

УДК 551.467(265.546)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА ТАТАРСКОГО ПРОЛИВА

**Дорофеева Дарья Васильевна**  
научный сотрудник НИЛ ДЗЗ СахГУ и РАН  
**Никулина Ирина Владимировна**  
научный сотрудник НИЛ ДЗЗ СахГУ и РАН  
ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет»  
**Романюк Валерий Анатольевич**  
к.г.н., руководитель группы ледовых технологий  
ООО «РН-СахалинНИПИморнефть»  
**Никонов Василий Сергеевич**  
ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет»  
**Никонова Елизавета Викторовна**  
ведущий ГИС-картограф  
ООО «Экологическая компания Сахалина»

**Аннотация:** в работе представлены результаты исследований особенностей элементов ледового режима Татарского пролива, выполненных с применением данных дистанционного зондирования Земли. Рассмотрен внутрисезонный ход ледовитости, приведены ее многолетние вариации с 1882 по 2020 гг., вычислены даты наступления ледовых фаз в различные типы зим в рамках климатической нормы 1991-2020 гг.

**Ключевые слова:** Татарский пролив, ледовитость, дистанционное зондирование Земли, база данных, геоинформационные системы.

## RESEARCH FEATURES OF ICE REGIME IN THE TATAR STRAIT

**Dorofeeva Daria Vasilievna**  
**Nikulina Irina Vladimirovna**  
**Romanyuk Valeriy Anatolievich**  
**Nikonov Vasilyi Sergeevich**  
**Nikonova Elizaveta Victorovna**

**Abstract:** The paper presents the results of a study of the elements of the ice regime of the Tatar Strait, carried out using data from remote sensing of the Earth. The intra-seasonal course of ice coverage is considered, long-term variations in ice

coverage from 1882 to 2020 are given, the dates of the onset of ice phases are calculated in different winter frames of the climatic norm 1991-2020.

**Key words:** Tatar Strait, ice coverage, Earth remote sensing, database, geographic information systems.

### **Введение**

Увеличение среднегодовой температуры воздуха в Северном полушарии способствует формированию устойчивой тенденции снижения площади ледяного покрова замерзающих морей. Снижение запасов нефти и газа на суше делает необходимым проведение разведки и обустройства морских нефтегазовых месторождений. 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 шельф 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 Татарскому проливу, который относится к категории замерзающих морей, что накладывает серьезные ограничения на безопасность выполнения морских операций.

Цель работы – выполнить анализ особенностей ледового режима Татарского пролива на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационных систем (ГИС).

### **Материалы и методы**

Расчет ледовитости в Татарском проливе выполнен на основе электронной базы многолетних данных по ледовому режиму, сформированной в Научно-исследовательской лаборатории дистанционного зондирования Земли Сахалинского государственного университета (НИЛ ДЗЗ) по опубликованным и архивным материалам наблюдений [1].

База данных (БД) НИЛ ДЗЗ представляет собой комплекс гидрометеорологической информации, систематизированной по отдельным разделам и тематикам: метеорологические данные (с 1881 г. по настоящее время); ледовые карты (с 1988 по 2020 г.); космические снимки (с 1979 по н.в.); научная и техническая литература; программный комплекс (ПК).

Специализированный ПК лаборатории включает в себя программное обеспечение (ПО), программные алгоритмы действий, модули, макросы и скрипты для расчета, обработки и автоматической загрузки отдельных гидрометеорологических параметров [2, 3, 4, 5].

БД ежедневно пополняется космическими снимками, принимаемыми с помощью аппаратно-антенного комплекса Orbital Systems и гидрометеорологической информацией, получаемой из открытого доступа в сети интернет. Для удобства пользования и управления большими данными на базе НИЛ ДЗЗ разработан тематический геопортал «Ледовитость», позволяющий визуализировать данные, одновременно работать с разноформатными данными, проводить их выборку и комплексный анализ [6].

