поднятие Альфа

Котловины: Канадская (наиболее глубокая часть, до 3800 м), котловины Нансена (до 4000 м) и Амундсена, разделённые хребтом Гаккеля, а также котловина Подводников (между хребтами Ломоносова и Менделеева) и котловина Макарова (к востоку от хребта Ломоносова).

Характерной чертой рельефа является исключительное развитие шельфа, ширина которого в Евразийском секторе достигает 800–1200 км при средних глубинах всего 50–100 м. Столь обширное мелководье способствует быстрому выхолаживанию водной толщи зимой и обильному образованию льда, а также накоплению на дне огромных масс ископаемого льда и мёрзлых пород (субаквальная криолитозона). Континентальный склон крутой, особенно в районе моря Бофорта и к северу от архипелага Шпицберген, что создаёт условия для формирования интенсивных каскадных потоков плотных вод, участвующих в глубинной конвекции

ЛО получает около 4300 км³ пресной воды в год со стоком крупнейших рек, что составляет примерно 11 % глобального речного стока в Мировой океан [7]. Главные артерии — Обь, Енисей, Лена, Маккензи, Печора, Колыма, Хатанга, Индигирка — несут в океан не только огромные объёмы пресной воды, но и значительное количество материала, а также тепла в летний период. Сток распределён неравномерно: более 70 % приходится на сибирские реки, впадающие в Карское море и море Лаптевых, тогда как на Американо-Азиатский сектор — лишь около 10 % (главным образом река Маккензи).

Воздействие речного стока на ледовый режим многопланово и проявляется в следующих ключевых аспектах:

1. Формирование мощного распреснённого слоя и галоклина. Поступающие пресные воды создают на поверхности низкосолёный слой (солёность падает до 10–20 ‰), под которым залегает резкий пикноклин (галоклин), отделяющий его от более солёных и тёплых промежуточных атлантических вод. Эта стратификация действует как тепловой барьер, препятствуя поступлению глубинного тепла к поверхности и тем самым предохраняя ледяной покров от быстрого таяния снизу.
2. Ускорение ледообразования и образование припая. Низкая солёность повышает температуру замерзания воды (до $-1,5...-1,8$ °C вместо $-1,9$ °C для воды океанической солёности), что при одинаковых термических условиях приводит к более раннему появлению льда. Кроме того, распреснённая вода скапливается в прибрежной зоне и в устьевых взморьях, способствуя образованию обширных полей припая — неподвижного льда, примёрзшего к берегу или дну. Наиболее ярко это выражено в море Лаптевых, где ежегодно формируется «Великая Сибирская полынья» — заприпайная зона интенсивного ледообразования, служащая одним из главных источников дрейфующего льда в Арктическом бассейне [9].
3. Термическое воздействие в летний период. Летний речной сток, будучи существенно теплее морской воды, ускоряет сход припая и способствует вскрытию прибрежных акваторий на несколько недель раньше, чем это происходило бы исключительно под действием солнечной радиации. Тепловой сток крупных рек вызывает раннее очищение устьевых участков и формирует локальные зоны открытой воды, которые затем становятся очагами интенсивного поглощения солнечной энергии и дальнейшего разрушения ледяного покрова.

В рамках физико-географической характеристики необходимо отметить, что полярное положение океана определяет экстремальный радиационный режим: продолжительную полярную ночь с сильным выхолаживанием (зимой баланс длинноволновой радиации отрицателен, достигая -100 Вт/м²) и полярный день, когда приток солнечной радиации, несмотря на малую высоту солнца, велик за счёт большой продолжительности освещения. Значительная часть приходящей коротковолновой радиации отражается льдом и снегом (альбедо 0,6–0,9), однако на участках открытой воды поглощается почти полностью, что усиливает контрасты и создаёт петли положительной обратной связи в ледовой системе

Таким образом, физико-географические особенности Северного Ледовитого океана создают уникальный комплекс условий для существования и многолетней изменчивости

морского ледяного покрова. Обширный шельф, огромный объём речного стока, полузамкнутая циркуляция вод и наличие подводных хребтов, разграничивающих основные траектории дрейфа льда, — всё это в совокупности формирует ту сложную и динамичную среду, анализ которой является центральной задачей настоящей работы. Понимание описанных здесь стационарных географических закономерностей служит необходимой базой для последующего изучения сезонной и межгодовой динамики арктического льда.

1.2 Климатические и океанологические факторы динамики льда

Динамика морского льда в Северном Ледовитом океане не является автономным процессом; она представляет собой результат сложного, многоуровневого взаимодействия атмосферы и океана. Ледяной покров одновременно и формируется под воздействием климатических и гидрологических условий, и активно влияет на них, создавая систему прямых и обратных связей. Если физико-географические параметры (очертания берегов, рельеф дна) задают статичную арену, то именно атмосферная циркуляция и океаническая структура вод выступают в роли динамических драйверов, определяющих сезонный ритм, межгодовую изменчивость и долгосрочные тренды ледовых условий. В настоящем разделе последовательно рассматриваются ключевые климатические факторы (радиационный и тепловой баланс, поле ветра и барические центры) и океанологические механизмы (течения, адвекция тепла, вертикальная стратификация), формирующие режим дрейфа, нарастания и таяния льда.

