

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-68-1-48-63>
УДК 551.467



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Исследование ледовой обстановки Обской губы по современным спутниковым данным в 2007–2017 гг.

А.Д. Тарасенко¹, В.В. Селюженок^{2}, Н.В. Сандалюк³,
И.А. Абрамова¹, Д.М. Демчев⁴*

¹ — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² — Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, Россия

³ — Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия

⁴ — Технический университет Чалмерса, Гетеборг, Швеция

**v1seluzhenok@oceanography.ru*

Резюме

Обская губа — район бурно развивающейся добычи нефти и газа. Знание текущих ледовых условий необходимо для безопасности береговой и подводной инфраструктуры. Целью данного исследования является оценка сроков ледовых явлений и отдельных характеристик (скорость дрейфа, локализация стамух и торосов) в южной и центральной части Обской губы с 2007 по 2017 г. Анализируя ежедневные визуальные данные MODIS и имеющиеся снимки Sentinel-1 SAR, мы определили даты начала устойчивого ледообразования, начало формирования и взлома припая, наступление безледного периода. В целом по данным с 2007 по 2017 г. наблюдается тенденция уменьшения существования ледяного покрова. Образование морского льда начинается позже, а взлом припая — раньше по сравнению со средними многолетними наблюдениями (1947–2010 гг.). Также были определены скорость дрейфа морского льда и распространение торосов. Отсутствие в районе крупных стамух было подтверждено результатами алгоритма автоматической обработки РСА-изображений.

Ключевые слова: ледовая обстановка, Новый Порт, Обская губа, спутниковые данные, MODIS, Sentinel-1.

Для цитирования: Тарасенко А.Д., Селюженок В.В., Сандалюк Н.В., Абрамова И.А., Демчев Д.М. Исследование ледовой обстановки Обской губы по современным спутниковым данным в 2007–2017 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 1. С. 48–63. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-48-63>.

Поступила 31.08.2021

После переработки 28.02.2022

Принята 22.03.2022

A study of sea ice regime in the Obskaya guba Bay using modern satellite data in 2007–2017

Anastasia D. Tarasenko¹, Valeria V. Selyuzhenok^{2}, Nikita V. Sandalyuk³,
Irina A. Abramova¹, Denis M. Demchev⁴*

¹ — *State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia*

² — *N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, Russia*

³ — *St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russia*

⁴ — *Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden*

**v1selyuzhenok@oceanography.ru*

Summary

The Obskaya guba Bay is a region of rapidly developing oil and gas exploration. Knowing the current sea ice conditions including dangerous phenomena e. g. ridges and stamukhas is important for the safety of coastal and underwater construction as well as for ecological risk assessment. With this study, we aim to obtain new data on sea ice seasonal cycle in the southern and central part of the Obskaya guba Bay for 10 years (from 2007 to 2017) and to demonstrate the capacity of satellite data in obtaining varying sea ice characteristics in the region. Analyzing daily visual MODIS and available Sentinel-1 SAR imagery, we derived dates of sea ice and fast ice formation, fast ice breakup and melt onset and the onset of ice-free period. For this purpose the satellite data were analyzed manually by sea ice expert. In addition, of sea ice ridges were derived and the sea ice drift data were automatically processed in order to locate motionless sea ice features — stamukhas. The distribution of sea ice floes and field size in the region was derived from MODIS data. The analysis showed that there is a tendency towards a shorter ice covered period based on the data from 2007 to 2017. Overall, the formation of sea ice starts 9 days later and fast ice breakup occurs 16 days earlier compared to the long-term mean (1947–2010). The majority of ridges were located in the central part of the region and directed along the coast. The analysis confirmed absence of large stamukhas visible to be applied method (with a horizontal size of 100 m). The predominant sea ice field size range lies 500–1500 m. The study shows that a combination of images obtained in the optical range of the survey with radar data makes it possible to supplement the classical visual assessments with the results of automatic methods for detecting fast ice, detecting stamukha, as well as ice drift and deformation.

Keywords: MODIS, Noviy Port, Obskaya guba Bay, satellite data, sea ice regime, Sentinel-1.

For Citation: *Tarasenko A.D., Selyuzhenok V.V., Sandalyuk N.V., Abramova I.A., Demchev D.M.* A study of sea ice regime in the Obskaya guba Bay using modern satellite data in 2007–2017. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (1): 48–63. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-1-48-63>.

Received 31.08.2021

Revised 28.02.2022

Accepted 22.03.2022

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие промышленности Российской Федерации, добыча газа и его транспортировка в районах Крайнего Севера связаны с обеспечением безопасности всех операций в тяжелых климатических условиях. Работы, выполняемые в морских или прибрежных условиях, требуют оценки основных характеристик гидрологического и ледового режима (волнения, течений, колебаний уровня, ледовой обстановки). Продолжительность существования ледяного покрова, его изменчивость, наличие припая, торосов, стамух, айсбергов оказывают существенное влияние на инженерные сооружения и судоходство.

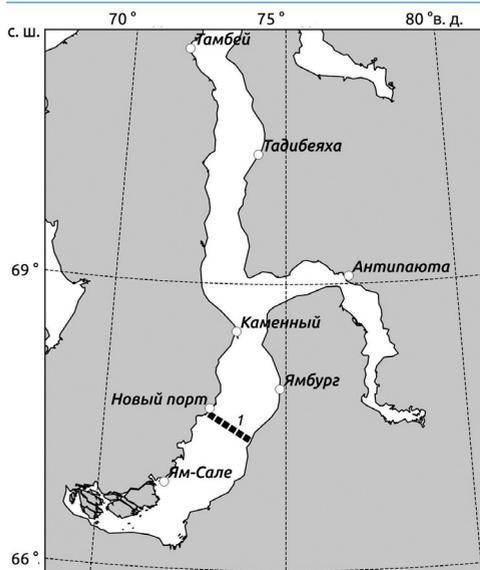


Рис. 1. Обская губа. Границы исследуемого района в окрестностях Нового Порта соответствуют 69°–66° с. ш. 1 — схематичный маршрут подводного трубопровода между Ямбургом и Новым Портом [1]

Fig. 1. Obskaya guba Bay. The region of interest near the Noviy Port is limited by 69° and 66° latitudes. The underwater pipeline connects Yamburg and Noviy Port [1]

тами сбора информации, включая натурные исследования, спутниковые данные и моделирование. Натурные исследования, а также результаты моделирования ледяного покрова в Карском море подробно описаны в работе [3]. Методы, основанные на использовании спутниковых изображений видимого диапазона, а также радиолокационных (и некоторых других) данных, успешно применяются при исследовании акваторий северных морей, активно используются в ААНИИ на протяжении долгого времени и продолжают совершенствоваться [4, 5].