Значения ледовитости Татарского пролива 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 суммы градусодней мороза (СГДМ) на прибрежных гидрометеорологических станциях [7]. Сформированный ряд межгодовых вариаций ледовитости Татарского пролива с 1882 по 2020 гг. был сглажен методом Кайзера-Бесселя и с помощью метода наименьших квадратов построены его кусочно-линейные тренды [8].

Типизация зим рассчитывалась по аномальности ледовых условий с применением критерия  $0,8 \sigma$  ( $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение), предложенного В.А. Спичкиным [9]: экстремально суровая ( $ЭС \geq 1,2 \sigma$ ), суровая ( $+0,4 \sigma \leq С < +1,2 \sigma$ ), умеренная ( $-0,4 \sigma < Н < +0,4 \sigma$ ), мягкая ( $-1,2 \sigma < М \leq -0,4 \sigma$ ) и экстремально мягкая ( $ЭМ \leq -1,2 \sigma$ ).

Статистические расчёты выполнялись на основе данных спутниковых микроволновых радиометров за вариациями площади ледяного покрова с пентадной дискретностью с 1991 по 2020 гг. (номинальное пространственное разрешение до 4 км) [10]. Основное преимущество микроволнового зондирования заключается в том, что результаты наблюдений за состоянием ледяного покрова не зависят от погодных условий и освещённости.

На основе архива ежедневных данных мультиспектральной системы анализа спутниковых наблюдений MASIE [11] за период с 2006 по 2020 гг. (номинальное пространственное разрешение до 1 км), выполнялось уточнение дат наступления основных ледовых фаз (в настоящее время продолжительность ряда наблюдений MASIE не достаточна для расчета ледовых характеристик в рамках климатической нормы). Площадь ледяного покрова рассчитывалась с помощью программного комплекса «ЛЁД» [2, 4], программного обеспечения

«M-Processor» [5]. Ошибка расчета площади ледяного покрова не превышает +/- 1-2% [12; 13].

Для верификации и анализа расчётных данных привлекался архив спутниковых снимков ледяного покрова в видимом диапазоне (искусственные спутники Земли серий NOAA, Метеор, Космос, TERRA, AQUA, NPP), радиолокационные снимки (Sentinel- 1), атласы льдов и границ распространения льдов с различными характеристиками [14], а также результаты анализа комплексных гидрометеорологических исследований, проведённых в разное время в Японском море и опубликованные в работах [15, 16].

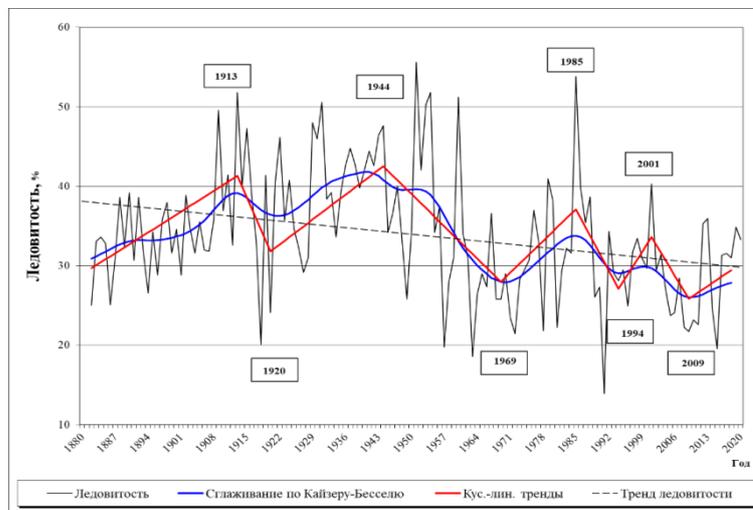
Вся терминология и понятия о ледовых явлениях, используемые в данном отчёте, соответствуют «Международной символике для морских ледовых карт и номенклатуре морских льдов» [17].