Энергетической основой существования ледяного покрова служит радиационный бюджет поверхности океана. Специфика высоких широт проявляется в экстремальной сезонной асимметрии: в период полярной ночи (октябрь–март) коротковолновая солнечная радиация практически отсутствует, и поверхность теряет тепло за счёт эффективного длинноволнового излучения. В центральных районах Арктического бассейна зимний радиационный баланс стабильно отрицателен и может достигать значений порядка $-80 \dots -100 \text{ Вт/м}^2$ [1]. Именно этот дефицит компенсируется потоками тепла из океана, приводя к интенсивному ледообразованию. Толщина льда, в свою очередь, лимитирует дальнейшие потери тепла океаном в атмосферу, действуя как эффективный изолятор.

Летом, в условиях полярного дня, ситуация кардинально меняется. Приток суммарной солнечной радиации существенно возрастает, однако её судьба сильно зависит от состояния подстилающей поверхности. Здесь решающую роль играет альбедо — отражательная способность. Свежий снежно-ледяной покров обладает альбедо $0,80\text{--}0,90$,

годами, утолщаясь за счёт динамического нагромождения и термического нарастания, что исторически делало его резервуаром самого старого и толстого льда в СЛО.

В последние два десятилетия возросла роль Арктической дипольной аномалии – структуры с аномально высоким давлением над американским сектором Арктики и аномально низким – над евразийским. Такая конфигурация создает сильный градиент давления, порождая устойчивые ветры, направленные строго по оси Трансарктического течения, что является чрезвычайно эффективным механизмом выноса старого льда из Арктического бассейна и коррелирует с рекордными минимумами его площади

Таким образом, поле ветра не только задаёт генеральную схему дрейфа, но и через механизм аномалий циркуляции управляет главным «сбросом» льда из Арктики – его экспортом в более тёплые широты. Ускорение дрейфа льда, повсеместно фиксируемое спутниковыми данными, прямо связывается с изменениями в режиме крупномасштабной атмосферной динамики.

Ледяной покров находится в постоянном термодинамическом взаимодействии с подстилающей водной толщей. Структура поверхностных течений в СЛО, сформированная ветром и градиентами плотности, сама по себе обеспечивает перераспределение льда, но ещё более значима скрытая роль океана как источника или стока тепла. Генеральная схема циркуляции включает:

1. Трансарктическое течение, берущее начало в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, пересекающее приполюсный район и выходящее в пролив Фрама. Именно оно транспортирует основную массу льда, образовавшегося на евразийском шельфе.
2. Антициклонический круговорот Бофорта в Канадской котловине, являющийся, как указывалось выше, зоной накопления и многолетней трансформации льда.
3. Восточно-Гренландское течение, выносящее лёд и холодные распреснённые воды вдоль восточного побережья Гренландии в Атлантику.

Однако ключевым фактором, определяющим теплосодержание океана в непосредственной близости ото льда, является адвекция теплых вод из сопредельных океанов, прежде всего из Атлантического.

Через пролив Фрама и Баренцево море в СЛО поступают высокосолёные и относительно тёплые воды Северо-Атлантического течения. Вследствие своей высокой плотности они погружаются под распреснённый поверхностный слой и распространяются на глубинах от 150 до 900 м, образуя слой промежуточных атлантических вод (АВ) с температурой ядра, достигающей $+2...+3^{\circ}\text{C}$ в Баренцевом море и $+0,5...+1,5^{\circ}\text{C}$ в Евразийском бассейне. Тепловой запас АВ колоссален: даже их небольшого подмешивания

к поверхности было бы достаточно, чтобы полностью растопить ледяной покров [8]. Долгое время вертикальная стратификация надёжно изолировала это тепло от поверхности. Однако в последние десятилетия наблюдается феномен, получивший название «атлантификация»: усиление притока и повышение температуры АВ, а также разрушение галоклина в отдельных регионах (особенно в восточной части Евразийского бассейна и в Баренцевом море). Это приводит к тому, что океаническое тепло всё чаще достигает поверхности и вносит непосредственный вклад в сокращение площади зимнего льда, особенно в атлантическом секторе

Через Берингов пролив в Чукотское море ежегодно поступает около 0,8 Зв (Свердруп) относительно тёплых и богатых биогенами тихоокеанских вод. Их температура летом может превышать $+5^{\circ}\text{C}$. В отличие от АВ, тихоокеанские воды имеют более низкую солёность и формируют слой на промежуточной глубине (ниже арктического галоклина, но выше атлантических вод), однако их сезонное поступление непосредственно способствует раннему разрушению льда в Чукотском море и частично в море Бофорта.

Барьером, защищающим лёд от неисчерпаемого океанического тепла, служит исключительно устойчивая вертикальная стратификация вод СЛО. Она представлена тремя основными слоям.

Верхние 25–50 м заняты холодной (близкой к точке замерзания, около $-1.5...-1.8^{\circ}\text{C}$) и относительно распреснённой (солёность 28–33 ‰) водой, сформированной за счёт речного стока, таяния льда и осадков. Ниже залегает резкий галоклин – слой скачкообразного роста солёности до 34,5–35,0 ‰ на горизонтах 50–150 м. Градиент плотности в галоклине настолько велик, что турбулентный обмен через него крайне подавлен. Именно галоклин, а не термоклин, играет роль главного «запирающего» слоя, изолирующего тёплые атлантические воды от поверхности.

Слой атлантических вод – тёплое и солёное ядро, залегающее ниже галоклина (примерно 150–900 м). Глубинные и донные воды, формирующиеся за счёт зимней конвекции на шельфах и каскадного стока плотных вод по материковому склону.

