

*На правах рукописи*



**Романюк Валерий Анатольевич**

**ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ ОХОТСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОЙ  
ТЕНДЕНЦИИ УВЕЛИЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА**

Специальность 25.00.28 – Океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Южно-Сахалинск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сахалинский государственный университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Пищальник Владимир Михайлович**

**Официальные оппоненты:** **Иванов Владимир Владимирович**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории региональной океанологии географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

**Дубина Вячеслав Анатольевич**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории ледовых исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук

**Ведущая организация:** Тихоокеанский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии»

Защита диссертации состоится «13» декабря 2019 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д005.017.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: ул. Балтийская, 43, г. Владивосток, 960041

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук и на сайте института <http://poi.dvo.ru/drupal/edu/disslist>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат географических наук

Храпченков Федор Фомич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Современное потепление в Северном полушарии, начавшееся в конце 1970-х гг. (Попова, 2011; Груза, Ранькова, 2012; Доклад... 2014, 2019), способствует формированию устойчивой тенденции снижения площади ледяного покрова замерзающих морей. Снижение запасов углеводородов на суше делает необходимым проведение разведки и обустройства морских нефтегазовых месторождений. Российский континентальный шельф, являясь самым большим в мире по площади, концентрирует в себе колоссальные запасы углеводородных ресурсов. Поэтому одна из главных задач развития топливно-энергетического комплекса России – освоение и добыча углеводородов на арктическом и дальневосточном континентальном шельфе. При этом первостепенное значение приобретают вопросы, связанные с безопасной эксплуатацией стационарных нефте- и газодобывающих платформ и транспортировкой углеводородов в сложных ледовых условиях. Не менее важным аспектом является повышение рисков загрязнения морской среды при смещении мировой добычи нефтяных углеводородов на шельфы замерзающих и арктических морей. В связи с этим необходимо проведение постоянного мониторинга, оценки и прогноза ледовой обстановки, который невозможен без глубоких знаний об историческом и современном состоянии ледяного покрова в замерзающих морях. Это в полной мере относится к Охотскому морю, на шельфе которого уже два десятилетия ведётся освоение месторождений и добыча углеводородов.

При исследовании элементов ледового режима Охотского моря особый интерес представляют долгопериодные колебания площади ледяного покрова, которые позволяют оценить интенсивность ледовых процессов и связать их с глобальными изменениями климата, происходящими в современный период. В сочетании с использованием качественно новых спутниковых данных, полученные представления о ледовом режиме Охотского моря в целом и его отдельных регионов позволят вывести на качественно новый уровень ледовые прогнозы и повысить безопасность выполнения морских операций. Опыт ледовых исследований в Охотском море с большой эффективностью может быть применен при разработке месторождений углеводородов на шельфе Арктического бассейна.

**Цель и задачи диссертационной работы.** Цель работы – выявить новые особенности ледового режима Охотского моря в условиях глобальной тенденции увеличения температуры воздуха на основе исторических знаний о вариациях ледяного покрова и современных, детализированных и регулярных спутниковых данных с учётом географической специфики отдельных регионов моря.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Сформировать непрерывный ряд средних за сезон значений ледовитости Охотского моря с 1882 по 2016 г.
2. Проанализировать межгодовую изменчивость площади морского льда Охотского моря и выявить долговременные тенденции изменения ледовитости.
3. Выполнить типизацию зим по суровости ледовых условий Охотского моря за период с 1882 по 2016 г.
4. Произвести районирование Охотского моря по ледово-географическим признакам с учётом пространственно-временной изменчивости ледяного покрова.
5. Проанализировать пространственные особенности межгодовой и внутрисезонной изменчивости элементов ледового режима Охотского моря.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов анализа ледового режима и проведения оперативного ледового мониторинга, применением объективных методов исследования. Все количественные оценки ледовитости Охотского моря в условиях глобальной тенденции увеличения температуры воздуха получены с использованием репрезентативных источников, опирающихся на регулярные данные дистанционного зондирования Земли. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых публикациях, неоднократно обсуждались на международных и всероссийских симпозиумах, форумах и конференциях.

### **Научная новизна**

1. Сформирован непрерывный ряд средних за сезон значений ледовитости Охотского моря с 1882 по 2016 г.
2. Показано, что за последние 135 лет наблюдается устойчивая тенденция уменьшения площади ледяного покрова Охотского моря. С конца 1970-х гг. по настоящее время интенсивность сокращения ледовитости значительно увеличилась.
3. Впервые выполнено районирование Охотского моря по ледово-географическим признакам.
4. Выполнен анализ изменений элементов ледового режима в отдельных регионах Охотского моря в условиях глобальной тенденции увеличения температуры воздуха за период с 1979 по 2016 г.

**Теоретическая и практическая значимость.** Выявленные особенности межгодовой и сезонной изменчивости значений ледовитости и выделенные долговременные тенденции дают новые представления о ледовом режиме Охотского моря в целом и его отдельных регионов. Полученные результаты представляют

интерес для разработки прогнозов значений ледовитости моря с различной заблаговременностью. Применение полученных теоретических знаний о ледовом режиме в оперативной практике позволяет в настоящее время обеспечивать актуальной ледовой информацией производственные объекты проекта «Сахалин-2», составлять рекомендованные маршруты плавания судов во льдах и разрабатывать рекомендации относительно сроков полного очищения акватории ото льда. На основе изложенного в диссертации подхода по изучению ледового режима Охотского моря были успешно выполнены работы по ледовому сопровождению при разведочном бурении на лицензионных участках «Лисянский» и «Магадан-1» на севере Охотского моря в 2016 г.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Выявлены долговременные тенденции сокращения ледовитости в Охотском море: общая с 1882 г. (1,3% за 10 лет) и современная с конца 1970-х гг. по настоящее время (4,7% за 10 лет).

2. В аномально тёплый период с конца 1970-х по 2016 г. мягкие и экстремально мягкие типы зим по суровости ледовых условий составляли 54% от их общего количества за последние 135 лет, а доля суровых и экстремально суровых – 6%.

3. Выявлены различия элементов ледового режима отдельных регионов Охотского моря в современный период потепления: типы зим по суровости ледовых условий в трёх регионах моря не совпадают в 70% случаев; наступление основного минимума ледовитости в южном регионе зафиксировано на 5 лет раньше, чем в северо-западном и северо-восточном регионах; в среднем самое раннее наступление внутрисезонного максимума ледовитости (28 февраля) происходит в мягкие зимы в северо-восточном и северо-западном регионах, самое позднее (15 марта) – в южном регионе в умеренные типы зим.

**Апробация работы.** Результаты исследований, проведенных в настоящей работе, были представлены и обсуждались на ряде совещаний, форумах, конференциях, в том числе: на VII, IX, X, XI Всероссийских симпозиумах «Физика геосфер», Владивосток, 2011, 2015, 2017, 2019 гг.; на 28-м, 30-м Международных симпозиумах «Okhotsk sea and sea ice», Mombetsu, 2013, 2015 гг.; на 9-й научно-практической конференции молодых специалистов «Сахалин Энерджи», Южно-Сахалинск, 2017 г.; на международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий в условиях глобальных изменений климата», Южно-Сахалинск, 2017 г.; в ходе рабочих

совещаний с «Sakhalin Energy Investment Company Ltd.» и «Exxon Neftegas Limited», Южно-Сахалинск, 2018, 2019 гг.; на 4-м международном инвестиционном форуме и выставке «Восточный нефтегазовый форум», Владивосток, 2019; на конференции «Ситуационные центры: фокус кросс-отраслевых интересов – 2019», Москва, 2019.

