

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-58-71>  
УДК 551.467:656.61.052



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

## Особенности совместного влияния интенсификации судоходства и изменения климата на распространение припая в Обской губе

*Р.А. Виноградов<sup>1\*</sup>, О.М. Андреев<sup>1</sup>, О.А. Морозова<sup>1</sup>,  
Д.В. Драбенко<sup>1</sup>, В.А. Драбенко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> — АОУ ВПО Государственный институт экономики, финансов, права и технологий, г. Гатчина, Россия

\*[vinra@aari.ru](mailto:vinra@aari.ru)

### Резюме

В последние годы круглогодичное судоходство в Обской губе активно осуществляется в три пункта: нефтеналивной терминал «Ворота Арктики», портовые терминалы Сабетга и «Утренний». Регулярная зимняя навигация началась в 2013–2015 гг. Количество судов за ноябрь–май уже составляет около 380 за сезон. Зимнее плавание в припаях осуществляется по ледовым каналам, что должно отражаться на стабильности припая. Целью исследования являлось определение влияния судоходства на распространение припая в Обской губе на фоне климатических изменений. В работе использовались данные по температуре воздуха, ледовым условиям и количеству судов в зимний период. Параметром суровости зимних условий являлась сумма градусо-дней мороза (СГДМ). Среднесезонное положение южной границы запримайной полыньи служило параметром стабильности припая. Такой подход снижал влияние кратковременных колебаний температурных и ледовых условий. Анализ данных за последние 25 лет подтвердил значимое влияние судоходства на распространение припая. Из-за зимней навигации дополнительное смещение границы запримайной полыньи на юг (для зимних условий от средних до очень легких) составило 25–50 миль. Более тяжелые зимние условия не фиксировались, и оценки для них не были получены. Выявленные изменения являются значимыми для региона. Переход от припая к дрейфующим льдам приведет к перестройке других природных процессов, что необходимо учитывать при освоении региона, поскольку изменится воздействие на инженерные объекты.

**Ключевые слова:** гидрометеорологические условия, гидротехнические сооружения, ледовое плавание, потепление, разрушение припая.

**Для цитирования:** Виноградов Р.А., Андреев О.М., Морозова О.А., Драбенко Д.В., Драбенко В.А. Особенности совместного влияния интенсификации судоходства и изменения климата на распространение припая в Обской губе // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 1. С. 58–71. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-58-71>.

Поступила 14.02.2023

После переработки 10.03.2023

Принята 13.03.2023

## **Peculiarities of joint influence of navigation intensification and climate change on fast ice distribution in the Ob' Bay**

*Roman A. Vinogradov<sup>1\*</sup>, Oleg M. Andreev<sup>1</sup>, Olga A. Morozova<sup>1</sup>,  
Dmitriy V. Drabenko<sup>1</sup>, Vadim A. Drabenko<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup> — *IEI of HPE State Institute of Economics, Finance, Law and Technology, Gatchina, Russia*

*\*vinra@aari.ru*

### **Summary**

All year-round navigation in the Ob' Bay has been operating for more than ten years. In recent years it has been performed most actively at three points: the port terminals Sabetta and «Utrenniy» (on the opposite coasts in the northern part of the bay) and the oil loading terminal «Vorota Arktiki» (in the southern part of the bay, off cape Kamenny). Regular winter navigation to Sabetta began in 2013 and to cape Kamenny in 2015. In recent years, the number of vessels in November–May has already risen to about 380 per season. The winter navigation in the fast ice is performed along ice channels, which should impact on the fast ice stability. The aim of this research was to determine the influence of navigation on the fast ice distribution in the Ob' Bay in terms of climate changes. To analyze navigation impact on the fast ice distribution in the Ob' Bay, data on air temperature, ice conditions and number of vessels in the winter period were used in the work. The sum of the freezing degree days (FDD) was chosen as a parameter of winter conditions severity. The mean location of the south boundary of the flaw polynya per season was a parameter of the fast ice stability. Such an approach reduced the influence of short-term fluctuations of temperature and ice conditions. The data analysis carried out over the last 25 years has confirmed a significant influence of navigation on the fast ice distribution. It has been found that for the range from mean to mild winter conditions (an estimate using FDD), the dislocation of the flaw polynya boundary in the south direction amounted to 0.4–0.8 degrees of latitude (25–50 miles) because of winter navigation intensification. Winter conditions more severe than mean have not been recorded in the region over recent years. Therefore, such estimates were not obtained for them. The discovered changes of ice conditions are significant for the region. The transfer from fast ice to drifting ice of different types, forms and concentration will lead to the corresponding restructuring of other natural processes (water dynamics, litho-dynamic regime, etc). Subsequently the impact of hydrometeorological factors on engineering facilities can change, affecting the navigation conditions, scenarios of loading on the hydraulic structures, absolute loading values, etc. This is a factor to consider in the economic development of the region.