Стабильность галоклина имеет критическое значение. Процессы, которые способны его размывать, напрямую угрожают существованию ледяного покрова. К таким процессам относятся: механическое ветровое перемешивание при уменьшении ледовитости (большая площадь открытой воды позволяет ветру эффективнее перемешивать верхние слои); интенсивное осенне-зимнее ледообразование, которое выдавливает соль (рассол) в нижележащие слои, увеличивая их плотность и способствуя конвекции; усиление притока атлантических вод, которое подпирает галоклин снизу и может втягивать тёплую воду в зону турбулентного обмена в районах интенсивного дрейфа льда (например, над подводными

хребтами и континентальными склонами). Современные наблюдения фиксируют ослабление галоклина в некоторых частях Евразийского бассейна, что является одним из важнейших индикаторов перестройки вертикальной термохалинной структуры океана и механизмом, усиливающим сезонное таяние льда снизу.

Анализ движущих сил ледовой динамики показывает неразрывное единство атмосферных и океанических процессов. Радиационный баланс задаёт общий тепловой ритм, но его эффективность модулируется обратной связью альбедо. Атмосферная циркуляция управляет механическим дрейфом и, через аномалии поля давления, определяет экспорт льда. Океан, обладая огромным запасом тепла, привнесённого из Атлантики и Тихого океана, выступает потенциальным источником быстрого таяния, сдерживаемым лишь прочностью арктического галоклина. Современные климатические изменения проявляются в одновременной интенсификации всех этих процессов: усиление длинноволнового притока к поверхности, рост повторяемости дипольной аномалии, ускоряющей дрейф, и повсеместное ослабление вертикального теплового барьера. Именно системное, синергетическое действие этих факторов и лежит в основе наблюдаемой стремительной трансформации ледяного покрова СЛО.

1.3. Основные типы морских льдов и их характеристики

Морской лёд Северного Ледовитого океана представляет собой чрезвычайно гетерогенную среду, свойства которой изменяются в широких пределах в зависимости от стадии развития, подвижности и истории деформаций. Для корректного анализа его динамики недостаточно оперировать лишь усреднёнными показателями площади или толщины: принципиальное значение имеет типизация льдов, отражающая их физические и механические особенности, чувствительность к внешним воздействиям и роль в крупномасштабных процессах. В основе общепринятых классификаций, закреплённых в номенклатуре Всемирной метеорологической организации (ВМО) и развитых в отечественной ледоведческой школе, лежат три главных критерия: возраст (стадия развития), подвижность и характер пространственного залегания (морфология). Ниже последовательно рассматриваются основные категории, формирующие ледяной покров Арктики.

1.3.1. Возрастная (генетическая) классификация

Возраст льда, неразрывно связанный с его толщиной, солёностью, прочностью и термической инерцией, служит базовым показателем при оценке динамического отклика ледяного массива. По возрастному признаку выделяют начальные, молодые, однолетние и старые (многолетние) льды.

Начальные виды льда. Лёдообразование начинается с появления ледяных игл, которые, смерзаясь, образуют ледяное сало – сероватый налёт на поверхности спокойной воды. При дальнейшем охлаждении формируются скопления пластинчатой или губчатой структуры, называемые шугой. В условиях волнения возникают отдельные округлые диски диаметром до 0,3–3 м – блинчатый лёд. Начальные формы имеют ничтожную механическую прочность и легко разрушаются ветром, что препятствует установлению сплошного покрова.

Нилас (толщина до 10 см). Нилас представляет собой тонкую эластичную корку, которая образуется в спокойных условиях и легко прогибается на волне. По цвету и толщине различают тёмный нилас (до 5 см) и светлый нилас (5–10 см). Несмотря на малую толщину, нилас резко снижает теплоотдачу океана в атмосферу, а его высокая солёность (15–25 ‰) при смерзании формирует кристаллы с многочисленными включениями рассола, что придаёт материалу пластичность.

Молодой лёд (10–30 см). При дальнейшем нарастании нилас переходит в категорию молодых льдов, разделяемых на серый (10–15 см) и серо-белый (15–30 см). Эти льды уже обладают некоторой жёсткостью и начинают реагировать на сжатие торосообразованием, однако их сопротивление ветровому дрейфу ещё невелико. В этот период наиболее интенсивно протекают процессы рассолообразования – миграции жидких включений вниз под действием силы тяжести и градиента температуры, что постепенно снижает солёность льда.

Однолетний лёд (30 см – 2 м). Лёд, просуществовавший не более одной зимы, классифицируется как однолетний. В отечественной практике его подразделяют на тонкий однолетний (30–70 см), средний (70–120 см) и толстый (более 120 см). Именно однолетний лёд в настоящее время доминирует в Арктическом бассейне, вытесняя многолетний. Его термическая инерция относительно невелика: такой лёд полностью или почти полностью стаивает за летний сезон, а его механическая прочность на изгиб (порядка 300–700 кПа) существенно ниже, чем у многолетнего. Пространственное распределение толщины однолетнего льда крайне неравномерно и зависит от сроков замерзания, динамических условий и снежного покрова.