**Личный вклад автора.** Результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно или на равных правах с соавторами. Автор принимал участие в сборе данных о ледяном покрове Охотского моря, выполнял анализ исторической информации о площади морского льда, архивных ледовых карт, данных спутниковых наблюдений, на основе которых был сформирован ряд значений ледовитости с 1882 по 2016 г. Участвовал в разработке программного комплекса «ЛЁД», предназначенного для расчета площади ледяного покрова Охотского моря в районах с произвольно заданными границами. С 2006 г. автором ведется информационное наполнение архива гидрометеорологических данных Научно-исследовательской лаборатории дистанционного зондирования Земли Сахалинского государственного университета и Российской академии наук (ЛДЗЗ). На основе разработанного нами методологического подхода ежедневно на протяжении нескольких ледовых сезонов выполнялся мониторинг ледовой обстановки с целью проводки судов в ледовых условиях при транспортировке нефтяных углеводородов от производственного комплекса «Пригородное», а также для обеспечения безопасности транспортировки грузов на стационарные нефтегазодобывающие платформы «Пильтун-Астохская-А», «Пильтун-Астохская-Б» и «Лунская-А». Автор принимал непосредственное участие в экспедиционных работах по наблюдениям за ледовой обстановкой в районе Южно-Киринского газоконденсатного месторождения (авиационная разведка и десантирование на ледовые поля с целью замера толщины льда и установки радиобуев системы Argos) в 2016 и 2019 гг.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы: 5 научных статей в изданиях, определённых в перечне ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, из них 3 работы опубликованы в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science; 20 тезисов докладов на международных и всероссийских симпозиумах и конференциях; получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 116 наименований и семи приложений. Общий объем диссертации составляет 120 страниц текста, 37 рисунков, 11 формул и 9 таблиц.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю д.т.н. В.М. Пищальнику за научную школу по изучению ледового режима Охотского моря, терпение, поддержку, постоянное внимание и отеческую заботу. Автор благодарен сотрудникам ЛДЗЗ к.ф.-м.н. И.Г. Минервину, И.В. Еременко, И.В. Шумилову за многолетнюю успешную совместную работу и полезные советы. Автор благодарит д.х.н. А.В. Леонова, д.г.н. Д.Я. Фащука за полезные консультации, ценные советы и дискуссии по тематике и смежным проблемам исследования. Выражает благодарность к.ф.-м.н. С.В. Писареву и А.Н. Шарафутдинову за помощь при планировании и проведении работ в экспедиционных условиях.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** изложена актуальность работы, ее цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** приводится описание физико-географических особенностей Охотского моря, рассмотрены его гидрологические и метеорологические условия. Особое внимание уделено описанию ледового режима моря, в том числе обзору литературы по исследованию ледовых условий Охотского моря. Стоит отметить, что большинство работ этого направления посвящены исследованию динамики значений ледовитости моря, разработке и использованию прогностических моделей, как правило, в границах всего моря (Устинова, 2002; Полякова, 2012; Коломейцев, 2015, 2016; Фигуркин, 2008; Пищальник, 2011). Опыт разработки нефтегазовых проектов на шельфе Охотского моря показал необходимость детализации исследований применительно к различным пространственно-временным масштабам. Детальное изучение отдельных акваторий, например, восточного побережья о. Сахалин или залива Анива (Romanyuk et al., 2017) за последние десятилетия подтвердило правильность выбранного направления исследований.

В **главе 2** перечислены источники исходных данных, которые были использованы при формировании и восстановлении ряда средних за сезон значений ледовитости Охотского моря с 1882 по 2016 г. Описаны методы восстановления многолетнего ряда ледовитости Охотского моря, типизации зим по суровости ледовых условий, разработки критериев районирования Охотского моря по ледово-

географическим признакам и основные принципы работы программного комплекса «ЛЁД».

Формирование и восстановление ряда средних за сезон значений ледовитости Охотского моря с 1882 по 2016 г. основано на различных типах исходных данных. С 1929 по 1960 г. – это материалы попутных судовых наблюдений, приведенные к середине каждого зимнего месяца (Крындин, 1964). Отдельные пропуски в рядах значений ледовитости были восстановлены методом экспертных оценок с учётом выявленной корреляционной зависимости с суммами градусодней мороза (СГДМ).

За период с 1957 по 1992 г. были использованы значения площади ледяного покрова на середину второй декады каждого зимнего месяца, полученные на основе регулярных авиационных наблюдений (Плотников, 1998, Плотников, 2002, Якунин, 2012). Качество значений ледовитости контролировалось путем анализа всей доступной дополнительной информации: архивы снимков в видимом диапазоне с ИСЗ серий «Космос» и «Метеор» с 1967 г.; полетные карты ледовых авиаразведок Сахалинского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды на конкретные даты и др.

Для периода с 1971 по 2016 г. площадь ледяного покрова Охотского моря рассчитывалась с помощью разработанного в Сахалинском государственном университете программного комплекса (ПК) «ЛЁД» (Минервин и др., 2015 б; Свидетельство, 2015). Расчёты значений ледовитости производились в границах морей, определенных Главным управлением навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации (Границы... 2000). Значения ледовитости моря вычислялись в виде отношений площадей, занятых льдом, к площади моря в целом, данные представлялись в процентах (WMO, 1974). Оценка качества расчетных данных проводилась выборочным контролем на основе снимков в видимом диапазоне со спутников Terra/Aqua (MODIS), Suomi NPP (VIIRS), Sentinel-2. Кроме того, период совместного выполнения авиационных и спутниковых наблюдений (1971–1992 гг.) позволил оценить разность значений ледовитости. Среднее расхождение данных составляет не более 7% от площади моря, максимальное – около 11% (Минервин и др., 2015 б).

Значения ледовитости Охотского моря за период с 1882 по 1928 г. были восстановлены на основе уравнения парной степенной регрессии с использованием средних за сезон значений фактической ледовитости с 1929 по 2016 г. и данных СГДМ



на прибрежных ГМС (Охотск, Магадан, Александровск-Сахалинский, Поронайск и Николаевск-на-Амуре).

Сравнительный анализ восстановленного ряда средних за сезон значений ледовитости Охотского моря с 1882 по 2016 г. с данными аномалий глобальной температуры воздуха Национального управления океанических и атмосферных исследований США ([http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs\\_v3/](http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/)) показывает хорошее совпадение характера изменчивости полиномиальных трендов, находящихся в противофазе (рис. 1), что свидетельствует о достоверности восстановленного ряда значений.