Большую часть года Обская губа покрыта льдом. Процесс формирования устойчивого ледяного покрова в районе исследования начинается в первой половине октября (средняя дата, рассчитанная для периода 1947–2010 гг., — 10 октября, амплитуда между наиболее ранней и поздней датой — 36 дней), а окончательное замерзание акватории происходит во второй половине октября — начале ноября [6]. Наиболее раннее появление льда отмечается на прибрежном мелководье вблизи мыса Дровяной и бухты Новый Порт. Наличие в воде запаса тепла и воздействие течений определяют замерзание акватории примерно на одну декаду позже перехода температуры воздуха через ноль градусов. В зимний период Обская губа покрывается припаем, максимальное развитие которого наблюдается в апреле-мае [7].

У западного побережья Обской губы с большим количеством отмелей молодой лед появляется через 2–3 суток после установления температуры воздуха ниже 0 °С,

Активная хозяйственная деятельность в Обской губе, связанная с освоением нефтегазовых месторождений и повышенным трафиком Северного морского пути (СМП) может оказывать влияние на гидрологический и ледовый режим отдельных акваторий. В районе Нового Порта через Обскую губу пролегал подводный газопровод «Газ Ямала» (рис. 1) [1]. Трубопроводы являются источником потенциального загрязнения и вместе с другими элементами инфраструктуры нефтегазовой индустрии представляют собой особую опасность для окружающей среды в условиях низких температур, где местные экосистемы очень медленно восстанавливают нарушенный баланс [2]. В таких условиях рекомендуется проводить регулярный мониторинг опасных гидрометеорологических явлений для обеспечения безопасности инженерных сооружений и минимизации экологических рисков.

Для оценки рисков, связанных с неблагоприятными гидрометеорологическими факторами, следует пользоваться всеми доступными инструмен-

а у восточного, более приглубого берега — через 6–8 суток. В годы с холодной осенью сало и шуга образуются уже во второй декаде сентября. На установление припая оказывают большое воздействие соленость воды и ветровой режим. Неподвижный лед обычно устанавливается вдоль береговых отмелей при толщине молодого льда 20–30 см. Исключением является дельта реки Оби, где ледостав наступает при толщине льда 15 см.

В среднем толщина льда в Обской губе на конец апреля достигает 1,4–1,7 м [6]. Данные величины обладают межгодовой изменчивостью и зависят от климатических условий и толщины снежного покрова, которая в южной и средней частях губы изменяется от 3–5 до 40 см. В бухтах и прибрежных участках губы снежный покров достигает 50–70 см.

Преобладающие значения скорости дрейфа льда лежат в диапазоне 0,1–0,15 м/с, максимальные значения достигают 0,8 м/с [11].

Разрушение ледяного покрова в южной части Обской губы начинается в конце мая. В северной части губы припай взламывается в начале июня под воздействием ветра и волнения, тем самым смещая северную границу припая до бухты Тамбей. После взлома припая в акватории губы образуются поля плавучих льдов сплоченностью 9–10 баллов с характерными размерами ледяных полей около 2 км и обломками полей около 0,5 км. В конце июня очищается южная часть губы, затем центральная часть. Северная часть губы очищается ото льда в последнюю очередь во второй половине июля. При благоприятных условиях полное очищение губы ото льда наступает в июне — первой половине июля, а при неблагоприятных — в середине августа (средняя дата — 1 июля по данным за 1947–2010 гг. [6]). Размах сроков очищения ото льда, по многолетним данным, составляет около полутора-двух месяцев [7, 8] (37 дней по данным за 1947–2010 гг. [6]), т. е. приход гидрологической и биологической весны растягивается по акватории губы на месяц и более [9]. С конца июля по начало октября в Обской губе ледяной покров полностью отсутствует. Таким образом, средняя продолжительность ледового периода в исследуемой акватории составляет 290 суток, максимальная — 300 суток. Средняя продолжительность безледного периода составляет 75 суток [10].

Целью данной статьи является демонстрация возможностей современного спутникового мониторинга гидрометеорологической обстановки для локальных исследований в устьевых областях на примере Обской губы и района Нового Порта в частности.

Наиболее полно общий гидрологический режим Обской губы представлен в работе [6], основанной на данных наблюдений станций и постов, экспедиций и спутниковых изображений с 1945 по 2013 г., однако оценка сроков ледовых явлений была получена по более коротким рядам и не затрагивает последнее десятилетие спутниковых наблюдений. Так, для Нового Порта в работе [6] представлены характеристики за период с 1947 по 2010 г., для остальных пунктов наблюдений период исследования заканчивается в конце 1990-х. Задача данной работы — получить новую информацию о ледовом режиме за период с 2007 по 2017 г. по данным дистанционного зондирования. Для анализа межгодовой изменчивости были оценены сроки ледовых явлений, продолжительности ледового сезона и существования припая. На примере отдельных сезонов были получены оценки скоростей дрейфа, локализованы торосы, а также апробирован алгоритм обнаружения стамух.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

В исследовании были использованы спутниковые данные видимого диапазона, полученные с помощью спектрорадиометра среднего разрешения MODIS, установленного на спутниках Terra и Aqua, а также изображения радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) SAR-C, установленного на спутниках Sentinel-1. Ежедневные данные Aqua-Terra/MODIS (L2 и L3) с пространственным разрешением 250 м были собраны в коллекцию снимков с 2007 по 2017 г. в весенние и осенние месяцы, для дней, когда облачность позволяла различить подстилающий покров. Данные Sentinel-1/SAR-C доступны с 2014 г., когда был запущен первый из двух спутников (Sentinel-1A). В 2016 г. был запущен второй спутник Sentinel-1B с аналогичным РСА на борту. Данные Sentinel-1 имеют пространственное разрешение около 40 м в режиме широкополосной съемки “Extrawide mode” (EW). На основе этих данных была подготовлена коллекция снимков с 2014 по 2017 г., охватывающая периоды замерзания и таяния ледяного покрова. РСА-изображения Sentinel-1 находятся в свободном доступе на сайте <https://scihub.copernicus.eu/>, данные MODIS — на сайте <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/>.