Старый (многолетний) лёд. Льды, пережившие хотя бы одно летнее таяние, переходят в категорию старых. В международной практике выделяют остаточный однолетний лёд (переживший одно лето, толщина до 2,5 м), двухлетний (переживший два лета) и собственно многолетний (существующий более двух лет). Многолетний лёд – наиболее мощный элемент арктической криосферы: его толщина достигает 3–5 м и более, солёность падает до 1–3 ‰, а прочность на изгиб приближается к таковой у пресноводного

льда (до 1–2 МПа). Таяние верхней поверхности летом и нарастание снизу зимой формируют характерную слоистую структуру с чередованием обессоленных и более солёных прослоек. Многолетний лёд, исторически занимавший центральную часть Арктического бассейна и круговорот Бофорта, служил «становым хребтом» ледяного покрова, препятствуя его быстрому разрушению. Его катастрофическое сокращение является одной из главных примет современной трансформации Арктики.

1.3.2. Классификация по динамическому признаку: припай и дрейфующий лёд

Подвижность льда – ключевая характеристика, непосредственно определяемая ветровыми и океаническими полями. По этому критерию ледяной покров дихотомически разделяется на неподвижный припай и дрейфующий лёд.

Припай. Припай – это морской лёд, прикреплённый к берегу, ледяному барьеру или осушке, а на мелководьях примороженный ко дну. Он образуется преимущественно в холодное время года на обширном евразийском шельфе, где глубина не превышает 20–30 м. Ширина полосы припая варьирует от нескольких километров вблизи крутых берегов до сотен километров в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море. В отличие от дрейфующего, припай не участвует в горизонтальном перемещении, наращивая толщину исключительно за счёт термического роста и снеговой нагрузки. При этом его стационарность относительна: во время приливов, нагонов и подвижек дрейфующего льда происходит взлом припая, сопровождающийся образованием протяжённых трещин и торосистых гряд. Важнейшей климатической функцией припая является его роль в формировании заприпайных полыней – стационарных зон открытой воды и молодого льда, где зимой реализуется колоссальный поток тепла в атмосферу и происходит интенсивное льдообразование. От устойчивости припая зависят сроки существования таких полыней, а следовательно, и объём новообразованного льда, поступающего в Трансарктический дрейф.

Дрейфующий лёд (паковый лёд). Вся масса льда, не связанная с берегом и находящаяся в непрерывном движении под действием внешних сил, относится к категории дрейфующего. В Арктическом бассейне именно дрейфующий лёд определяет лицо ледяного покрова. Его классифицируют по сплочённости (см. ниже) и по размерам ледяных полей:

1. Ледяные поля: обширные (более 10 км в поперечнике), большие (2–10 км), малые (0,5–2 км), обломки полей (100–500 м).
2. Крупнобитый лёд (20–100 м) и мелкобитый лёд (2–20 м).
3. Тёртый лёд (менее 2 м) – продукт интенсивного дробления на кромке или в зонах сжатия.

Характер дрейфа напрямую зависит от соотношения сил ветра, трения о воду, внутренних напряжений и эффекта Кориолиса. Сплочённые массивы движутся как единое целое, подчиняясь крупномасштабному полю приземного давления, тогда как в разреженных зонах отдельные льдины могут дрейфовать со скоростью, заметно превышающей скорость переноса сплошного покрова. Именно дрейфующий лёд транспортирует пресную воду и осадки через океан, а его деформации порождают наиболее мощные ледяные образования – торосы.

Многообразие типов морского льда – от начальных ниласовых форм до многометровых торосистых гряд – определяет сложность его отклика на климатические и океанологические воздействия. Возрастная стадия детерминирует толщину, прочность и солёность; динамический статус (припай или дрейф) – характер взаимодействия с полями ветра и течений; морфологические формы (торосы, полыньи, разводья) создают внутреннюю неоднородность, модулирующую макроскопические свойства ледяного покрова. Именно эта структура служит физической основой для построения численных моделей и интерпретации спутниковых данных, что будет рассмотрено в последующих главах.

2. Методы и средства анализа динамики морского льда

2.2 Судовые и авиационные наблюдения: история и современность

История систематического изучения ледяного покрова Арктики неразрывно связана с судовыми экспедициями и авиаразведкой, которые на протяжении десятилетий оставались единственным источником прямых контактных и визуальных данных. Именно эти методы заложили фундамент современных представлений о толщине, возрастном составе и динамике льда, а собранные ряды наблюдений служат ценнейшим эталоном для валидации спутниковых продуктов.

Начало регулярных инструментальных наблюдений было положено дрейфующими станциями. Советская программа «Северный полюс» (с 1937 г., «СП-1» под руководством И.Д. Папанина) и последующие отечественные станции, а также американские ледовые острова (Т-3, ARLIS) в 1950–1970-х годах позволили получить непрерывные метеорологические, океанографические и ледовые ряды непосредственно в центральной Арктике. С борта дрейфующих баз выполнялись измерения толщины и сплочённости льда, описывались процессы торошения и таяния, что дало возможность сформулировать первые количественные закономерности термодинамики ледяного покрова. В постсоветский период программа была приостановлена, но с 2003 г. возобновлена в формате ежегодных дрейфующих станций «Северный полюс» (с 2013 г. – на базе ледостойкой платформы), что обеспечивает непрерывность уникальных натурных рядов.

Параллельно развивалась ледовая авиаразведка. Начиная с 1920-х годов в Арктике проводились полёты для картографирования кромки льда и оценки ледовых условий на трассах Северного морского пути. В СССР сложилась мощная сеть авиационных ледовых наблюдений, выполнявшихся на самолётах Ил-14, Ан-2, а позже на специализированных ледовых разведчиках (Ил-24Н). Визуальные и инструментальные (фотографические, а затем радиолокационные) наблюдения с борта давали детальную картину распределения сплочённости, возраста и форм льда, а также фиксировали наличие айсбергов. Материалы авиаразведок стали основой для составления ледовых карт, которые выпускались на регулярной основе (декадные, ежемесячные) и использовались для обеспечения навигации.