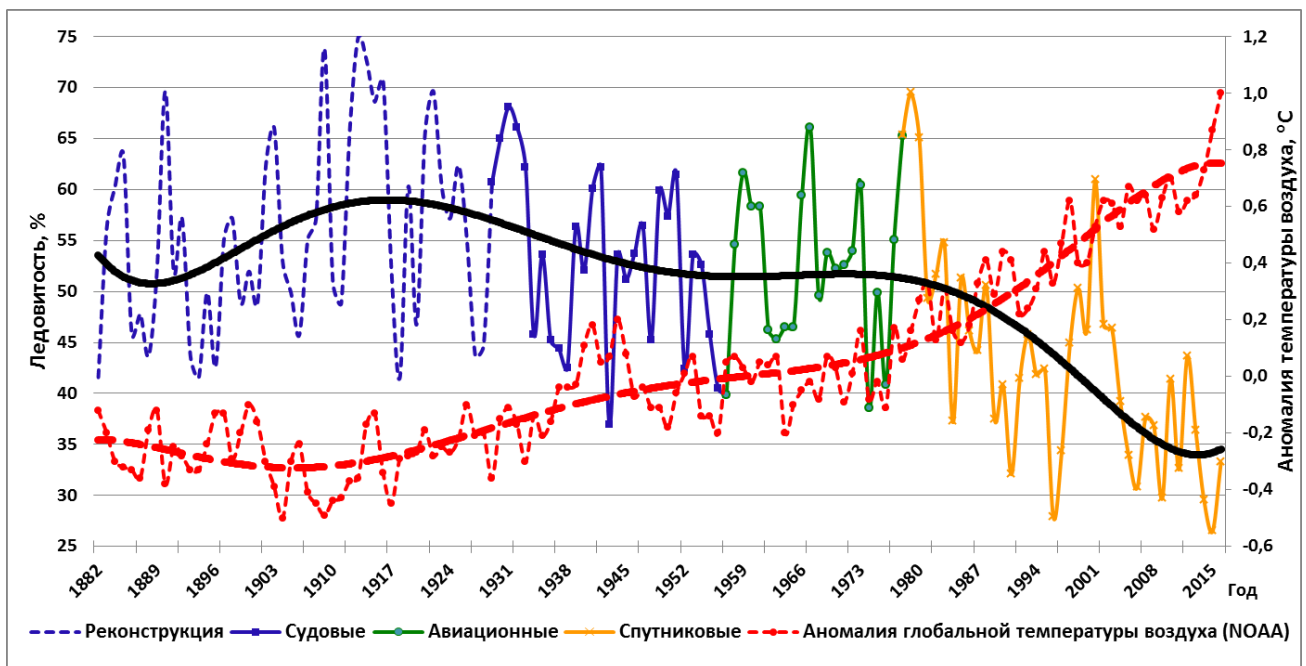


Рисунок 1. Многолетние изменения значений ледовитости Охотского моря и аномалий глобальной температуры воздуха и их полиномиальные аппроксимации

В качестве критерия типизации зим по суровости ледовых условий использовался диапазон изменения значений ледовитости, рассчитанный по формуле:

$$\Delta L = \frac{L_{max} - L_{min}}{k}, \quad (1)$$

где  $L_{max}$ ,  $L_{min}$  – максимальное и минимальное значения ледовитости за весь период наблюдений,  $k$  – количество типов.

Интервалы изменчивости значений ледовитости для каждого типа определялись следующим образом:

$$\text{- экстремально суровый: } L_{min} + 4\Delta L \leq L_5 \leq L_{max}; \quad (2)$$

$$\text{- суровый: } L_{min} + 3\Delta L \leq L_4 \leq L_{min} + 4\Delta L; \quad (3)$$

$$\text{- умеренный: } L_{min} + 2\Delta L \leq L_3 \leq L_{min} + 3\Delta L; \quad (4)$$

$$\text{- мягкий: } L_{min} + \Delta L \leq L_2 \leq L_{min} + 2\Delta L; \quad (5)$$

$$\text{- экстремально мягкий: } L_{min} \leq L_1 \leq L_{min} + \Delta L. \quad (6)$$

При анализе временных рядов была проведена аппроксимация выделенных периодов линейными функциями вида:  $y = ax + b$ , с использованием условия метода наименьших квадратов:

$$\sqrt{\sum_{i_{min}}^{i_{max}} (y_i^* - y_i)^2} \rightarrow \min, \quad (7)$$

расчёт линейных трендов и количественная оценка схождения временных изменений для пар рядов методом линейной регрессии с использованием коэффициентов корреляции:

$$r = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}. \quad (8)$$

Статистическая значимость тренда оценивалась исходя из величины коэффициента корреляции и длины выборок путём статистической проверки нулевой гипотезы  $r = 0$  (отношение величины коэффициента корреляции для выборки к его критической величине при уровне доверительной вероятности 95%).

Для анализа изменчивости временного ряда рассчитывались аномалии значений ледовитости, вычисленные относительно стандартного опорного периода 1961–1990 гг. (WMO, 2017). Анализ многолетнего хода аномалий значений ледовитости осуществлялся с помощью метода интегральных кривых, которые рассчитывались путем последовательного алгебраического суммирования их величин (Гирс, Кондратович, 1978).

**В разделе 2.2.3** обосновываются принципы и критерии районирования Охотского моря по ледово-географическим признакам.

Особенности формирования ледовых условий и различия характеристик ледяного покрова Охотского моря на таксономическом уровне как для всего моря, так и для отдельных его регионов позволили сформулировать идеологию нового подхода к изучению ледового режима и легли в основу разработки критериев для иерархического районирования ледяного покрова (Моделирование... 2016; Минервин и др., 2015 а). Стоит отметить, что может быть создано столько различных вариантов районирования Охотского моря, сколько существует целевых установок (Карелин, 1956). В данном случае основной целью выполненного районирования являлось выявление новых черт ледового режима с учетом ледово-географических особенностей моря и циркуляции атмосферы.

В результате выполненного районирования акватория Охотского моря была разделена на три таксономических уровня. Первый иерархический уровень (рис. 2) включает в себя северо-западный (432,3 тыс. км<sup>2</sup>), северо-восточный (592,1 тыс. км<sup>2</sup>) и южный (578,8 тыс. км<sup>2</sup>) регионы. Выделены они преимущественно по климатическим факторам, главным из которых служит широтное зонирование. При условном подразделении акватории по широте граница, разделяющая Охотское море на северную и южную части (т. е. практически пополам), проходит в среднем по 51°30' с.ш.

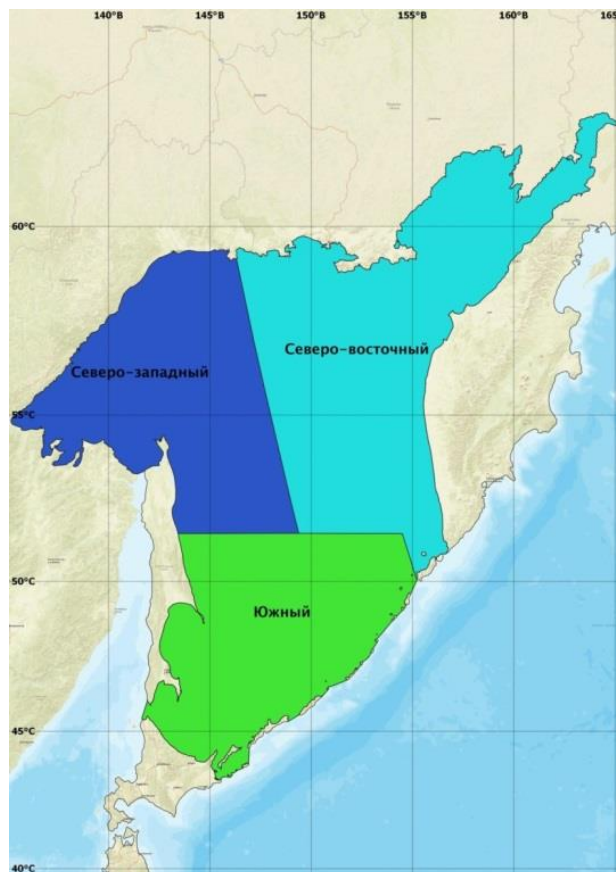


Рисунок 2. Подразделение по ледово-географическим признакам делит Охотское море на три региона – северо-западный, северо-восточный и южный

Второй фактор обусловлен характером циркуляций в атмосфере – это поступление холодных воздушных масс на акваторию моря, которое происходит по двум основным направлениям: из района Полюса холода Северного полушария (район с. Оймякон в Якутии) и из районов восточной Арктики (рис. 3). Характеристики этих воздушных масс существенно различаются (табл. 1), что обуславливает значительные различия условий генерации льда в северо-западном и северо-восточном регионах Охотского моря (Пищальник и др., 2017).