В данном исследовании мы считаем осенними месяцы с сентября по ноябрь, весенними — с апреля по июнь. Это связано с особенностями ледового режима Обской губы, которая летом полностью освобождается ото льда, а зимой полностью покрыта припаем. Таким образом, процессы становления льда, формирования припая и его разрушения наиболее интересны в указанные месяцы. Границы исследуемого района в окрестностях Нового Порта соответствуют 69°–66° с. ш. (средняя и южная часть Обской губы).

Для расчета дрейфа льда и выделения припая был использован алгоритм, описанный в работе [12] с использованием РСА-данных Sentinel-1. Алгоритм рассчитывает скорость дрейфа на основе результатов прослеживания характерных точек (feature tracking) и кросс-корреляционного анализа блоков последовательных изображений.

РЕЗУЛЬТАТЫ***Ледостав и формирование припая***

Подробные данные о периодах ледостава и ледотаяния для изучаемой акватории представлены в табл. 1, составленной на основе анализа снимков MODIS в районе исследования в 2007–2017 гг.

В центральной части Обской губы ледяной покров наблюдается с октября по июль (рис. 2). Процессы ледообразования начинаются в конце второй декады октября (с 13 по 25 октября) и заканчиваются в середине ноября (с 4 по 21 ноября): медианная средняя продолжительность устойчивого ледообразования составляет 26 дней, минимальная — 21 день, максимальная — 33 дня. Средняя дата начала ледообразования в 2007–2017 гг. (19 октября) наступала на 9 дней позже по сравнению со средней датой по данным наблюдений в районе Новый Порт за 1947–2010 гг. [6].

Припай (связанный с берегом неподвижный ледяной покров) начинает формироваться очень быстро у обоих берегов Обской губы, в среднем через 4 дня (от 0 до 13 дней) с момента начала ледостава (табл. 2, рис. 2а). Его непосредственное воздействие на береговую зону и дно состоит прежде всего в изменении динамических условий в прибрежной зоне, а также в создании специфических форм рельефа дна (борозд, углублений, валов и др.). На основе анализа спутниковых данных можно сделать вывод, что устойчивый припай начинает формироваться в конце третьей

Таблица 1

Периоды ледостава и ледотаяния для изучаемой акватории на период 2007–2017 гг., по данным ИСЗ Terra/Aqua MODIS

Table 1

Periods of sea ice formation and melt onset for the study region between 2007 and 2017, based on the Terra/Aqua MODIS data

Год	Ледотаяние	Ледостав
2007	08.06–10.07	20.10–13.11
2008	15.06–06.07	15.10–16.11
2009	10.06–10.07	20.10–11.11
2010	10.06–13.07	25.10–21.11
2011	30.05–30.06	25.10–20.11
2012	30.05–20.06	23.10–18.11
2013	07.06–15.07	15.10–16.11
2014	05.06–01.07	14.10–04.11
2015	28.05–15.06	13.10–15.11
2016	07.06–28.06	25.10–15.11
2017	07.06–02.07	24.10–20.11

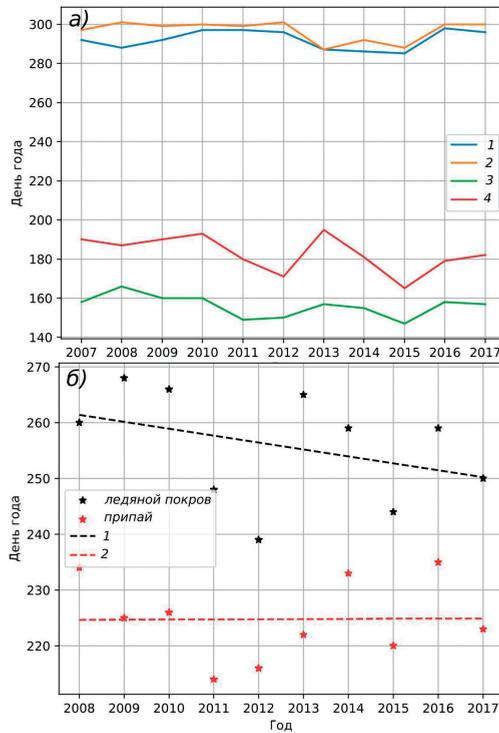


Рис. 2. Сроки ледовых явлений.

а) 1 — начало ледостава, 2 — формирование припая, 3 — начало таяния припая, 4 — полное освобождения Обской губы ото льда (день года); б) 1 — продолжительность существования ледяного покрова, 2 — припая (см. пояснение в тексте)

Fig. 2. Dates of sea ice events

а) 1 — sea ice formation, 2 — fast ice formation, 3 — onset of fast ice decay, 4 — onset of the ice-free period in the Obskaya guba Bay (day of the year); б) the duration of 1 — the persisting sea ice, 2 — the fast ice period

Фазы образования и взлома припая

Table 2

Phases of fast ice formation and breakup

Год	Дата первого образования припая	Начало взлома припая	Окончательное разрушение припая	Продолжительность существования припая (дней за сезон)
2007	25.10	08.06	10.07	258
2008	28.10	15.06	06.07	251
2009	27.10	10.06	10.07	256
2010	28.10	10.06	13.07	258
2011	27.10	30.05	30.06	246
2012	28.10	30.05	20.06	235
2013	15.10	07.06	15.07	273
2014	20.10	05.06	01.07	254
2015	16.10	01.06	15.06	242
2016	27.10	28.05	28.06	244
2017	28.10	07.06	02.07	247

Примечание: Продолжительность существования припая указана для сезона, напр. ледовый сезон 2007/08 указан как 2008 г.

Footnote: Duration of the fast ice season, e. g. 2008 stands for winter 2007–2008.

декады октября (табл. 2). В отдельные годы зафиксировано образование припая в середине октября.