### **Особенности ледового режима в акватории Татарского пролива**

Преобладающие в зимний период ветра северных румбов (зимний муссон) и макрорельеф берегов создают в Татарском проливе эффект аэродинамической трубы. Поступающие в пролив холодные воздушные массы, с одной стороны, поддерживают процессы интенсивного льдообразования на всей акватории пролива, с другой – обуславливают генеральный дрейф массива льда в южном и юго-западном направлениях. В период работы зимнего муссона вдоль северо-западного побережья пролива формируется полынья, в которой происходит непрерывная генерация льда. При средней скорости дрейфа 23-25 см/с вновь образовавшийся в северной части лёд может достигнуть южной границы пролива в течение месяца, при этом толщина его будет постоянно увеличиваться. Средняя толщина льда в открытых районах Татарского пролива составляет около 40 см и редко превышает 60-80 см. Однако, при прохождении глубоких барических образований в достаточно узком проливе вдоль отдельных участков побережья нередко формируется припай из набивного льда. В процессе разрушения такого припая образуются обломки и отдельные поля толщиной от 200 до 400 см [18; 15; 1].

Поступающий в южную часть пролива лёд активно разрушается при взаимодействии с теплыми водами западной ветви Цусимского течения, образуя отчётливо выраженную кромку, с характерным прогибом над глубоководной котловиной по центру пролива в направлении к м. Ламанон. В марте, с началом перестройки атмосферной циркуляции, процессы льдообразования постепенно замедляются и молодой лёд исчезает. В

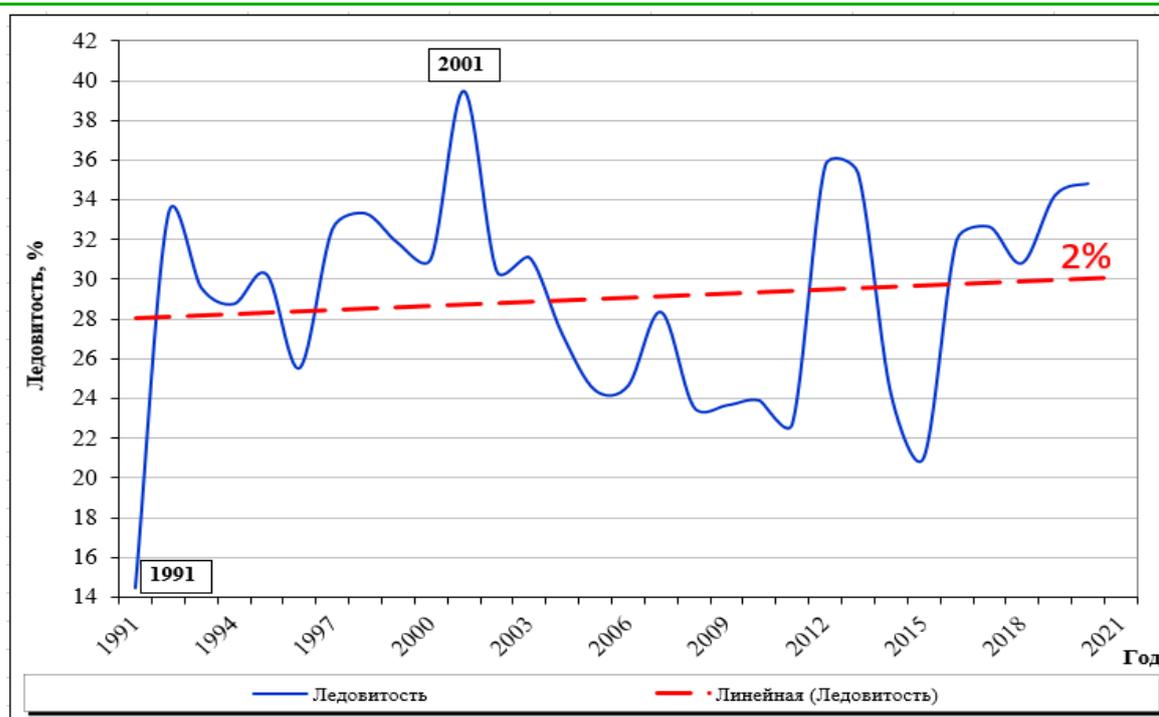
центральной части пролива в этот период преобладают однолетние льды, которые нередко блокируют залив Советская Гавань. В конце периода разрушения (апрель) в проливе остается только однолетний лёд,