**Keywords:** fast ice break up, hydrometeorological conditions, hydrotechnical structures, ice navigation, warming.

**For Citation:** *Vinogradov R.A., Andreev O.M., Morozova O.A., Drabenko D.V., Drabenko V.A.* Peculiarities of joint influence of navigation intensification and climate change on fast ice distribution in the Ob' Bay. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2023, 69 (1): 58–71. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-1-58-71>.

**Received 14.02.2023**

**Revised 10.03.2023**

**Accepted 13.03.2023**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Влияние климатических изменений на ледовые условия в Арктике является сегодня актуальной темой, что нашло отражение в работах отечественных [1–4] и иностранных специалистов [5–7], посвященных эволюции ледяного покрова отдельных морей и полярных регионов в целом. Авторами настоящей статьи влияние глобального потепления рассматривалось в нескольких исследованиях по Обь-Енисейскому региону применительно к прочностным характеристикам льда,

а также к распространению припая, но уже в связке с антропогенным воздействием (судоходством) [8–10 и др.]. В выводах к докладу на конференции «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования» [10] было высказано предположение о существенном влиянии интенсивности ледового плавания в условиях припая на устойчивость неподвижного ледяного покрова и положение границы раздела с дрейфующими льдами. Однако относительно недавнее (на тот момент) начало хозяйственного освоения региона и связанного с ним круглогодичного судоходства ограничивало ряд наблюдений несколькими значениями, что не допускало скрупулезной проверки сделанного предположения. Продолжение наблюдений при дальнейшей интенсификация зимней навигации позволило получить новые данные для анализа влияния судового трафика.

Таким образом, выявление вклада антропогенной деятельности (судоходства) на распространение припая в Обской губе на фоне климатических изменений и являлось целью настоящей работы.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Сведения об интенсивности судоходства были получены на основе материалов интернет-ресурса «Информационная система государственного портового контроля» [11]. Система фиксирует по каждому порту время входа и выхода судна с указанием его названия и номера, что позволяет оценить судовый трафик. Однако организационная структура морского порта Сабетта вносит свою специфику в учет судового потока. Более подробно данный вопрос рассмотрен в следующей части статьи. Ледовая обстановка в акватории Обской губы анализировалась по архивным материалам ФГБУ «ААНИИ» на основе космических снимков и региональных ледовых карт за 1997–2022 гг. Частота регистрации ледовых условий составляла две карты в неделю. Особенности подготовки и анализа рядов данных о характеристиках припая приводятся далее в соответствующем разделе статьи. Температура воздуха в районе Обской губы оценивалась по наблюдениям прибрежных гидрометеорологических станций (Новый Порт, Сеяха, Сабетта, им. М.В. Попова) и данным метеорологического реанализа ERA-Interim. По этим данным (за 1997–2022 гг.) определялась сумма градусо-дней мороза как характеристика суровости зимних условий.

### СУДОХОДСТВО В ОБСКОЙ ГУБЕ

Освоение Российской Арктики, особенно ее прибрежных земель, неразрывно связано с морским транспортом. На первых этапах с его помощью реализовывались разведка новых территорий и обеспечение строительства необходимой инфраструктуры. В последующем на водные пути ложилась основная нагрузка по снабжению хозяйственных объектов и вывозу сырья или готовой продукции.

Это в полной мере относится и к Обской губе, где в настоящее время развивается кластер с производственными мощностями по добыче, переработке и отгрузке углеводородов, охватывающий ряд месторождений на обоих берегах губы. Главным транспортным узлом данной акватории является морской порт Сабетта. Согласно распоряжению Правительства РФ № 242-р от 26.02.2013 [12], в состав указанного порта входит несколько терминалов:

1) универсальный терминал на Ямальском берегу у поселка Сабетта с заводом СПГ и портовыми сооружениями (71° 17' с. ш.);

2) терминал СПГ и СГК «Утренний» на Гыданском берегу у Салмановского (Утреннего) нефтегазоконденсатного месторождения (СНГКМ) с заводом СПГ и причалами отгрузки на защищенной акватории (71° 00' с. ш.);

3) арктический терминал круглогодичной отгрузки нефти (АТКОН) «Ворота Арктики» на Ямальском берегу у м. Каменный (68° 30' с. ш.).