В период становления припая наблюдается его достаточно сильная пространственная неоднородность. Первый припайный лед в исследуемом районе образуется у восточного берега, его средняя ширина в первую неделю ледостава варьируется в диапазоне 5–7 км, а в юго-восточном районе акватории ширина может достигать 20 км (рис. 3). У западного берега припай начинает образовываться позже, по всей видимости, это связано с особенностями динамики вод в данном районе. Здесь ширина припая на начальном этапе формирования составляет около 10 км. Первичное образова-

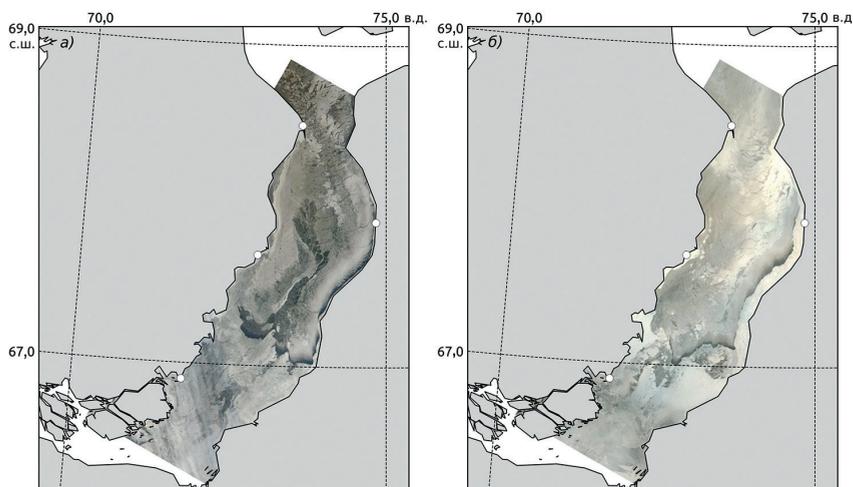


Рис. 3. Снимок MODIS припая и дрейфующего льда за 19.10.2008 и 03.11.2008

Fig. 3. MODIS imagery depicting fast ice and pack ice on 19.10.2008 and 03.11.2008

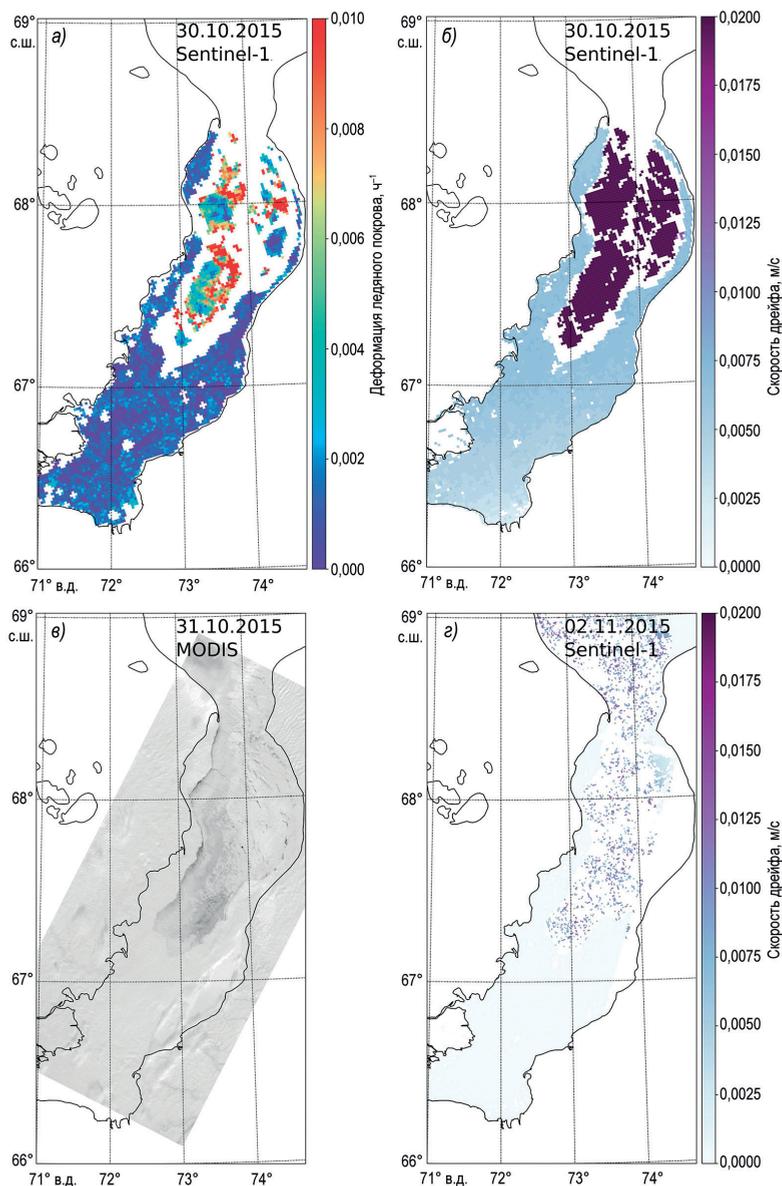


Рис. 4. Ледовая обстановка 30 октября (а, б), 31 октября (в), 2 ноября (з) 2015 г.: а) — деформация ледяного покрова (нормализована к 1 часу); б, з) — скорость дрейфа льда и припай по данным Sentinel-1/SAR-C; в) — дрейфующий лед и припай по данным MODIS

Fig. 4. Sea ice conditions on October 30 (a, б), October 31 (в), and November 2 (з), 2015: а) — sea ice deformation; б, з) — sea ice drift speed (m/s) and fast ice from Sentinel-1/SAR-C; в) — pack ice and fast ice from the MODIS imagery

ние припая у западного берега наблюдается в небольших вторичных заливах и бухтах, где лед меньше подвержен воздействию течения и ветра, в то время как большую часть центральной части акватории занимают начальные виды льда и нилас (рис. 3).

Увеличение площади припая происходит быстро. На рис. 4 представлены результаты обработки серии снимков Sentinel-1 (*a, б, в*) и MODIS (*г*), иллюстрирующих интенсивное нарастание припая и область дрейфующих льдов 30 октября — 2 ноября 2015 г. Наиболее интенсивные деформации ледяной покров испытывает в центральной области исследуемого района (рис. 4*а*), тогда как в зоне припая она минимальна. Стоит отметить, что даже небольшие подвижки льда потенциально могут привести к его нагромождению и образованию торосов.