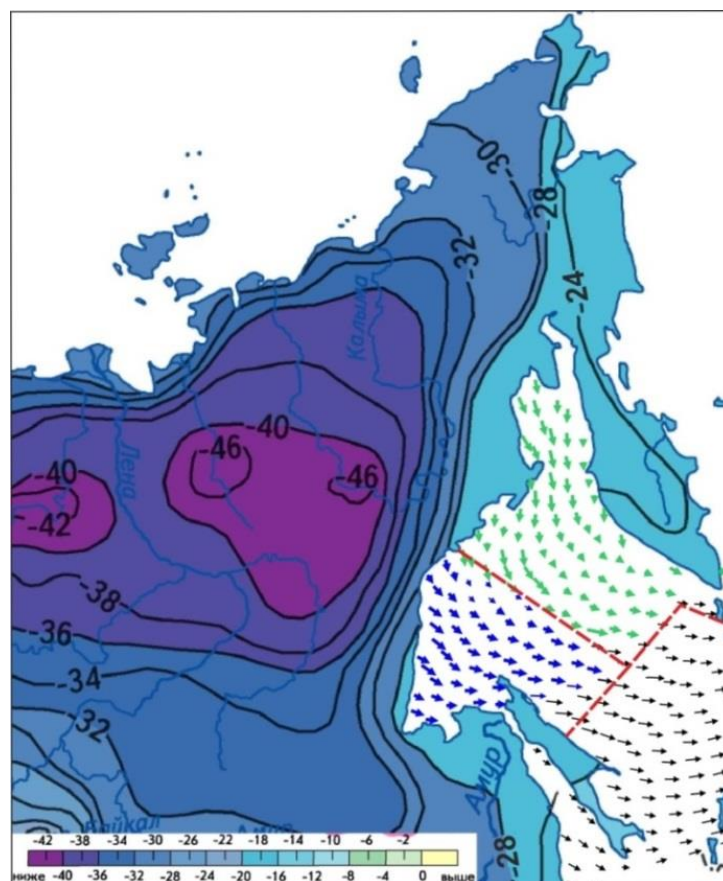


Рисунок 3. Средняя приземная температура воздуха января и векторы результирующего ветра зимой над Охотским морем на основе данных ECMWF, 1991–1998 гг.

В таблице 1 представлены средние за период с 1981 по 2010 г. значения СГДМ для групп ГМС, относящихся к различным регионам Охотского моря. Видно, что в северо-западный регион за всю зиму поступает 44% (-2503 °С) всего накопленного холода. В северо-восточном регионе за холодный период времени в среднем накапливается >34% (-1963 °С). В южном регионе моря отмечается наименьшее значение СГДМ, которое составляет 22% (-1257 °С).

Таблица 1. Средние за период 1981–2010 гг. значения СГДМ для групп ГМС, относящихся к различным регионам Охотского моря

| Северо-западный регион |              | Северо-восточный регион |       | Южный регион  |       |
|------------------------|--------------|-------------------------|-------|---------------|-------|
| Охотск                 | -2748        | Магадан                 | -2240 | А-Сахалинский | -1687 |
| Николаевск-на-Амуре    | -2547        | Ича                     | -1354 | Поронайск     | -1643 |
| Аян                    | -2236        | м. Алевина              | -1609 | м. Терпения   | -1150 |
| Б. Шантар              | -2480        | Брохово                 | -2647 | м. Крильон    | -546  |
| СРЕДНЕЕ                | <b>-2503</b> | <b>-1963</b>            |       | <b>-1257</b>  |       |

Таким образом, северная половина моря включает два крупномасштабных таксона: **северо-западный** и **северо-восточный** со средним значением СГДМ - 2503 и -1963 °С соответственно (Минервин и др., 2015 а).

Помимо упомянутых двух основных воздушных потоков, под воздействием которых происходит формирование северо-западного и северо-восточного массивов льда и осуществляется их дрейф, дополнительным аргументом необходимости их разделения служат гидрологические условия.

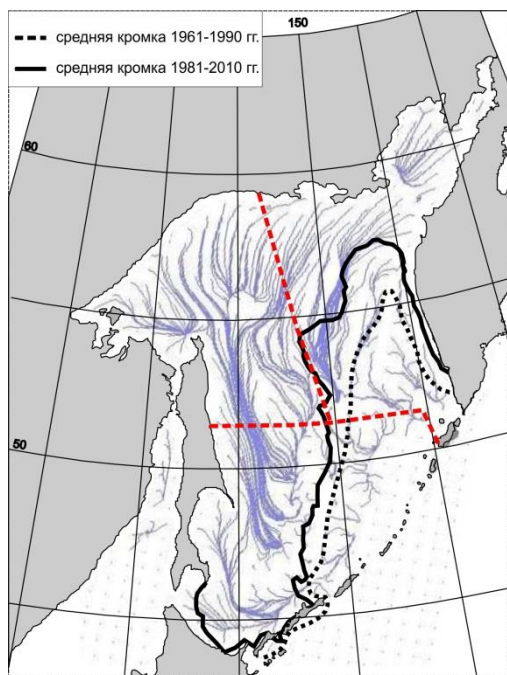


Рисунок 4. Осреднённый дрейф льда (Enomoto et al., 2003) и среднее положение кромок льда в разные периоды

На карте-схеме, построенной японскими исследователями по результатам наблюдений спутникового пассивного микроволнового радиометра (рис. 4), приведены усреднённые траектории дрейфа ледяного покрова за 1993–2001 гг. (Enomoto et al., 2003). Они не противоречат расчётной схеме дрейфа льда в Охотском море, построенной за 1957–1960 гг. Л.П. Якуниным (Якунин, 1979). В 1960-е годы на фоне повышенных значений ледовитости моря значительные объёмы льда из северо-восточного региона проникали в северо-западный и частично в южный регионы. Западно-Камчатское течение, которое относительно окружающих его вод является тёплым, на участке от 51 до 55° с.ш. разделяет лёд на два

самостоятельных массива. В современный период лёд, образующийся в северо-восточном регионе моря, практически не поступает в северо-западный и южный регионы. Кроме того, в условиях глобальной тенденции увеличения температуры воздуха в Охотском море произошло смещение среднего местоположения кромки льда, рассчитанной относительно климатической нормы 1961–1990 гг. (Пищальник и др., 2016): в северном и западном направлениях на 50–70 миль, в восточном – на 15–20 миль. В начале XXI в. среднее положение кромки ледяного покрова от 51 до 55° с.ш. фактически стало естественной границей (рис. 2), разделяющей северо-западный и северо-восточный массивы льда, что и служит основанием для их отдельного изучения (Минервин и др., 2015 а).

Третий крупномасштабный таксон – **южный регион** (рис. 2) Охотского моря. Он расположен в другом климатическом поясе и является естественной ловушкой для льда, образованного преимущественно в северо-западном регионе. Продолжительность периода дрейфа льда от северных до южных границ Охотского моря, в зависимости от района его образования, варьируется от двух до трех месяцев. Во время дрейфа толщина льда постоянно растет под воздействием термических и динамических факторов (Якунин, Плотников, 1998; Enomoto et al., 2003; Пищальник и др., 2009). В результате формируются две отличительные черты ледового режима Охотского моря: первая – увеличение толщины ледяного покрова в море с севера на юг; вторая – отсутствие на большей части акватории моря льда старше трех месяцев (кроме отдельных районов, где в результате особенностей орографии береговой черты формируются условия для задержки дрейфующего льда, которые можно назвать «ледовыми ловушками») (Минервин и др., 2015; Пищальник и др., 2017).

Регионы первого уровня иерархической классификации также по ледово-географическим признакам подразделяются на ледовые районы второго уровня. В них могут быть выделены синоптические процессы и явления с пространственными масштабами 50–500 тыс. км<sup>2</sup>. Третий иерархический уровень – ледовые зоны – имеют пространственный масштаб 5–50 тыс. км<sup>2</sup> и соответствуют сезонному и, частично, синоптическому временным масштабам.