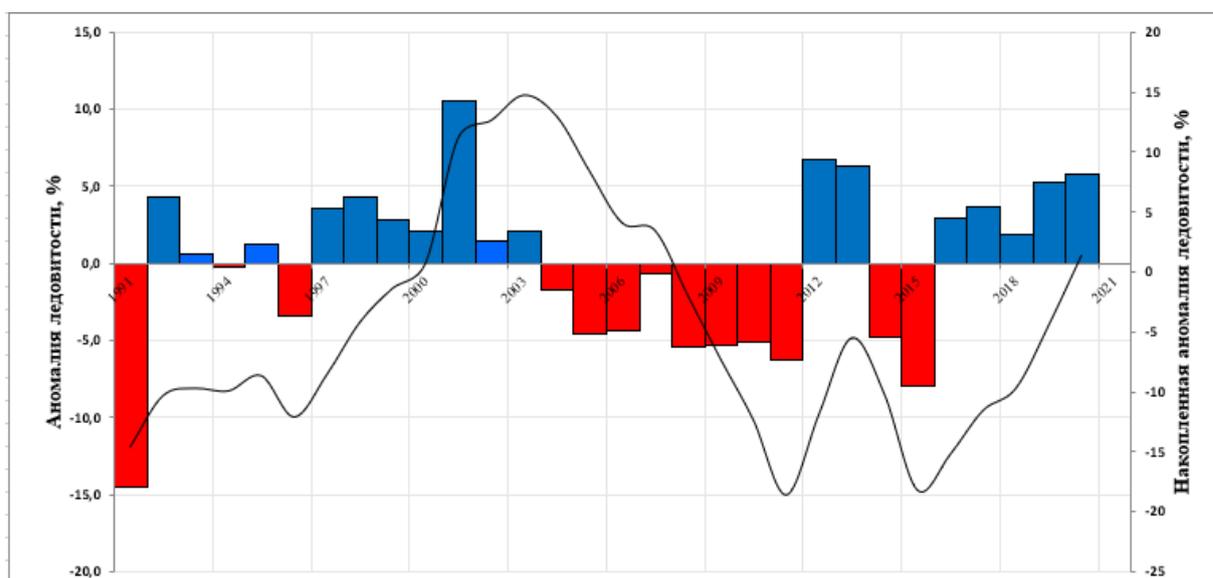
**Рис. 1. Многолетние вариации ледовитости в Татарском проливе с 1882 по 2020 г.**

сформированный из разрушенного припая [1].

На графике межсезонных вариаций ледовитости в Татарском проливе за период с 1882 по 2020 гг. (рис. 1) отчётливо выделяются долговременные периоды с положительной (1920–1944, 1969–1985 и 1994–2001 гг.) и отрицательной (1913–1920, 1944–1969, 1985–1994 и 2001–2009 гг.) динамикой, продолжительностью от 7 до 25 лет. Крайние линейные тренды не могут быть корректно определены. При этом наклон общего линейного тренда ледовитости за 138 лет составил 8,8 % (рис. 1). Из чего следует, что сокращение ледовитости Татарского пролива в течение всего исследуемого периода (1882-2020 гг.) происходило со скоростью 0,7% за 10 лет. Проявление общей тенденции понижения ледовитости в современный период потепления в Татарском проливе началось на пять лет позднее – в 1985 г., чем это явление было зафиксировано в Охотском море [19, 1]. В период современного потепления (с 1985 г.) скорость увеличилась более чем вдвое и составила 1,7% за 10 лет.