Во время ледостава припай определяется как зона ледяного покрова с нулевой скоростью дрейфа (рис. 4*б*), в то время как расчетная средняя скорость перемещения дрейфующего льда составляет 0,02 м/с. Столь умеренная расчетная скорость дрейфа по сравнению с известными скоростями порядка 0,2 м/с может объясняться по-разному: (1) скорость дрейфа рассчитывается для временного интервала 7 ч (время между соседними снимками); (2) скорость дрейфа во время становления припая постепенно снижается [13], расчетные снимки как раз соответствуют времени формирования припая. В эстуарной зоне, где возможно влияние полусуточного прилива, характерного для Карского моря, за 7 ч происходит чуть больше половины приливного цикла, то есть влияния приливных и отливных течений компенсируют друг друга. На рис. 4*г* приведен снимок MODIS, иллюстрирующий ледовую обстановку 31 октября 2015 г. (30 октября область исследования была закрыта облачностью): площадь припая увеличивается в размерах, а центральный массив дрейфующих льдов сдвигается на север, с выносом ледяных полей в Карское море.

Площадь припая в третьей декаде октября по средним многолетним данным составляет 485 км², в первой декаде ноября — 3700 км², и уже к третьей декаде ноября на всей акватории образуется ледяной покров, который можно классифицировать как припай. Средняя продолжительность существования припая в исследуемом районе составляет 251 день. Максимальная — 258 дней, минимальная — 235 дней. Полная информация о продолжительности существования припая представлена в табл. 2. Средняя продолжительность существования ледяного покрова составляет 259 дней, максимальная — 268 дней, минимальная — 239 дней. Наблюдается слабая линейная тенденция по уменьшению продолжительности существования ледяного покрова (примерно 1,2 день/год на рассмотренном промежутке времени), однако для сроков существования припая значимой тенденции в период с 2007 по 2017 г. не выявлено.

Таяние льда

Взлом припая, приуроченный к началу таяния льда в акватории, приходится на первую декаду июня и начинается со стороны его кромки. Средняя дата взлома припая — 5 июня. Самый ранний взлом припая в период 2007–2017 гг. пришелся на конец мая (28.05), самый поздний — на середину июня (15.06). В среднем взлом припая в 2007–2017 гг. наступал на 16 дней раньше по сравнению со средней многолетней (1945–2011 гг.) датой — 21.06 [6].

Таяние льда начинается с южной части акватории. Как правило, через 10–12 дней начинается взлом припая в северной части исследуемого района, которая освобождается ото льда в последнюю очередь. Медианная средняя продолжительность ледотаяния составляет 28 дней, минимальная — 18, максимальная — 38 дней, что несколько превышает время намерзания льда. Это означает, что весной может наблюдаться большее количество дрейфующего льда большей толщины по сравнению с осенью, т. е. существует риск образования ледяных заторов.

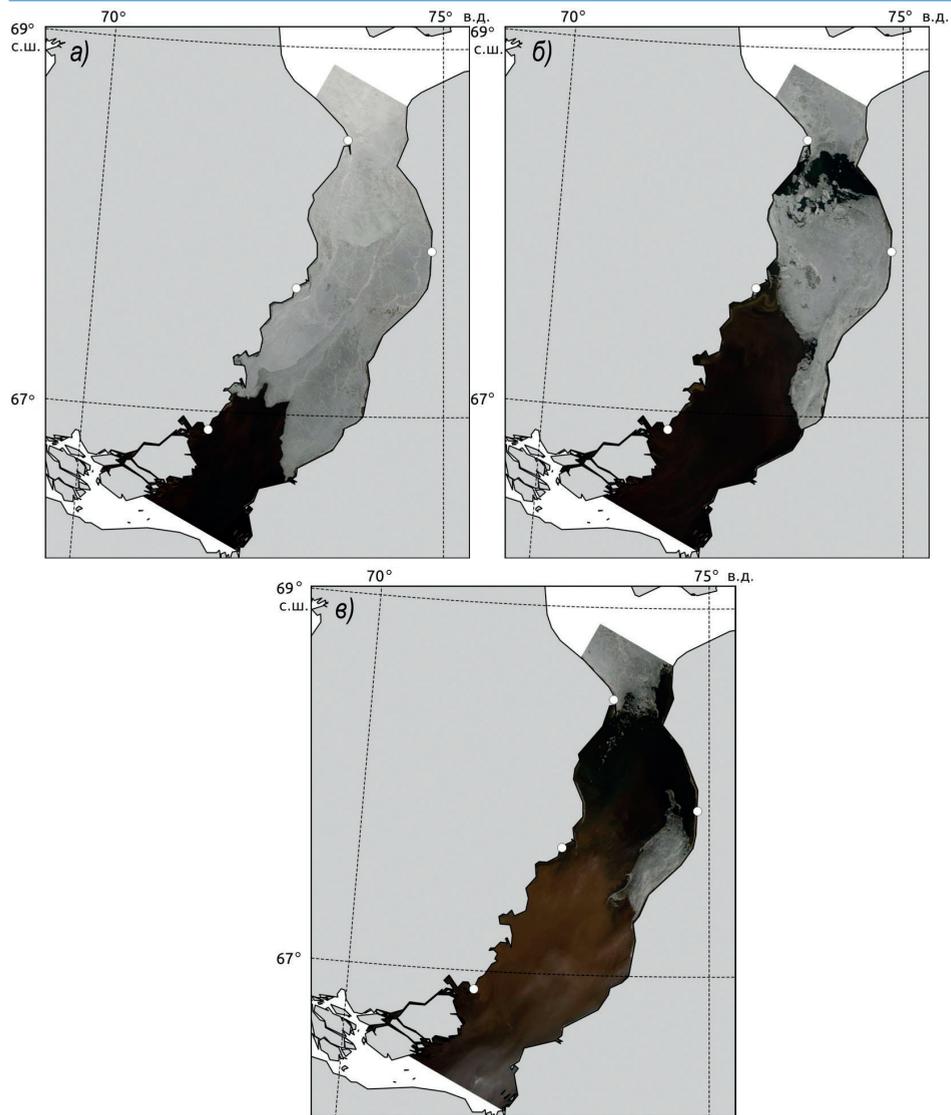


Рис. 5. Иллюстрация процесса очищения акватории Обской губы ото льда по спутниковым данным видимого диапазона MODIS за 19 июня (а), 29 июня (б) и 5 июля (в) 2008 г.