В современной практике судовые и авиационные наблюдения не утратили значения, но их роль трансформировалась из глобально-обзорной в верификационную. Экспедиционные суда, следующие по Севморпути, оснащены комплексами видеонаблюдения и судовыми радарами, а ледовые авиасъёмки проводятся преимущественно для локального мониторинга в интересах конкретных хозяйственных проектов. Главной же функцией прямых измерений сегодня является калибровка и

валидация спутниковых данных: контактные замеры толщины льда на станциях и трансектах служат «наземной истиной» для алгоритмов обработки спутниковой альтиметрии (CryoSat-2, ICESat-2), а визуальные определения сплочённости и возраста льда сопоставляются с пассивными микроволновыми продуктами. Таким образом, исторические и современные судовые и авиационные данные образуют неразрывный мост от эпохи «ручного» накопления знаний к высокотехнологичному спутниковому мониторингу.

2.2 Спутниковые дистанционные методы

Спутниковое зондирование обеспечило глобальный, непрерывный и однородный мониторинг арктического льда независимо от полярной ночи и облачности. Современный анализ опирается на три основных класса приборов: пассивные микроволновые радиометры, альтиметры и радары с синтезированной апертурой.

Пассивное микроволновое зондирование (серии SMMR, SSM/I, SSMIS, AMSR) регистрирует собственное излучение поверхности в микроволновом диапазоне, где яркостная температура льда резко контрастирует с открытой водой. Это даёт ежедневные поля сплочённости с разрешением 6–25 км. Непрерывный ряд с 1978 г. служит основой для всех климатических оценок площади и протяжённости льда. Алгоритмы (NASA Team, Bootstrap) позволяют также грубо разделять однолетний и многолетний лёд. Главный недостаток — потеря точности летом из-за талых процессов на поверхности и неспособность разрешать узкие разводья.

Спутниковая альтиметрия и лазерное сканирование восполняют информацию о толщине льда. Радиолокационные альтиметры (CryoSat-2 с интерферометрическим радаром SIRAL) измеряют высоту свободного плавания льдины (freeboard) над локальной уровенной поверхностью в разводьях, откуда по соотношениям гидростатики вычисляется толщина. Именно CryoSat-2 дал регулярные оценки объёма льда и зафиксировал его стремительное утонение. Лазерная альтиметрия (ICESat, ICESat-2) отличается малым пятном засветки (до 17 м) и высокой детальностью профилей, а комбинация радарных и лазерных данных позволяет уточнять вклад снежного покрова.

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (SAR) (Sentinel-1, RADARSAT-2) обеспечивают снимки с разрешением в десятки метров, что необходимо для анализа мезомасштабной динамики. Путём кросс-корреляции последовательных кадров вычисляются векторы дрейфа льда, выявляются зоны торошения, разводья и айсберги. Текстурные и поляриметрические признаки SAR-изображений дополнительно используются для классификации возрастных типов льда. Летнее таяние, однако, снижает контрастность снимков.

Дополнительно применяются оптические и инфракрасные сенсоры (MODIS, VIIRS) для детальных карт при ясном небе и скаттерометры (ASCAT) для индикации границ многолетнего льда. Мультисенсорный подход, объединяющий все перечисленные методы с контактной валидацией (раздел 2.1) и ассимиляцией в моделях (раздел 2.3), составляет сегодня стандартную методологию исследования динамики арктического ледяного покрова.

2.3. Математическое моделирование ледяного покрова

Спутниковые и контактные наблюдения фиксируют мгновенное состояние ледяного покрова, однако для восполнения пространственно-временных пробелов, количественного разделения вклада атмосферных и океанических факторов и построения сценарных прогнозов необходимы численные модели. Они описывают эволюцию ключевых переменных — толщины, сплочённости, скорости дрейфа и возраста льда — на основе фундаментальных законов сохранения импульса, массы и энергии, объединяя термодинамику и динамику в замкнутую систему уравнений.

Термодинамический блок рассчитывает вертикальные потоки тепла через снежно-ледяную толщу и граничные слои атмосферы и океана. Он учитывает баланс коротковолновой и длинноволновой радиации, турбулентные потоки явного и скрытого тепла, а также потоки тепла от океана к нижней поверхности льда. Рост льда в холодный сезон описывается классическими законами Стефана с поправками на снежную теплоизоляцию; таяние сверху моделируется через поглощение солнечной радиации в толще льда и образование талых луж, а таяние снизу — через океанический тепловой поток. Многие современные модели, включая CICE, разрешают несколько слоёв по вертикали, воспроизводя температурный профиль и фазовые переходы внутри льда, а также параметризуют эволюцию снежного покрова и его трансформацию в снежно-водный лёд при затоплении поверхности.

Динамический блок описывает горизонтальное движение льда под действием баланса сил: напряжение ветра на верхней поверхности, трение о воду, передача импульса через внутренние напряжения в ледяном массиве, сила Кориолиса и уклон уровня океана. Ключевым элементом здесь выступает реологический закон, связывающий внутренние напряжения с деформациями льда. Наиболее широкое применение нашла вязко-пластическая реология Хиблера (1979) и её численно эффективная модификация — упруго-вязко-пластическая реология, используемая в модели CICE. В этих моделях лёд ведёт себя как пластический материал при высоких напряжениях (сжатие, торошение) и как вязкая жидкость при малых деформациях, что позволяет реалистично воспроизводить образование гряд торосов, разводий и зон сдвига. Альтернативные подходы, например модель с

пределом прочности на растяжение, продолжают развиваться для более точного описания разрушения льда на масштабах, близких к разрешению спутниковых SAR-изображений.