**В разделе 2.2.4** дается описание основных принципов работы программного комплекса «ЛЁД». В качестве исходных данных программный комплекс использует пентадные карты-схемы ледяного покрова, которые создаются на основе данных дистанционного зондирования Земли и публикуются в свободном доступе на сайте Japan Meteorological Agency. Т. к. технические возможности спектрорадиометров, установленных на космических аппаратах, постоянно расширяются, в блок ввода входных данных был заложен принцип универсальности, позволяющий усваивать исходную информацию за различные временные периоды. Помимо вычисления общей и частной сплоченности массива льда обязательным условием при разработке комплекса являлась возможность расчета площади льда для районов различных иерархических уровней (Минервин и др., 2015 а). Данная задача была решена в двух вариантах, позволяющих выполнять расчеты параметров ледяного покрова в районах с фиксированными и произвольными границами.

Для ледовых районов с фиксированными границами была создана цветовая маска. Площади районов корректно вычислялись с помощью геоинформационных систем (ArcMap и MapInfo) на крупномасштабных картах, после чего для каждого района была определена средняя площадь пикселя. Эти данные были заложены в программу и использовались для пересчета количества пикселей в площадь льда. Расчёт площади льда в районах с произвольно заданными границами выполняется при помощи специального модуля, в котором предусмотрена возможность составления произвольной карты районирования. Результаты расчетов для каждой сезонной серии карт-схем ледовой обстановки автоматически записываются в многостраничную таблицу в формате Microsoft Excel, ранжированные по градациям сплоченности льда, районам и т. д.

В главе 3 представлен анализ динамики аномалий значений ледовитости Охотского моря, вычисленных относительно стандартного опорного периода 1961–1990 гг. (WMO, 2017). Выделены долгопериодные колебания площади ледяного покрова, анализ которых позволил определить, что в конце 1970-х произошел переход к современному этапу – периоду потепления – который характеризуется устойчивым понижением ледовитости Охотского моря и увеличением температуры воздуха в Северном полушарии (Доклад... 2014, 2019).

Показано, что в сформированном ряду значений ледовитости Охотского моря выделяются периоды с положительной (1902–1922 гг. и 1958–1979 гг.) и отрицательной (1882–1901 гг., 1923–1957 гг. и 1980–2016 гг.) тенденциями изменения значений ледовитости, продолжительность которых варьирует от 20 до 35 лет. Последний период сокращения площади морского льда совпадает с современным периодом потепления и длится 38 лет (рис. 5). Тенденция сокращения ледовитости Охотского моря с 1882 по 2016 г. составляет 1,3% за 10 лет, а размах межгодовых колебаний достигает более 50%. При этом ледовый сезон 2015 г. являлся самым малоледовитым (средняя ледовитость за сезон 26,5%) за всю историю инструментальных наблюдений с 1929 г. Тенденция сокращения площади ледяного покрова за период с 1979 по 2016 г. составляет 4,7% за 10 лет.



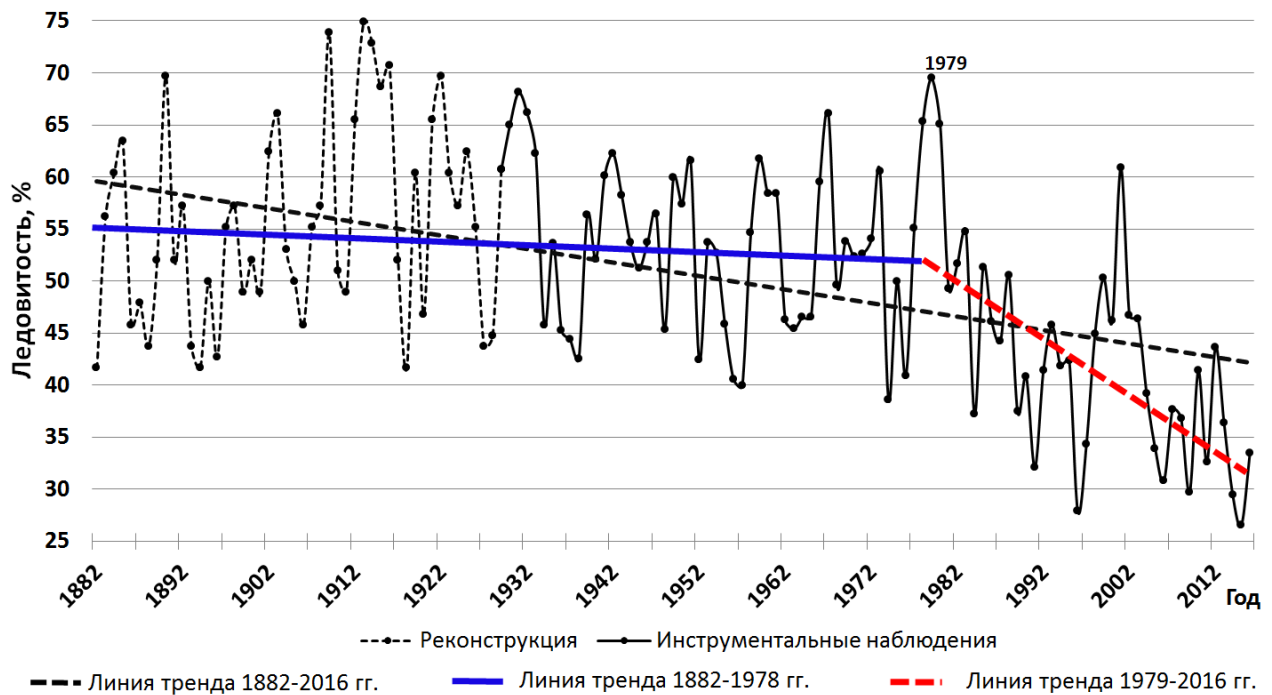


Рисунок 5. Межгодовая изменчивость средних за сезон значений ледовитости Охотского моря и линейные тренды для различных периодов времени

На интегральной кривой (рис. 6) отчетливо выделяются периоды накопления положительных (с 1882 по 1901 г. и с 1923 по 1979 г.), резкого повышения (с 1902 по 1922 г.) и понижения (с 1980 по 2016 г.) значений аномалий ледовитости, которые совпадают с выделенными ранее долгопериодными колебаниями. Для периодов относительно стабильного состояния ледяного покрова характерно чередование 3–4-летних периодов повышения и понижения значений аномалий ледовитости с абсолютными значениями до 10%. При резких изменениях интегральной кривой наблюдалось двукратное увеличение абсолютных значений аномалий и увеличение периодов их колебаний до 5–6 лет. На этом фоне выделяются экстремально ледовитые зимы (1909, 1913, 1914 гг.) и экстремально малоледовитые зимы (1996, 2006, 2009, 2014 и 2015 гг.), когда значения аномалии ледовитости превышали 20%. Следует заметить, что начиная с 1984 г. в межгодовой изменчивости аномалий ледовитости положительные аномалии практически отсутствуют (за исключением ледового сезона 2000/01 гг.) (рис. 6).