Fig. 5. Sea ice melt on visible MODIS imagery for 19 June (a), 29 June (б) and 5 July (в) of 2008

На рис. 5 представлена серия снимков MODIS на период ледотаяния 19 и 20 июня и 5 июля 2008 г.: хорошо виден разрушающийся припай в центральной части Обской губы и быстрое освобождения акватории ото льда. В первой декаде июня чистая вода занимает в среднем 5 % площади исследуемой акватории. Для второй декады июня она увеличивается до 40 %, а для третьей декады — до 75 %. На приведенных снимках также отчетливо видно, как увеличивается количество седиментов, выносимых р. Обью во время половодья (по данным <https://arcticgreatrivers.org/>

discharge/#Ob_Salekhard максимальный расход воды р. Оби происходит в среднем с начала июня до начала июля).

Ледяные образования

В период ледообразования в исследуемой акватории отмечается чрезвычайно высокая сплоченность дрейфующего льда, которая на период ледостава варьируется в диапазоне 7–9 баллов. В связи с этим в период ледостава преобладают большие ледяные поля (от 500 до 2000 м), а также обширные зоны скопления битого льда.

При анализе геометрических размеров ледяных полей на период осеннего ледостава с 2007 по 2017 г. были проанализированы 24 снимка MODIS. В соответствии с рекомендациями «Руководства по производству ледовой авиаразведки» была выполнена экспертная оценка характерных размеров и площадей ледяных полей согласно номенклатуре. Результаты анализа представлены в табл. 3. Результаты статистической обработки данных дешифрирования и измерений представлены в табл. 4.

Таблица 3

Диапазон размеров ледяных полей

Table 3

The size range of sea ice fields			
Диапазон размеров ледяных полей	Характеристика горизонтальных размеров полей	Количество льдин в интервале	Суммарная площадь льдин, км ²
100–500 м	Обломки ледяных полей	7	0,9
500–2000 м	Большие ледяные поля	47	39,6
2000–10000 м	Обширные ледяные поля	29	278
>10000 м	Гигантские ледяные поля	4	301

Таблица 4

Статистика горизонтальных размеров ледяных полей

Table 4

Statistics of the longitudinal sea ice filed sizes			
Характеристики	Ширина, м	Длина, м	Площадь, км ²
Среднее значение	2172	1688	7,1
Медиана	1008	1396	1,16
Стандартное отклонение	1974	3307	19,5
Минимальное значение	134	229	0,022
Максимальное значение	12174	18762	132,3

Результаты показывают, что наиболее характерные горизонтальные размеры ледяных полей лежат в диапазоне 500–1500 м (большие ледяные поля). Следует принять во внимание тот факт, что пространственное разрешение снимков MODIS не позволяет обнаруживать ледяные поля с горизонтальными размерами меньше разрешающей способности аппаратуры (менее 250–300 м), что исключает из общей выборки малые ледяные поля и обломки.

Кроме того, как было отмечено выше, в результате неравномерного распределения скоростей дрейфа льда, при сжатии, а также при нажимном дрейфе происходит разрушение дрейфующего льда, что может приводить к формированию торосов и наслоений льда. В результате визуального анализа снимков MODIS за 2007–2017 гг. было обнаружено 103 крупные гряды торосов (рис. 6). Средняя длина выделенных