**Рис. 2. Ледовитость Татарского пролива в период современной климатической нормы**



**Рис 3. Вариации межсезонного хода аномалий ледовитости относительно нормы 1991-2020 в Татарском проливе**

В период современной климатической нормы средняя ледовитость Татарского пролива составила 29%. Общая тенденция увеличения ледовитости за исследуемый период достигла 2% (рис 2). Максимальная ледовитость (около 40%) отмечалась в сезон 2000/01 гг. Ледовый сезон 1990/91 гг. является самым малоледовитым за всю историю наблюдений (с 1929 г.) со значением

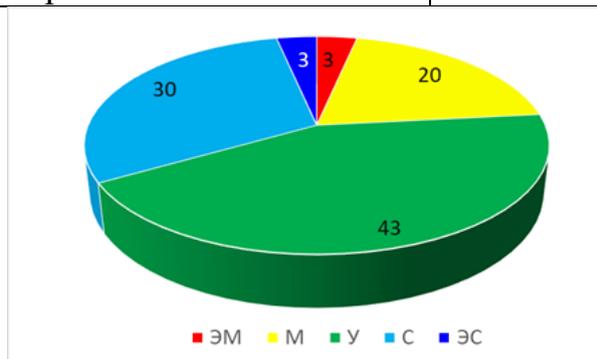
ледовитости порядка 14%. Значительная отрицательная аномалия ледовитости (8%) отмечалась в 2015 г. (рис 3).

Типы зим по суровости ледовых условий распределились следующим образом: экстремально суровые – 3%, суровые – 30%, умеренные – 43%, мягкие – 20%, экстремально мягкие – 3% (рис. 4).

**Таблица 1**

**Типизация зим по суровости ледовых условий в Татарском проливе с 1991 по 2020 гг.**

Тип зимы	Годы
Экстремально суровый	2001
Суровый	1992, 1997, 1998, 2003, 2012, 2013, 2017, 2019, 2020
Умеренный	1993, 1994, 1995, 1996, 1999, 2000, 2002, 2004, 2006, 2007, 2014, 2016, 2018
Мягкий	2005, 2008, 2009, 2010, 2011, 2015
Экстремально мягкий	1991



**Рис.4. Повторяемость типов зим по суровости ледовых условий в Татарском проливе с 1991 по 2020 гг.**

Преобладающим типом зим в проливе являются умеренные зимы (табл. 1). Детальный анализ ранжирования зим по суровости ледовых условий позволил заключить, что максимальная повторяемость суровых типов зим отмечалась в период 2012-2020 гг. (56%), наибольшая повторяемость мягких – в период 2005-2011 гг. (71%).

В таблице 2 приведены расчётные данные о датах наступления ледовых фаз в Татарском проливе. Необходимо отметить, что на фазе ледообразования средние даты первого появления и устойчивого образования льда различаются незначительно – на 3-4 сут., в то время как на фазе разрушения льда эти различия достигают 10 сут. В среднем первое появление ледяного покрова в Татарском проливе происходит в суровые и умеренные зимы 20 ноября, в мягкие – 17 ноября. Разброс дат между ранней и поздней датами первого появления льда (5 ноября и 5 декабря соответственно) составляет 30 сут. Средняя дата устойчивого образования льда приходится: в умеренные зимы на 22 ноября, в суровые на 25 ноября и в мягкие

на 26 ноября. Разница между датами самого раннего и самого позднего устойчивого образования морского льда составляет 40 сут. (5 ноября и 15 декабря соответственно).

Анализ результатов средних дат первого очищения Татарского пролива ото льда позволяет заключить, что раньше всего это событие фиксируется в мягкие типы зим (24 апреля), в суровые зимы первое очищение происходит в среднем на 9 сут. позднее (5 мая), а в умеренные – на 2 сут. (26 апреля).

Разница между датами самого раннего и самого позднего первого очищения акватории от морского льда составляет 45 сут. (10 апреля и 25 мая соответственно). Средняя дата окончательного очищения ото льда для суровых типов зим приходится на 6 мая, мягких – на 28 апреля и умеренных – на 26 апреля.