Регулярная зимняя навигация в северной части Обской губы (от Морского канала на бере губы (расположен между 72° 10' с. ш. и 72° 33' с. ш.) до пос. Сабетта) начата с 2013 г., а далее на юг (до м. Каменный) — с 2015 г. Согласно сведениям «Табло порта Сабетта» ресурса «Информационная система государственного портового контроля» [11] с 2013 г. по настоящее время зимний трафик здесь вырос с единичных заходов до нескольких сотен судов в сезон (рис. 1). Последние четыре зимних навигации (с 2018/19 по 2021/22) количество обслуживаемых судов за 7 месяцев наличия устойчивого ледяного покрова (ноябрь–май) держится на уровне 380 единиц.

Отметим, что указанный ресурс фиксирует по всем судам не их фактические перемещения, а каждый формальный заход в порт и выход из него. Дополнительной особенностью морского порта Сабетта является общий учет судового потока без разделения на отдельные терминалы порта. Таким образом, нельзя однозначно приравнивать количество зафиксированных за выделяемый период судозаходов в порт с судопроходами по выделенному участку трассы, хотя общая интенсивность судоходства отражается объективно. Разумеется, данное замечание относится (в первую очередь) к судам обеспечения, а не судам, осуществляющим основные грузоперевозки (танкеры нефти и газа, сухогрузы и т. д.). Отметим также, что максимальный судопоток на каждом участке порта Сабетта не обязательно связан с отгрузкой добываемых углеводородов. В период строительства и реконструкции объектов доставка генеральных грузов, стройматериалов и т. д. тоже требует значительного количества судов. С учетом перечисленных особенностей, сведения о судовом трафике в данной статье следует воспринимать как обобщенный показатель интенсификации судоходства.

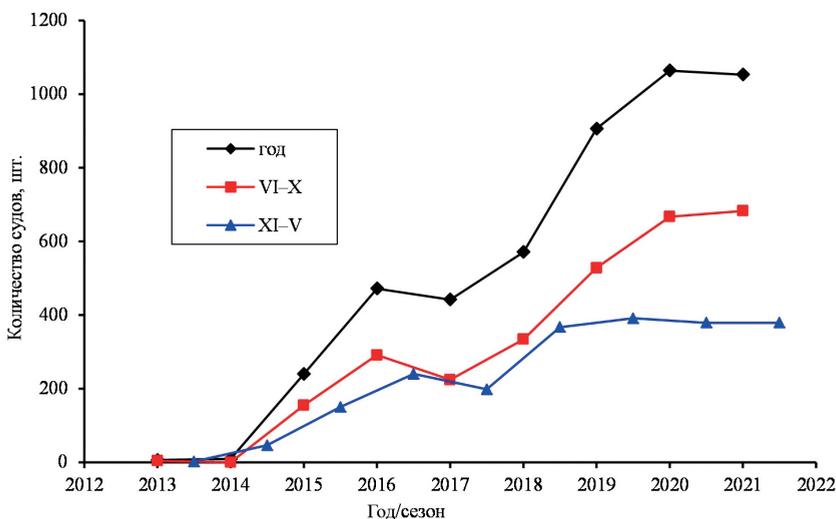


Рис. 1. Суммарный судовый трафик порта Сабетта по годам и сезонам

Fig. 1. Total vessel traffic of the port of Sabetta by years and seasons

Карты плотности судового трафика (Density Maps) с сайта MarineTraffic [13] позволяют рассмотреть основные трассы следования судов. На них указывается количество судов, зафиксированных автоматической идентификационной системой (АИС) на единицу площади за год. Заметим, что высокие плотности движения судов на таких картах, в соответствии с цветовой шкалой, обозначаются в красно-желтой гамме. Пример карт для Обской губы за 2020 и 2021 гг. приведен на рис. 2. К сожалению, общедоступные версии сервисов MarineTraffic не позволяют провести сепарацию этих данных по временным промежуткам (месяцам/сезонам), типам судов, поэтому на картах представлены только суммарные данные за каждый год. Однако основные трассы прослеживаются достаточно четко (по плотности судопотока). Способствуют этому следующие факторы, ограничивающие движение на акватории. Во-первых, это (независимо от сезона) осадка судов (особенно больших), батиметрия акватории и система организации движения на ней (наличие определенных фарватеров).