Среди ледовых моделей, применяемых в глобальной и региональной практике, центральное место занимает C.I.C.E. (Community Ice Code) — открытая модель, разработанная в Лос-Аламосской национальной лаборатории. Она является ледовым компонентом многих климатических моделей (CESM, UKESM) и региональных систем прогноза, таких как Arctic Cap Nowcast/Forecast System. Модель оперирует несколькими категориями толщины льда в каждой расчётной ячейке, что позволяет описывать субсеточное распределение и реалистично воспроизводить перераспределение массы при торошении. Параллельно для оценок объёма льда на многолетних масштабах широко используется система P.I.O.M.A.S. (Pan-Arctic Ice-Ocean Modeling and Assimilation System), которая ассимилирует спутниковые данные о сплочённости льда и температуре поверхности, создавая согласованные ряды толщины с 1979 г.

Особое место в современном моделировании занимает усвоение данных (data assimilation) — математическая процедура оптимального слияния модельных полей с результатами измерений. В ледовых задачах чаще всего усваиваются пассивные микроволновые оценки сплочённости, толщина по данным CryoSat-2 и S.M.O.S., а также векторы дрейфа, восстановленные по последовательным спутниковым снимкам. Методы варьируют от простой коррекции («nudging») до ансамблевого фильтра Калмана и вариационных схем 3D-Var. Ассимиляция позволяет не только скорректировать текущее состояние модели, уменьшая накопление ошибок, но и получить реанализы — ретроспективные массивы физически согласованных параметров, которые широко применяются для анализа долговременной изменчивости и верификации климатических гипотез.

Таким образом, математические модели выступают интегрирующим звеном методологии: они синтезируют данные контактных и спутниковых наблюдений в единое физически непротиворечивое описание ледяного покрова, позволяя не только диагностировать текущее состояние, но и выявлять причинно-следственные связи, а также строить сезонные и долгосрочные прогнозы эволюции арктического льда.

Рассмотренный комплекс методов — от исторических судовых дрейфующих станций и авиационных ледовых разведок до мультисенсорного спутникового мониторинга и глобальных численных моделей — образует единую систему получения и интерпретации данных о динамике морского льда. Судовые и авиационные наблюдения заложили эмпирический фундамент знаний и сегодня выполняют незаменимую функцию валидации спутниковых продуктов, предоставляя прямые контактные измерения толщины и детальные

визуальные описания ледовой обстановки. Спутниковые дистанционные методы обеспечили прорыв в пространственно-временном охвате: пассивные микроволновые радиометры дали непрерывные сорокалетние ряды сплочённости и протяжённости льда, альтиметрические и лазерные миссии раскрыли картину его объёмного сокращения, а радары с синтезированной апертурой позволили выйти на детальный анализ дрейфа и деформаций. Математические модели, в свою очередь, объединяют эти разнородные потоки информации в физически замкнутую картину, давая возможность не только восстанавливать прошлое состояние ледяного покрова (реанализы), но и заглядывать в его будущее. Именно синергия трёх методологических направлений — прямых измерений, спутникового мониторинга и численного моделирования — составляет основу современных представлений о динамике арктического льда и определяет достоверность выводов, излагаемых в последующих главах.

3. Внедрение результатов исследования в образовательный процесс школы

3.1. Педагогический потенциал темы и её место в школьном образовании

Изучение морского льда в школе обладает значительным образовательным и воспитательным потенциалом. Во-первых, тема находится на стыке физической географии, физики, информатики и экологии, что создаёт естественные условия для реализации межпредметных связей. Во-вторых, она опирается на реальные, постоянно обновляемые научные данные, что придаёт учебной деятельности исследовательский характер и формирует у учащихся представление о современной науке как о живом, развивающемся процессе. В-третьих, арктическая проблематика имеет высокую социальную значимость, что способствует воспитанию экологической ответственности и гражданского самосознания.

Согласно требованиям, Федеральный государственный образовательный стандарт (ФГОС) основного и среднего общего образования, проектно-исследовательская деятельность является обязательной составляющей образовательной программы. Тема динамики арктического льда позволяет организовать такую деятельность на материале, сочетающем наглядность (спутниковые снимки, анимации дрейфа), количественные оценки (тренды площади и толщины, графики) и дискуссионность (причины и последствия сокращения льда, прогнозы для Северного морского пути). Таким образом, она полностью отвечает задачам формирования познавательных, регулятивных и коммуникативных универсальных учебных действий.

3.2. Интеграция научных знаний в урочную и внеурочную деятельность

Полученные в предыдущих главах сведения о физико-географических условиях, факторах динамики, типах льда и методах наблюдений служат содержательной основой для целого ряда школьных предметов.

На уроках географии (8–10 классы) разделы «Природа России», «Мировой океан», «Глобальные изменения климата» могут быть дополнены блоками о роли Северного Ледовитого океана в климатической системе Земли. Учащиеся работают с ледовыми картами, анализируют изменение площади льда по месяцам, связывают особенности припая и полыней с рельефом дна и речным стоком. Целесообразны практические задания по определению кромки льда по спутниковому снимку, сопоставлению положения кромки в разные годы, расчёту ледовитости.