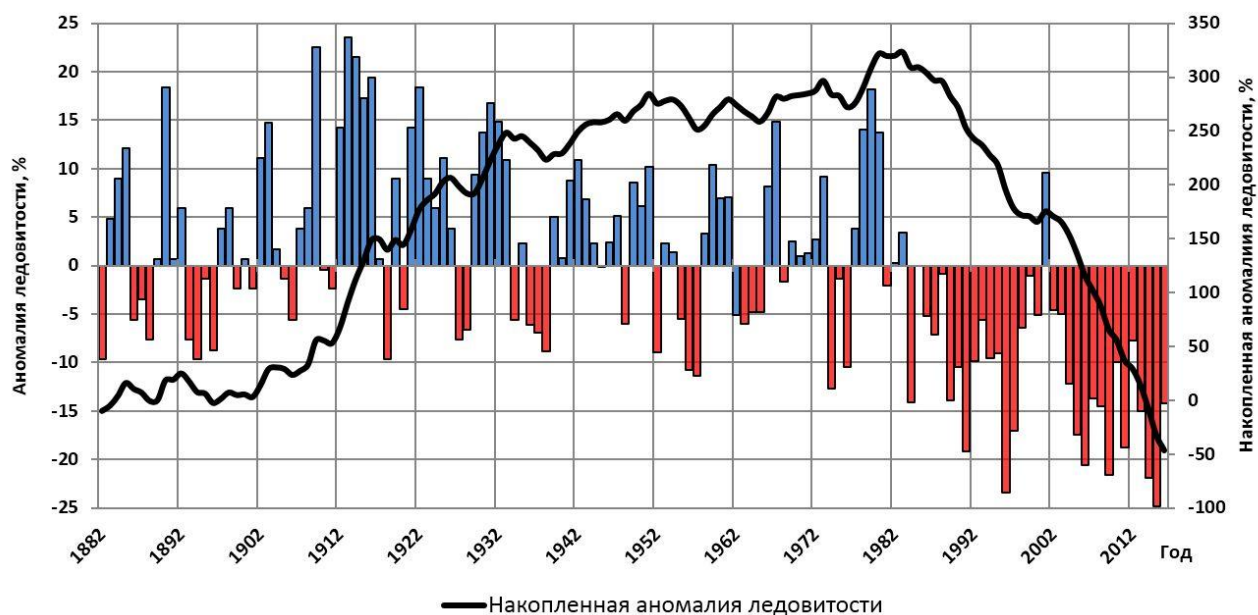


Рисунок 6. Интегральная кривая аномалий значений ледовитости Охотского моря относительно климатической нормы 1961–1990 гг.

В разделе 3.2 выполнен анализ типизации зим по суровости ледовых условий Охотского моря с 1882 по 2016 г. За весь исследуемый период типы зим распределились следующим образом: экстремально суровые (ЭС) – 13%, суровые (С) – 18%, умеренные (У) – 34%, мягкие (М) – 28% и экстремально мягкие (ЭМ) – 7% (рис. 7 б). Доля ЭС и С типов зим в сумме составила 31%, М и ЭМ – 35%. Максимальная повторяемость С и ЭС зим отмечалась в период резкого повышения ледовитости в 1902–1922 гг. (9%) и в последующий период повышенной ледовитости 1923–1957 гг. (11%). Повторяемость М зим в указанные периоды колебалась от 1 до 8%.

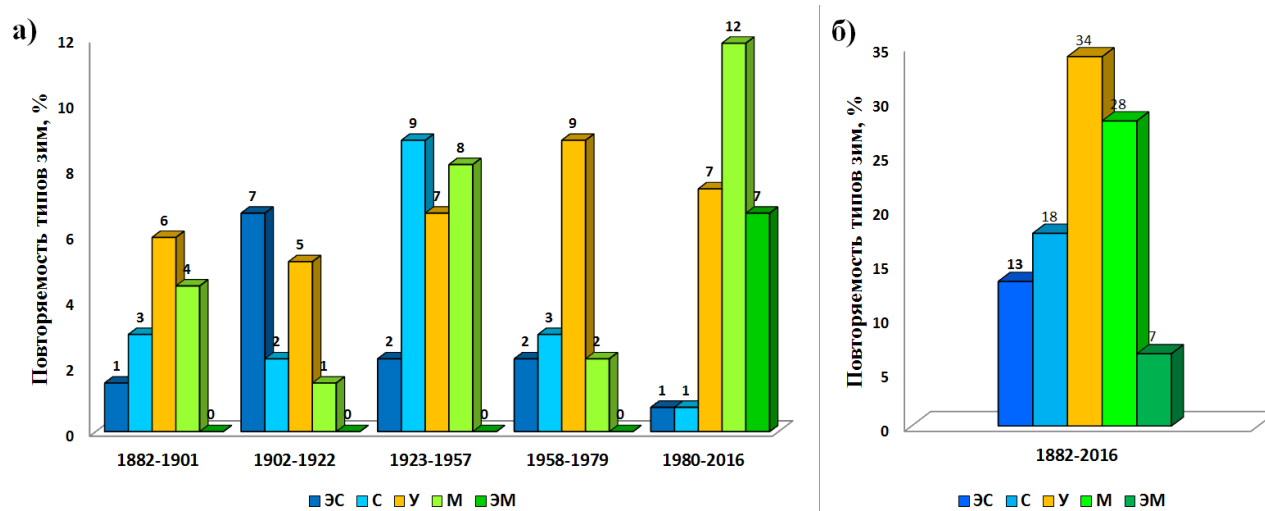


Рисунок 7. Повторяемость типов зим по суровости ледовых условий в Охотском море для различных временных периодов

При любых вариациях ледовитости и достаточной длительности рядов можно выделить характерные типы зим, однако отмечено, что ЭМ зимы (с ледовитостью

менее 34%) как самостоятельный тип начали выделяться только с ледового сезона 1990/91 гг. В условиях глобальной тенденции увеличения температуры воздуха повторяемость М и ЭМ зим возросла более чем вдвое – до 18%, а С и ЭС понизилась до 2% (рис. 7 а), что свидетельствует о глобальных климатических изменениях, происходящих в атмосфере и гидросфере с конца 1970-х гг. (Пономарев и др., 2000; Brohan et al., 2002; Hansen et al., 2006; Груза и др., 2007; Фролов и др., 2007; Гулев и др., 2008; Polyakov et al., 2010; Груза, Ранькова, 2012; Пономарев и др., 2012; Думанская, 2015).

В главе 4 изложены результаты исследования вариаций аномалий значений ледовитости в Охотском море и его отдельных регионах за период 1979–2016 гг. на основе регулярных спутниковых данных. Для выделенного периода сделана типизация зим по суровости ледовых условий для регионов первого иерархического уровня и выполнен их сравнительный анализ. Установлено, что совпадение типов зим за весь исследуемый период во всех регионах наблюдалось в 30% случаев. Данное явление характерно в основном для умеренных (У) (1981, 1987, 1998 и 2012 гг.), экстремально суровых (ЭС) (1979, 1980, 2001 гг.) и экстремально мягких (ЭМ) (2009, 2015 гг.) типов зим. Тем не менее оно может наблюдаться также и в суровые (С) (1999 г.), и в мягкие (М) (2008 г.) зимы. Отсюда следует, что величина ледовитости для всего Охотского моря в большинстве ситуаций не может служить индикатором типов зим в ледовых регионах первого иерархического уровня. В частности, в отдельные годы в различных регионах моря можно наблюдать одновременно все основные типы зим. Стоит отметить, что тип зимы всего Охотского моря в 82% случаев определяется типом зимы его северной части (Пищальник и др., 2017) (табл. 2).

Таблица 2. Повторяемость совпадений типов зим между отдельными регионами Охотского моря (%)

| Регион           | Охотское море | Северо-восточный | Северо-западный | Северный | Южный |
|------------------|---------------|------------------|-----------------|----------|-------|
| Охотское море    | 100           | 74               | 63              | 82       | 51    |
| Северо-восточный |               | 100              | 61              | 76       | 34    |
| Северо-западный  |               |                  | 100             | 82       | 53    |
| Северный         |               |                  |                 | 100      | 46    |
| Южный            |               |                  |                 |          | 100   |

Общая тенденция снижения значений ледовитости в период с 1979 по 2016 г. составляет 17% (значимый на 95% уровне линейный тренд), что соответствует сокращению площади льда на ~270 тыс. км<sup>2</sup>. При этом скорость уменьшения значений

ледовитости (4,7% за 10 лет) в 3 раза превышает средние темпы её сокращения за период времени с 1882 по 2016 г. (Пищальник и др., 2016).