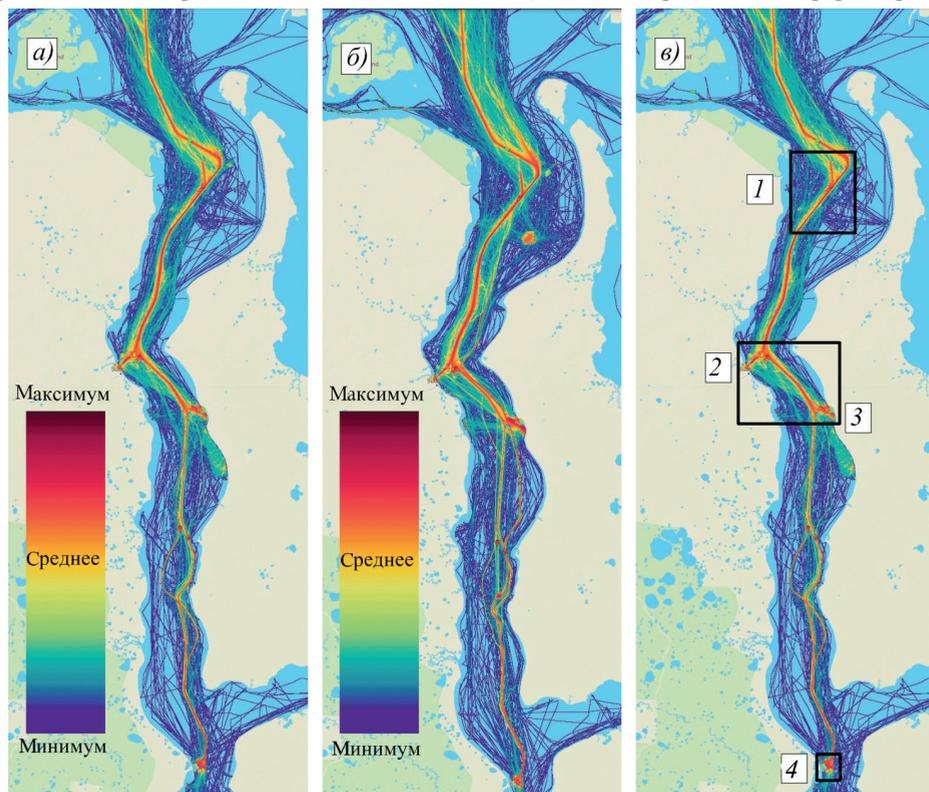


Рис. 2. Карты плотности судового трафика в Обской губе за 2020 (а), 2021 (б) гг. и выделенные районы судоходства (в).

Прямоугольниками на схеме (в) выделены ключевые районы движения судов; цифрами обозначены: 1 — Морской канал; 2, 3 и 4 — терминалы в Сабетте, на ШНГКМ и у м. Каменный соответственно

Fig. 2. Maps of the vessel traffic density in the Ob' Bay for 2020 (a), 2021 (b) and selected navigation areas (v)

The rectangles on the diagram (v) highlight the key areas of ship traffic; the numbers denote: 1 — the Sea Channel; 2, 3 and 4 — terminals in Sabetta, at the the Salmanovskoye oil and gas condensate field and off Cape Kamenny, respectively

Во-вторых, для зимней навигации в условиях припая вводятся дополнительные ограничения на движение почти всех судов (в виде проложенных ледовых каналов). С учетом длительности ледового сезона и значительной доли больших грузовых судов в общем трафике — основная часть судопотока будет тяготеть к одним и тем же маршрутам, что и видно на рис. 2.

Анализируя представленные трассы плавания, необходимо выделить ряд ключевых районов. Первый — это зона Морского канала, расположенного на баре Обской губы. Раздвоение судопотоков в его северной части, заметное на рисунке, обусловлено изменением трассировки канала при его модернизации в 2020–2022 гг. Этот район характеризуется максимальным трафиком, т. к. через него проходят все суда из/в Карское море, а также стесненными условиями плавания (невозможностью прокладки дополнительного ледового канала за пределами прорези Морского канала (длина около 50 км, ширина — 0,5 км)).