Таблица 2

**Даты наступления ледовых фаз в Татарском проливе  
в различные типы зим за период с 1991 по 2020 гг.**

Параметр	Тип зимы		
	Суровый	Умеренный	Мягкий
Средняя дата первого появления льда	20.11	20.11	17.11
Ранняя дата первого появления льда	5.11	5.11	10.11
Поздняя дата первого появления льда	10.12	15.12	5.12
Средняя дата устойчивого образования льда	25.11	22.11	26.11
Ранняя дата устойчивого образования льда	10.11	5.11	15.11
Поздняя дата устойчивого образования льда	10.12	15.12	5.12
Средняя дата первого очищения ото льда	5.5	26.4	24.4
Ранняя дата первого очищения ото льда	25.4	10.4	15.4
Поздняя дата первого очищения ото льда	25.5	10.5	5.5

Средняя дата окончательного очищения ото льда	6.5	26.4	28.4
Ранняя дата окончательного очищения ото льда	25.4	10.4	15.4
Поздняя дата окончательного очищения ото льда	25.5	10.5	15.5

Самое раннее окончательное очищение исследуемой акватории ото льда происходит в умеренные типы зим – 10 апреля, самое позднее – 25 мая.

Средняя продолжительность ледового периода в Татарском проливе составляет 162 дня. Самый короткий за последние 30 лет ледовый период зафиксирован зимой 1992/93 гг., когда его продолжительность составила 122 дня. Самым продолжительным был ледовый сезон 2010/11 гг., когда лёд сохранялся на исследуемой акватории на протяжении 187 дней.

При решении комплексного подхода в выявлении зависимости ледовитости от влияния гидрометеорологических условий окружающей среды, выполнялся поиск предикторов для прогноза ледовой обстановки. В исследовании [20, 21] обсуждается зависимость резких изменений ледовитости при усилении циклонической деятельности, сопровождающейся изменением направления ветра, что хорошо согласуется со сменами фаз Луны.

### **Заключение**

В НИЛ ДЗЗ разработан тематический геопортал, позволяющий визуализировать данные, производить предметные выборки и анализ значений интересующих параметров ледового режима. С помощью апробированных методик был выполнен анализ элементов ледового режима Татарского пролива в рамках современной климатической нормы 1991-2020 гг. Установлено, что за последние 30 лет отмечается тенденция увеличения средней ледовитости Татарского пролива со значением 2%. Максимальное значение аномалии ледовитости Татарского пролива составляет 11% (ледовый сезон 2000/01 гг.), минимальное -14% (ледовый сезон 1990/91 гг.).

Расчитаны даты основных ледовых фаз в рамках современной климатической нормы 1991-2020 гг. Анализ многолетних рядов гидрометеорологических параметров с применением статистических методов позволяет перейти к разработке общих прогностических правил и построению

генеральной модели поведения ледовитости, что является предметом наших дальнейших исследований.

### Список литературы

1. Пищальник В.М., Дорофеева Д.В., Минервин И.Г., Шумилов И.В., Никулина И.В. Анализ динамики межгодовых аномалий ледовитости Татарского пролива за период с 1882 по 2018 гг. // Изв. ТИНРО, 2019. – Т. 196. – С. 114-122. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-196.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660472. Программный комплекс для расчета площади ледяного покрова в Охотском и Японском морях по данным ДЗЗ ПК «ЛЁД». Авторы: Пищальник В.М., Бобков А.О., Романюк В.А. Дата гос. регистрации в Росреестре программ для ЭВМ 01 октября 2015 г.

3. Шумилов И.В., Пищальник В.М., Минервин И.Г. О новой версии Программного комплекса «ЛЁД» // ИнтерКарто/ИнтерГИС 23. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий в условиях глобальных изменений климата: Материалы Междунар. конф. – Издательство МГУ, 2017, ISSN 2414-9179. – Т. 2. – С. 250–256. – DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-250-256.