На фоне общего уменьшения значений ледовитости с 1979 по 2016 г. во всех ледовых регионах Охотского моря выделяются следующие тенденции: положительная 1996–2001 гг. (в южном регионе 1991–2001 гг.) и отрицательная 1979–1996 гг. (в южном регионе с 1979 по 1991 г.), 2001–2016 гг., продолжительность которых варьирует от 6 до 15 лет.

Сроки наступления максимума 1979–1980 гг. в ледовых регионах первого иерархического уровня различаются в пределах одного года. Однако наступление следующего максимума значения ледовитости (в 2001 г.) происходит одновременно во всех регионах. Более сложная картина наблюдается в сроках наступления основных минимумов значений ледовитости. Так, в ледовых регионах, определяющих колебания значений ледовитости всего Охотского моря, включая его северную часть, минимальная ледовитость зафиксирована в 1996 г., в то время как в южном регионе такое событие отмечено в 1991 г.

Сроки наступления абсолютного минимума значений ледовитости в регионах Охотского моря (сезон 2014–2015 гг.) так же, как и максимума (сезон 1979–1980 гг.), наблюдались со смещением на один год. Данное обстоятельство еще раз указывает на то, что в формировании ледовитости северо-западного и северо-восточного регионов основную роль играют циркуляции атмосферы и водных масс с различными гидрометеорологическими характеристиками. Отмеченные временные различия могут быть обусловлены флуктуациями центров действия атмосферы в Азиатско-Тихоокеанском регионе.

Учитывая установленную зависимость чередования минимумов и максимумов значений ледовитости в Охотском море, логично предположить, что с 2016 г. формируется положительная тенденция увеличения площади ледяного покрова, которая продлится до 2022 г. ( $\pm 1$  год) с максимальным значением ледовитости на уровне ~52–58%. Данное предположение не противоречит расчётам, выполненным методом последовательных спектров (Пищальник и др., 2011), согласно которым рост площади ледяного покрова должен произойти в ледовые сезоны 2021 и 2022 гг.

**В разделе 4.3** рассмотрены особенности сезонного хода ледовитости в ледовых регионах первого иерархического уровня Охотского моря в различные типы зим. Практически полное заполнение акватории льдом (более 95%) характерно только для северо-западного региона в суровые и умеренные зимы. Период времени, когда

максимальное значение ледовитости превышает 90% общей площади региона, составляет 20–30 сут. Максимальное заполнение льдом северо-восточного региона – на 81%, южного – на 68%, а всего моря в целом – на 80% (рис. 8).

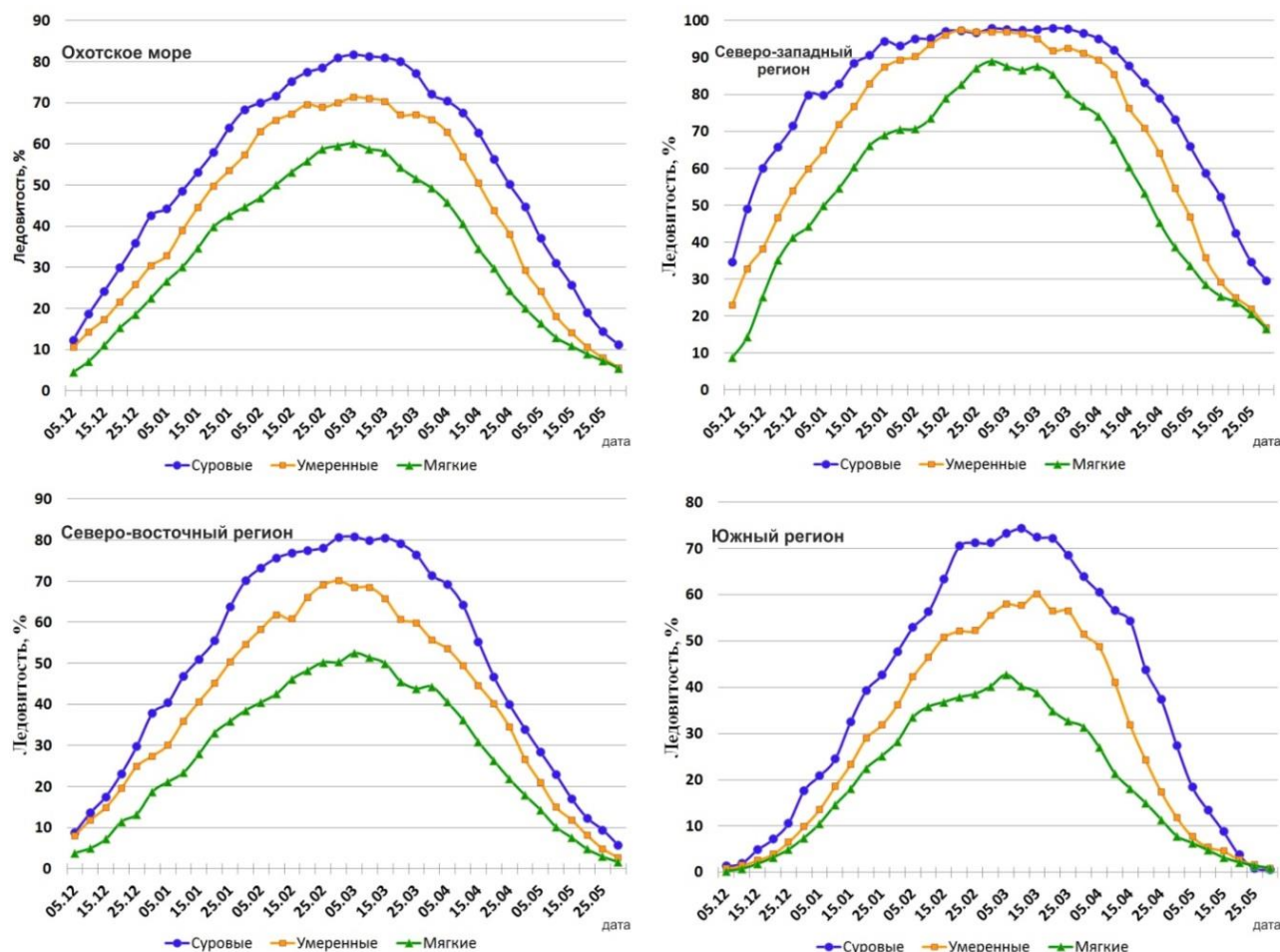


Рисунок 8. Сезонная изменчивость значений ледовитости в Охотском море и его регионах

Изучены особенности сезонного хода ледовитости Охотского моря (рис. 9), вычисленные для стандартного опорного периода (1961–1990 гг.) и стандартной климатической нормы (1981–2010 гг.). На стадии развития ледовых процессов (декабрь – январь) в условиях глобальной тенденции увеличения температуры воздуха наблюдается запаздывание сроков достижения одинаковых значений ледовитости на 10 сут., а на стадии разрушения – опережает на 15 сут.