Учащиеся могут выполнять работы по анализу межгодовой изменчивости площади льда в отдельном арктическом море, используя открытые базы данных Sea Ice Index (NSIDC) и методику расчёта аномалий. Другие возможные темы: «Сравнение спутниковых оценок толщины льда по данным CryoSat-2 и PIOMAS», «Связь индекса Арктической осцилляции с экспортом льда через пролив Фрама», «Изменение сроков таяния припая в море Лаптевых». При этом школьники осваивают элементы математического моделирования и статистической обработки, опираясь на принципы, изложенные в разделах 2.2 и 2.3.

Школьные научные общества и кружки («Полярные исследования», «Спутниковый мониторинг климата»). В рамках занятий проводится работа с интерактивными ледовыми картами (например, ресурсы ААНИИ, Norwegian Ice Service), анализ анимаций дрейфа, знакомство с технологиями дистанционного зондирования. Практическое значение имеет обучение дешифрированию SAR-снимков на примере ледовых полей и торосов, что способствует развитию пространственного мышления.

Результаты проектных работ могут быть представлены на школьных и муниципальных научно-практических конференциях, конкурсах «Шаг в науку», «Человек и природа», олимпиадах по географии и экологии. Подготовка доклада формирует навыки публичного выступления и научной аргументации.

Проведение школьных «Дней Арктики», викторин, квестов, посвящённых природе и климату полярных широт, с использованием картографического материала и спутниковых снимков. Такие мероприятия популяризируют научное знание и повышают интерес к естественнонаучным дисциплинам.

Внедрение научных знаний о динамике арктического льда в учебную и внеклассную деятельность школьников представляет собой эффективный способ формирования исследовательских компетенций, картографической грамотности и экологического мышления. Материалы, изложенные в предшествующих главах (физико-географические условия, факторы динамики, классификация льдов, методы спутникового мониторинга и численного моделирования), находят прямое применение в урочных и внеурочных формах, придавая обучению практико-ориентированный и междисциплинарный характер. Использование открытых источников данных, адаптированных для школьной аудитории, делает реальную научную работу доступной и воспитывает поколение, способное критически оценивать климатическую информацию и принимать обоснованные решения в быстро меняющемся мире.

Заключение

Северный Ледовитый океан остаётся эпицентром наиболее стремительных климатических изменений на планете, а его ледяной покров — индикатором, многократно усиливающим внешние воздействия благодаря системе положительных обратных связей. Цель настоящей работы заключалась в систематизации современных научных данных о динамике арктического льда и разработке методологии их использования в школьном образовании. Последовательное решение поставленных задач позволило получить ряд взаимосвязанных результатов.

Во-первых, на основе анализа физико-географических и океанологических условий выделены ключевые параметры, определяющие динамику ледяного покрова: радиационный баланс и альбедная обратная связь, поле приземного ветра и барические центры (Арктический антициклон, Исландская депрессия, дипольная аномалия), океаническая адвекция тепла атлантическими и тихоокеанскими водами, а также устойчивость арктического галоклина. Показано, что именно сочетанное действие этих факторов — а не только рост приповерхностной температуры — ответственно за наблюдаемое сокращение площади, толщины и возрастного состава льда. Отдельно подчеркнута роль речного стока и шельфовой батиметрии в формировании припая и заприпайных полыней, выступающих главными «фабриками» арктического льда.

Во-вторых, обобщение данных многолетнего спутникового мониторинга и результатов численного моделирования (CICE, PIOMAS) подтверждает устойчивый тренд на уменьшение ледовитости. Анализ модельных экспериментов, проведённых различными научными группами, свидетельствует о высокой вероятности дальнейшего роста продолжительности безлёдного периода в морях российской Арктики к концу XXI века. При этом вариабельность прогнозов остаётся значительной, что диктует необходимость непрерывного совершенствования моделей и усвоения в них всё более полного набора спутниковых и контактных измерений.

В-третьих, на основе систематизированного научного материала разработан комплекс учебных модулей для средней и старшей школы, обеспечивающий внедрение результатов исследования в образовательную практику. Модули опираются на реальные массивы открытых данных (Sea Ice Index, CryoSat-2, ледовые карты ААНИИ) и включают практические задания по анализу графиков, дешифрированию спутниковых снимков, расчёту аномалий и построению трендов. Предложенная методика позволяет формировать у обучающихся исследовательские компетенции, картографическую грамотность и климатическую ответственность, полностью соответствуя требованиям ФГОС к проектно-исследовательской деятельности.

Таким образом, в ходе работы решены все поставленные задачи: выявлены ведущие физические механизмы динамики арктического льда, обобщены прогностические оценки изменений ледового режима российской Арктики и создана методическая основа для переноса актуальных научных знаний в школьную аудиторию. Практическая значимость исследования определяется возможностью прямого использования его материалов как в учебном процессе (уроки географии, физики, информатики), так и во внеурочной проектной деятельности, способствуя воспитанию поколения, способного квалифицированно оценивать климатические риски и принимать обоснованные решения

Список литературы

1. Оперативные данные ФГБУ ААНИИ. – Текст: электронный // ААНИИ: [сайт]. – URL: <http://data.aari.ru/> (дата обращения: 19.07.2026)

2. Обзорные карты состояния ледяного покрова Северного Ледовитого Океана. – Текст: электронный // ААНИИ: [сайт]. – URL: http://data.aari.ru/odata/_d0015_.php?lang=1&mod=0&yy=2026 (дата обращения: 19.07.2026)

3. Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ). – Текст: электронный // ААНИИ: [сайт]. – URL: <https://aari.ru> (дата обращения: 15.07.2026)

4. Липатов М.А., Волков В.А., Май Р.И. Линейные тренды в поле дрейфа ледяного покрова в Северном Ледовитом океане // Океанология. – 2021. – Т. 61, № 3. – С. 341–349. – Текст: электронный // ScienceJournals: [сайт]. – URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=ocean&y=2021&v=61&n=3&a=Okean2103007Lipatov> (дата обращения: 19.07.2026)

5. Фролов И.Е., Кулаков М.Ю., Фильчук К.В. Баланс льда в Северном Ледовитом океане в 1979–2019 гг. (по данным моделирования) // Лёд и Снег. – 2022. – DOI: 10.31857/S2076673422010120. – Текст: электронный // Лёд и Снег: [сайт]. – URL: <https://ice-snow.igras.ru/jour/article/view/954/0> (дата обращения: 14.07.2026)

6. Кальницкий Л.Ю., Кауркин М.Н., Ушаков К.В., Ибраев Р.А. Сезонная изменчивость циркуляции вод и морского льда в Северном Ледовитом океане в модели высокого разрешения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 56, № 5. – С. 598–610. – Текст: электронный // ScienceJournals: [сайт]. – URL: <https://sciencejournals.ru/viewarticle/?a=FizAtm2005006Kalnitskii&j=fizatm&n=5&v=56&y=2020> (дата обращения: 18.07.2026)

7. Дворников А.Ю. Моделирование климатических изменений океанской циркуляции, морского льда и распространения речных вод в Северном Ледовитом океане во второй половине 20-го столетия: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.28. – СПб., 2004. – 92 с. – Текст: электронный // dslib: [сайт]. – URL: <http://www.dslib.net/oceanologia/modelirovanie-klimaticheskikh-izmenenij-okeanskoj-cirkuljacii-morskogo-lda-i.html> (дата обращения: 18.07.2026)

8. Захваткина Н.Ю. Идентификация морских льдов Северного Ледовитого океана по данным радиолокатора с синтезированной апертурой: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.28. – СПб., 2009. – 168 с. – Текст: электронный // dslib: [сайт]. –

URL: <http://www.dslib.net/oceanologia/identifikacija-morskih-ldov-severnogo-ledovitogo-okeana-po-dannym-radiolokatora-s.html> (дата обращения: 15.07.2026)

9. Фролов И.Е. и др. Научные исследования в Арктике. Т. 2: Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. – М.: Наука, 2007. – 158 с. – ISBN 978-5-02-025168-7. – Текст: электронный // URSS: [сайт]. – URL: <https://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=ru&blang=ru&page=Book&id=76155> (дата обращения: 19.07.2026)

10. Мельников И.А., Гогорев Р.М. Оценка состояния экосистемы морского льда центрального Арктического бассейна по данным наблюдений в период проведения МПГ // Наземные и морские экосистемы / под ред. Г.Г. Матишова, А.А. Тишкова. – 2011. – Текст: электронный // Игорь Алексеевич Мельников: [сайт]. – URL: <http://igormelnikov.ocean.ru/index.php/publikatsii/stati-po-arktike/item/160-otsenka-sostoyaniya-ekosistemy-morskogo-lda-tsentralnogo-arkticheskogo-bassejna-po-dannym-nablyudenij-v-period-provedeniya-mpg> (дата обращения: 17.07.2026)

11. Семенов В.А., Романенко В.А. Выявление пространственно-временной эволюции арктического морского льда в XXI веке по данным ансамбля моделей CMIP6 // Сборник трудов международной конференции ENVIROMIS-2024. – Томск: Изд-во НТЛ, 2024. – Т. 19. – С. 19–24. – Текст: электронный // ИСТИНА: [сайт]. – URL: <https://istina.fnkrr.ru/publications/article/717849591/> (дата обращения: 19.07.2026)

12. Изменения минимальной площади морского льда в Арктике в 2024 году. – Текст: электронный // Росгидромет: [сайт]. – 2024. – 25 сентября. – URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/38769/> (дата обращения: 16.07.2026)

13. Исследователи оценили изменения продолжительности навигации в водах Арктики в XXI веке. – Текст: электронный // Российская академия наук: [сайт]. – 2025. – 14 мая. – URL: <https://new.ras.ru/press-center/issledovateli-otsenili-izmeneniya-prodolzhitelnosti-navigatsii-v-vodakh-arktiki-v-xxi-vek/> (дата обращения: 15.07.2026)

14. Афанасьева Е.В., Соколова Ю.В., Солощук П.В. Первый опыт использования данных космических аппаратов «Кондор-ФКА» для наблюдений за характеристиками ледяного покрова // Материалы 23-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М.: ИКИ РАН, 2025. – Текст: электронный // Конференции по дистанционному зондированию: [сайт]. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/files/books/2025/11303.htm> (дата обращения: 18.07.2026)

15. Андреев О.М. Термодинамическое моделирование формирования морского ледяного покрова в Арктике: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.28. – СПб., 2005. – 16 с. – Текст: электронный // dslib: [сайт]. – URL: <http://www.dslib.net/oceanologia/termodinamicheskoe-modelirovanie-formirovanija-morskogo-ledjanogo-pokrova-v-arktike.html> (дата обращения: 18.07.2026)