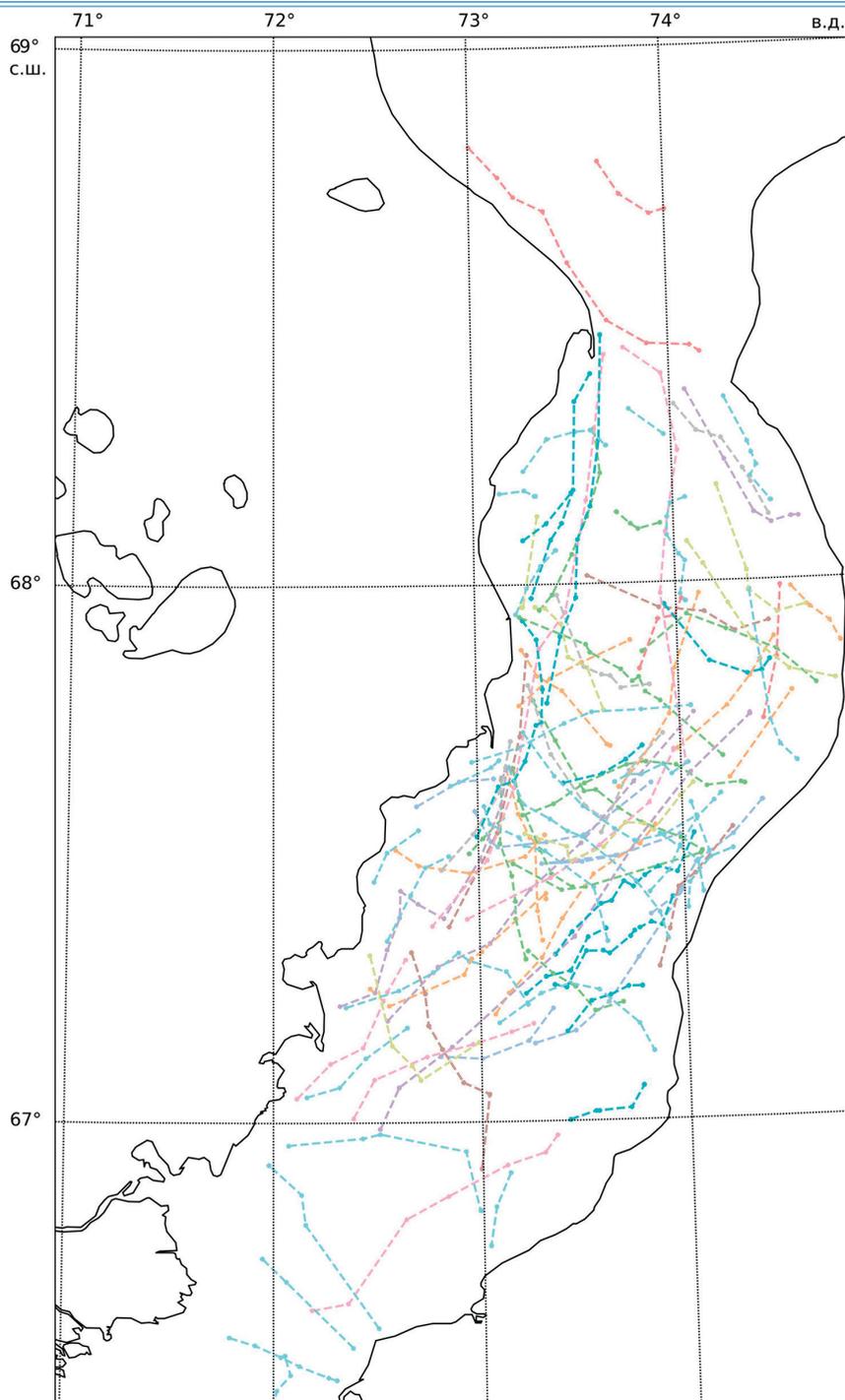


Рис. 6. Выделенные гряды торосов на основе анализа изображений MODIS с 2007 по 2017 г.
Fig. 6. Sea ice ridges detected from the MODIS imagery between 2007 and 2017

скопления составляет 38,7 км, СКО 16,3 км. Обнаруженные торосы в основном ориентированы параллельно берегу, что может объясняться взаимодействием припая и дрейфующего льда как под влиянием ветра, так и приливной деятельности. Как и в случае с оценкой размеров ледяных полей, стоит учитывать, что более мелкие зоны торошенного льда и отдельные торосы не могут быть обнаружены на спутниковых снимках среднего разрешения.

С помощью автоматического метода расчета дрейфа [12] была предпринята попытка выделения стамух. Стамухи образуются при набивании льда вокруг севшего на мель ледяного тороса, они выделяются на картах дрейфа как неподвижные объекты с учетом топографии дна, приливной и ветровой деятельности.

Несмотря на относительно высокое пространственное разрешение данных широкополосной съемки Sentinel-1 (40 м), использованные методы не выявили наличия стамух. Одной из причин можно считать повсеместное развитие припая, мало подверженного смещению даже с учетом сильной приливной деятельности, отмеченной в районе исследования, а также, вероятно, из-за небольшого размера самих стамух. Дополнительно стоит указать, что временной интервал между ближайшими последовательными снимками Sentinel-1 примерно совпадает с половиной цикла полусуточного прилива (около 7 ч между снимками), таким образом, любое перемещение льда может нивелироваться за счет приливно-отливной деятельности. Кроме того, данные авиаразведки (1972–1991 гг.) указывают на отсутствии стамух в южной части Обской губы [2]. Тем не менее автоматические методы требуют дальнейшего совершенствования для их применения в условиях наличия более мелких опасных ледяных образований, что может быть достигнуто с помощью использования оптических и радиолокационных спутниковых данных высокого пространственного разрешения, например снимков спутника Sentinel-2/MSI с разрешением до 10 м или РСА-изображений, полученных в режиме детальной съемки (5–25 м).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные спутниковые методы выгодно дополняют существующие натурные наблюдения и позволяют получить статистические оценки ледовых объектов, таких как припай, размеры дрейфующих ледяных полей и гряд торосов. На основе анализа изображений спутникового дистанционного зондирования Земли в видимом и радиолокационном диапазонах были получены данные о времени наступления ледообразования, формирования припая, начале таяния и разрушения припая и датах очищения ото льда южной и центральной части Обской губы с 2007 по 2017 г. Установлено, что, по сравнению со средними многолетними данными, в период исследования наблюдалось более позднее (на 9 дней) начало ледообразования и более ранний (на 16 дней) взлом припая.

В работе было показано, что в Обской губе, в районе Нового Порта, припай формируется одновременно с началом ледостава и, в среднем, в течение месяца полностью покрывает район исследования. После продолжительной зимы (около 250 дней) во время максимальных расходов реки Оби начинается взлом ледяного покрова, который также длится около 28 дней. За время исследуемого периода продолжительность существования ледяного покрова несколько сокращалась (с тенденцией около 1 день/год), при этом сроки существования припая сохранялись неизменными. Было отмечено, что в 2007–2017 гг. в исследуемом районе преобладали большие ледяные поля (500–2000 м), а также гряды торосов с протяженностью около 30 км.

Комплексирующие снимков, полученных в оптическом диапазоне съемки, с радиолокационными данными позволяет дополнить классические визуальные оценки результатами автоматических методов выделения припая, детектирования стамух, а также дрейфа и деформаций льда.

Конфликт интересов. Авторы исследования не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-35-60033.

Благодарности. Спутниковые данные MODIS и Sentinel-1 предоставлены для открытого пользования на порталах <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/> и <https://scihub.copernicus.eu/>

Competing interests. The authors state no conflict of interests

Funding. The study was carried out with a financial support of the Russian Foundation for basic Research, project No 19-35-60033.