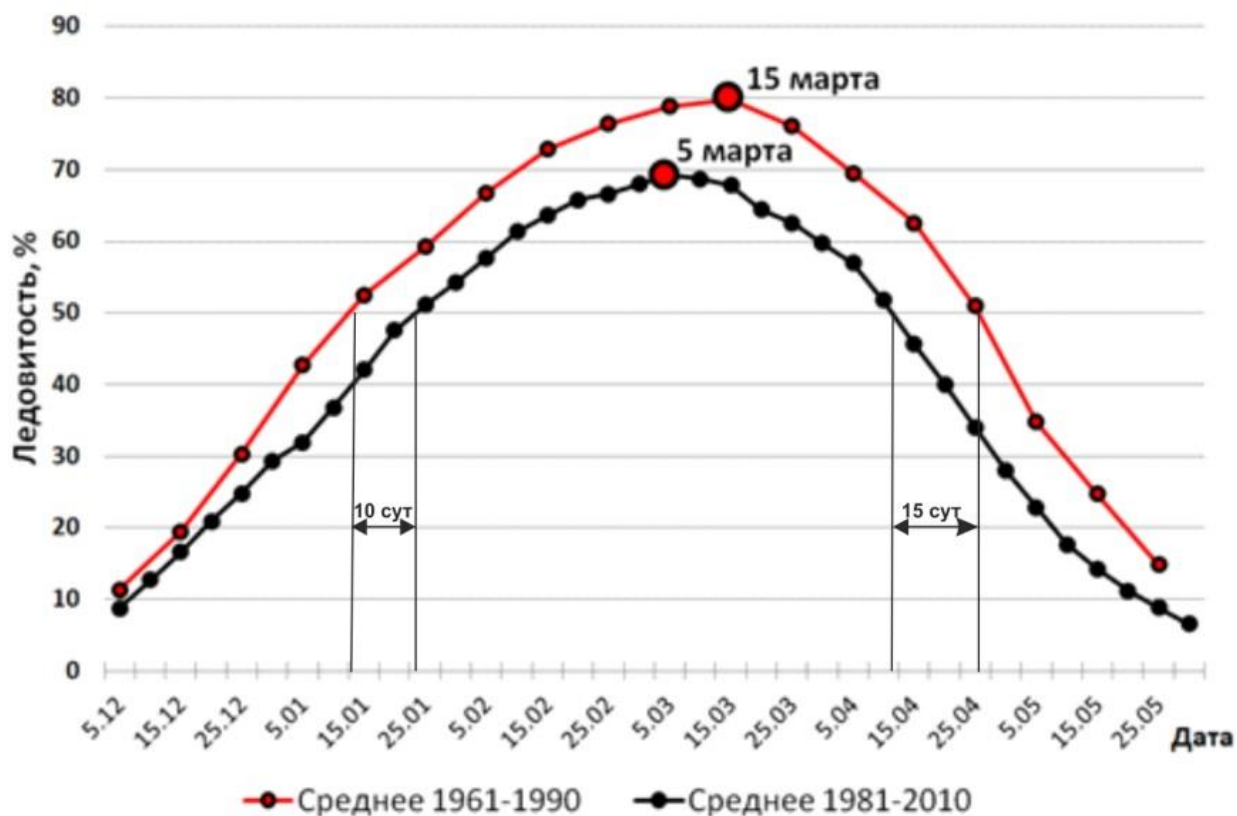


Рисунок 9. Нормы сезонных значений ледовитости в Охотском море, рассчитанные для периодов 1961–1990 и 1981–2010 гг.

Таким образом, наступление максимума площади ледяного покрова в годовом ходе в середине сезона сместилось в сторону более ранних сроков в среднем на одну декаду. Площадь ледяного покрова в Охотском море на разных стадиях его развития в современный период уменьшилась в среднем на 100–200 тыс. км<sup>2</sup> относительно стандартного опорного периода 1961–1990 гг. Изменения сроков начала и окончания ледового сезона подтверждаются результатами наблюдений на гидрометеорологических станциях (Думанская, 2013).

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. На основе данных натурных наблюдений за площадью ледяного покрова сформирован ряд значений ледовитости Охотского моря с месячной дискретностью с 1929 по 2016 г. Восстановлены средние за сезон значения ледовитости за период с 1882 по 1928 г., и впервые получен ряд значений площади морского льда Охотского моря за 135 лет.

2. Выявлена общая тенденция снижения значений ледовитости Охотского моря за период с 1882 по 2016 г., которая составляет 1,3% за 10 лет, при этом размах колебаний межсезонной площади морского льда может достигать более 50%.

Понижение линейного тренда значений ледовитости с 1979 по 2016 г. является наиболее продолжительным (38 лет) и интенсивным (4,7% за 10 лет) за 135 лет. Минимальная величина среднего за сезон значения ледовитости за всю историю инструментальных наблюдений зафиксирована в ледовом сезоне 2014/15 гг. и составляет 26,5%.

3. Пространственно-временная изменчивость элементов ледового режима в различных регионах Охотского моря существенно различается. Основной регион генерации льда – северо-западный, который является наиболее ледовитым: в суровые и умеренные зимы он заполняется льдом более чем на 95%. В северо-восточном регионе процессы ледообразования происходят менее интенсивно: в суровые зимы этот регион покрывается льдом не более чем на 90%. В южном регионе генерация ледяного покрова минимальна, но это естественная ловушка для льда, сформированного в северной части моря. За счёт дрейфа ледяного массива с севера на юг, под воздействием гидрометеорологических и динамических факторов, здесь концентрируются тяжелые льды с высокими адгезионными свойствами. В суровые зимы максимальное значение ледовитости этого региона достигает 80%.

4. Полное совпадение типов зим в районах первого иерархического уровня происходит только на краях классификационной шкалы и за последние 38 лет наблюдалось в 30% случаев. Тип зимы всего Охотского моря в 82% случаев определяется типом зимы его северной части. Экстремально мягкие зимы, как самостоятельный тип, начали выделяться только с 1991 г.

5. Дата наступления сезонного максимума значения ледовитости моря в условиях глобальной тенденции увеличения температуры воздуха сместилась на одну декаду раньше даты, которая была определена для периода 1961–1990 гг. (5 и 15 марта соответственно). Начальная стадия развития ледовых процессов (декабрь – январь) запаздывает на 10 сут., а разрушения – опережает на 15 сут.

6. Выявлена зависимость чередования максимумов и минимумов значений ледовитости Охотского моря в условиях глобальной тенденции увеличения температуры воздуха: переход от минимального значения ледовитости к максимальному составляет  $6 \pm 1$  год, переход от максимального значения ледовитости к минимальному –  $16 \pm 1$  год. Следовательно, можно предположить, что очередной максимум значения ледовитости следует ожидать в 2021–2022 гг., а величина его, с учетом общей тенденции понижения, составит ~52–58%.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи, опубликованные в научных изданиях из перечня ВАК:

1. Романюк В.А., Журавлев Г.Г. Сравнительная оценка и сопоставимость спутниковых и авиационных данных по ледовитости Охотского моря // Лёд и Снег. – 2013. – № 4 (124). – С. 113–118.
2. Журавлев Г.Г., Романюк В.А. Оценка точности расчета ледовитости Охотского и Японского морей по данным дистанционного зондирования Земли и авиационных наблюдений // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 368. – С. 159–165.
3. Минервин И.Г., Романюк В.А., Пищальник В.М., Трусков П.А., Покрашенко С.А. Районирование ледяного покрова Охотского и Японского морей // Вестник РАН. – 2015 а. – Т. 85. – № 3. – С. 209–217.
4. Пищальник В.М., Романюк В.А., Минервин И.Г., Батухтина А.С. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. // Изв. ТИНРО. – 2016. – Т. 185. – С. 228–239.
5. Пищальник В.М., Минервин И.Г., Романюк В.А. Анализ изменений ледового режима в отдельных районах Охотского моря в период потепления // Вестник РАН. – 2017. – Т. 87. – № 5. – С. 429–440.

Романюк Валерий Анатольевич

ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ ОХОТСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОЙ  
ТЕНДЕНЦИИ УВЕЛИЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Специальность 25.00.28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Подписано в печать 07.10.2019. Бумага «Mondi».  
Гарнитура «Times New Roman». Формат 60х841 / 16.  
Тираж 100 экз. 1,2 усл. п. л. Заказ № 835-19.

---

Сахалинский государственный университет  
693008, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, каб. 32.  
Тел. (4242) 45-23-16, факс (4242) 45-23-17.  
E-mail: izdatelstvo@sakhgu.ru,  
polygraph@sakhgu.ru