4. Шумилов И.В., Минервин И.Г., Пищальник В.М., Терентьев Н.С. Разработка программного модуля для вычисления кромок ледяного покрова по данным дистанционного зондирования Земли // ИнтерКарто/ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. – Т. 24, ч. 2. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. – С. 171-177.

5. Никонов В.С. Алгоритм обработки площадей льда по данным дистанционного зондирования Земли (на примере MASIE-NH), Материалы докладов III Национальной научно-практической конференции с международным участием «Нефтегазовый комплекс: проблемы и решения», Южно-Сахалинск, 2-4 декабря 2020.

6. Никулина И.В., Никонова Е.В., Романюк В.А., Дорофеева Д.В. Организация хранения и обработки пространственных гидрометеорологических данных на основе веб-геоинформационных платформ / // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 25–27 ноября 2020 г. / ФГБОУ ВО «ИГУ». – Иркутск: Издательство ИГУ, 2020. С. 360-365.

7. Шумилов И.В., Романюк В.А., Пищальник В.М. Восстановление ряда ледовитости Татарского пролива за период с 1882 по 1928 г. // Уч. зап. СахГУ. — 2017. — Вып. 13/14/2016/2017. — С. 55–59.
8. Дорофеева Д.В., Пищальник В.М., Минервин И.Г. и др. Анализ изменчивости векового ряда ледовитости Татарского пролива на основе спутниковых и гидрометеорологических наблюдений с применением ГИС-технологий // ИнтерКарто/ИнтерГИС : мат-лы Междунар. конф. — Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2018. — Т. 24, ч. 2. — С. 46–54. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-46-54.
9. Спичкин В.А. Определение критерия крупной аномалии // Тр. ААНИИ. — 1987. — Т. 402. — С. 15–20.
10. Режим доступа: Japan Meteorological Agency (JMA) <http://ds.data.jma.go.jp>
11. Режим доступа: <http://nsidc.org/data/masie>
12. 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. // Известия ТИНРО. 2016. Т. 185. — С. 228–239.
13. Романюк В.А., Пищальник В.М. Минервин И.Г. Оценка точности результатов расчёта ледовитости Охотского моря по данным Japan Meteorological Agency и National Ice Center // Физика геосфер: XI Всероссийский симпозиум, 9-14 сентября 2019 г., Владивосток, Россия: мат. докл. — Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2019. — С. 170-174. ISBN 978-5-6043211-1-9.
14. Якунин Л.П. Атлас основных параметров ледяного покрова Охотского моря. — Владивосток: ДВФУ, 2012. — 118 с.
15. Якунин Л.П., Ледовые условия/ Л.П. Якунин, В.В. Плотников, А.Г. Петров// Проект «Моря». Гидрология и гидрохимия морей. Том VIII. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. — СПб.: Гидрометеоиздат, — 2003. — С. 348.
16. Плотников В.В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз. — Владивосток: Дальнаука, 2002. — 172 с.
17. WMO Sea-Ice Nomenclature. — Geneva. — 1970. — WMO # 259. — TP. 145. — P. 1. — E-3—E-8.
18. Покрашенко С. А. Исследование дрейфа льда в Татарском проливе методами математического моделирования: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. геогр. наук. — Л.: ААНИИ, 1987. — 19 с.

19. Пищальник В.М., Минервин И.Г. Особенности развития ледовый условий в регионах Охотского моря в зимние сезоны 2015/16 и 2016/17 гг. – Ученые записки Сахалинского государственного университета, 2017.

20. Дорофеева Д.В., Минервин И.Г., Пищальник В.М., Методологические подходы к прогнозированию ледовитости татарского пролива, Материалы докладов XI Всероссийского симпозиума «Физика геосфер», Владивосток 9-14 сентября 2019.

21. Шумилов И.В., Минервин И.Г., Пищальник В.М., Никонова Е.В., Терентьев Н.С. Разработка прогностического правила внутрисезонной динамики ледяного покрова: фаза развития Материалы докладов XI Всероссийского симпозиума «Физика геосфер», Владивосток 9-14 сентября 2019.