Acknowledgments. The satellite data from MODIS and Sentinel-1 is freely available at <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/> and <https://scihub.copernicus.eu/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Газпром нефть» запустила арктический подводный газопровод «Газ Ямала» через Обскую губу Карского моря. URL: <https://nangs.org/news/midstream/pipelines/gazprom-neft-zapustila-arkticheskij-podvodnyj-gazoprovod-gaz-yamala-cherez-obskuyu-gubu-karskogo-morya> (дата обращения 07.04.2022).
2. Куликова О.А., Мазлова Е.А., Брэдик Д.И., Кудрова Е.П., Ткачев Н.В. Нефтяное загрязнение территорий западного побережья Обской губы // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65 (1). С. 105–112. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-1-105-117>
3. Ледяные образования морей Западной Арктики: Монография / Под ред. Г. К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. 272 с.
4. Смирнов В.Г. Спутниковый мониторинг опасных ледяных образований в районах эксплуатационных работ на морских месторождениях углеводородного сырья // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 1. С. 103–120.
5. Миронов Е.У., Смирнов В.Г., Бычкова И.А., Клячкин С.В., Дымент Л.Н., Захваткина Н.Ю., Май Р.И., Гузенко Р.Б., Саперштейн Е.Б., Михальцева С.В., Платонова Е.В., Старцев Л.А. Экспериментальный аппаратно-программный комплекс спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 2. С. 15–26. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-2-15-26>
6. Войнов Г.Н., Налимов Ю.В., Пискун А.А., Становой В.В., Усанкина Г.Е. Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура вод). СПб.: Изд-во «Нестор-История», 2017. 186 с.
7. Ким С. Д., Финагенов О. М., Уварова Т. Э. Определение ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа по нормам различных стран // Вести газовой науки. 2013. № 3 (14). С. 97–103.
8. Лапин С.А. Гидрологическая характеристика Обской губы в летне-осенний период // Океанология. 2011. Т. 51. № 6. С. 984–993.
9. Стунжас П.А., Маккавеев П.Н. Объем вод Обской губы как фактор формирования гидрохимической неоднородности // Океанология. 2014. Т. 54 (5). С. 622–634. doi: 10.7868/S0030157414050128.
10. Ильин Г.В. Гидрологический режим Обской губы как новой области морского природопользования в Российской Арктике // Наука юга России. 2018. Т. 14. № 2. С. 20–32.

11. Оганов Г.С., Митрофанов И.Б., Карпов А.М., Карулина М.М., Карулин Е.Б., Благовидова И.Л., Тертышников А.С. Анализ возможных ледовых воздействий на ледостойкое сооружение в районе месторождения Каменномысское-море // Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа. 2018. № 4 (36). С. 123–130.
12. Selyuzhenok V., Demchev D. An application of sea ice tracking algorithm for fast ice and stamukhas detection in the Arctic // Remote Sensing. 2021. V. 13 (18). <https://doi.org/10.3390/rs13183783>
13. Selyuzhenok V., Mahoney A., Krumpfen T., Castellani G., Gerdes R. Mechanisms of fast-ice development in the south-eastern Laptev Sea: a case study for winter of 2007/08 and 2009/10 // Polar Research. 2017. T. 36 (1). URL: <https://doi.org/10.1080/17518369.2017.1411140> (дата обращения 20.02.2022).

REFERENCES

1. «Gazprom neft'» zapustila arkticheskii podvodnyi gazoprovod «Gaz Yamal» cherez Obskuiu gubu Karskogo moria. Gazprom Neft launched the Gaz Yamal subsea gas pipeline across the Ob Bay of the Kara Sea. Available at: <https://nangs.org/news/midstream/pipelines/gazprom-neft-zapustila-arkticheskij-podvodnyj-gazoprovod-gaz-yamala-cherez-obskuyu-gubu-karskogo-morya> (accessed 07.04.2022). [In Russian].
2. Kulikova O.A., Mazlova E.A., Bradik D.I., Kudrova E.P., Tkachev N.V. Oil pollution of the western Gulf of the Ob coast. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (1): 105–112. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-1-105-117>. [In Russian].
3. *Ledianye obrazovaniia morei Zapadnoi Arktiki*. Ice formations of the seas of the Western Arctic: Monograph. Ed. G. K. Zubakin. St. Petersburg: AARI, 2006: 272 p. [In Russian].
4. Smirnov V.G. Satellite monitoring of hazardous ice formations in the areas of exploitation at offshore hydrocarbon deposits. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2012, 1: 103–120. [In Russian].
5. Mironov E.U., Smirnov V.G., Bychkova I.A., Kljachkin S.V., Dymant L.N., Zahvatkina N.Yu., Maj R.I., Guzenko R.B., Sapershtejn E.B., Mihal'ceva S.V., Platonova E.V., Starcev L.A. Experimental hardware-software complex of satellite monitoring and forecast of ice conditions. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2017, 2: 15–26. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-2-15-26>. [In Russian].
6. Vojnov G.N., Nalimov Y.V., Piskun A.A., Stanovoj V.V., Usankina G.E. The main features of the hydrological regime of the Ob and Taz bays (ice, levels, water structure) / Ed. G. N. Vojnov. St. Petersburg: Nestor-History, 2017: 186 p. [In Russian].
7. Kim S.D., Finagenov O.M., Uvarova T.E. Determination of ice loads on the structures of the continental shelf according to the norms of different countries. *Vesti gazovoy nauki*. Gas Science Bulletin. 2013, 3 (14): 97–103. [In Russian].
8. Lapin S.A. Hydrological characteristics of Obskaya guba in summer autumn period. *Okeanologia*. Oceanology. 2011, 51 (6): 984–993. [In Russian].
9. Stunzhas P.A., Makkaveev P.N. The volume of the Obskaya bay as a factor in the formation of hydrochemical heterogeneity. *Okeanologia*. Oceanology. 2014, 54 (5): 622–634. doi: 10.7868 / S0030157414050128. [In Russian].
10. Ilyin G.V. Hydrological regime of the Gulf of Ob as a new area of marine nature management in the Russian Arctic. *Nauka iuga Rossii*. Science of the South of Russia. 2018, 14 (2): 20–32. doi: 10.23885 / 2500-0640-2018-14-2-20-32. [In Russian].
11. Oganov G.S., Mitrofanov I.B., Karpov A.M., Karulina M.M., Karulin E.B., Blagovidova I.L., Terlyshnikova A.S. Analysis of possible ice impacts on an ice-resistant structure in the area of the Kamennomysskoe-sea field. *Sovremennye podkhody i perspektivnye tekhnologii v proektakh osvoeniia*

neftegazovykh mestorozhdenii rossiiskogo shel'fa. Modern approaches and advanced technologies in projects for the development of oil and gas fields on the Russian shelf. 2018, 4 (36): 123–130. [In Russian].

12. *Selyuzhenok V., Demchev D.* An application of sea ice tracking algorithm for fast ice and stamukhas detection in the Arctic. *Remote Sensing*. 2021, 13 (18): 3783.

13. *Selyuzhenok V., Mahoney A., Krumpen T., Castellani G., Gerdes R.* Mechanisms of fast-ice development in the south-eastern Laptev Sea: a case study for winter of 2007/08 and 2009/10. *Polar Research*. 2017, 36 (1). Available at: <https://doi.org/10.1080/17518369.2017.1411140>. (accessed 20.02.2022).