Вторым ключевым районом является объединенная зона приема судов в Сабетте и на Салмановском (Утреннем) НГКМ. Здесь следует выделить сразу несколько особенностей. Во-первых, для подхода к обоим пунктам необходимы ответвления от основной (транзитной) трассы и наличие в прибрежной зоне подходных каналов протяженностью около 5 км. Во-вторых, оба они незначительно (в масштабах Обской губы) разнесены вдоль судового хода, но находятся на разных берегах. Как результат — припай на этом участке прорезается не только вдоль губы, но и поперек нее (что дополнительно уменьшает здесь стабильность ледостава). В-третьих, в местах ответвлений от основного судового хода созданы условия для еще большего ослабления припая. Например, несколько южнее поворота с транзитной трассы в сторону подходного канала Сабетты расположена рейдовая стоянка. Таким образом, в указанном месте и на достаточно большой площади (порядка 5–10 км в поперечнике) во время зимней навигации постоянно происходит техногенный взлом льда. Отворот на СНГКМ расположен под острым углом к основному судовому ходу, что также способствует ослаблению припая на несколько километров вдоль трассы. В-четвертых, судопоток на рассматриваемом участке близок к максимальному, т. к. только часть судов идет непосредственно в Сабетту (так же проходя по северо-западной границе района), а остальные направляются на СНГКМ или следуют транзитом в сторону терминала «Ворота Арктики».

Третий ключевой район прилегает к терминалу круглогодичной беспричальной отгрузки нефти (АТКОН) «Ворота Арктики» у м. Каменный (южная часть Обской губы). Здесь наблюдается минимальный судовый трафик и, несмотря на необходимость подхода к терминалу с разных сторон, незначительное потенциальное ослабление припайного льда.

Кратко рассмотрим ситуацию на транзитных участках между указанными районами. Южный участок (от терминала «Ворота Арктики» до СНГКМ) по трафику и степени техногенного воздействия на ледяной покров можно охарактеризовать аналогично району самого АТКОН. Северный участок (от Сабетты до Морского канала), напротив, имеет максимальный судопоток и высокий потенциал разрушения припая под влиянием природных и антропогенных факторов. Наглядный пример такого комплексного сценария взлома сплошного льда приведен на серии последовательных снимков ИСЗ высокого разрешения акватории Обской губы в районе Сабетты и СНГКМ за 15–20 июня 2018 г. (рис. 3).

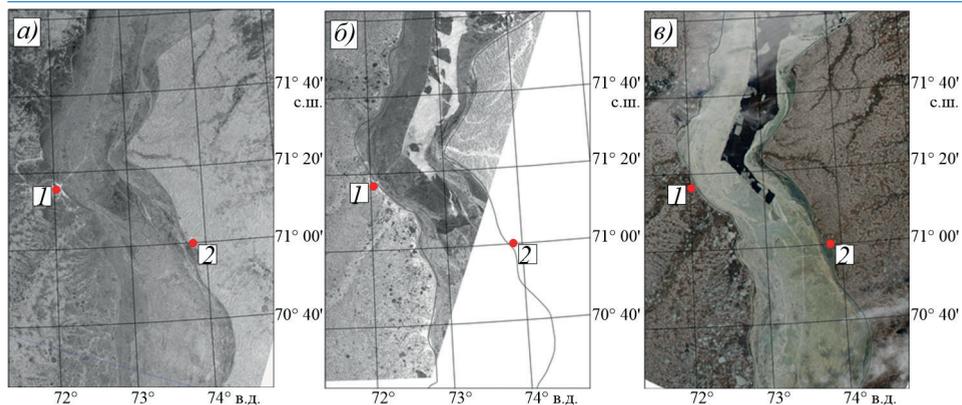


Рис. 3. Серия космических снимков северной части акватории Обской губы за 15 (а), 20 (б) и 21 (в) июня 2018 г.

1 и 2 — терминалы в Сабетте и на СНГКМ соответственно

Fig. 3. Series of satellite images of the northern part of the Ob' Bay water area for June 15 (a), 20 (b) and 21 (c), 2018.

1 and 2 — terminals in Sabetta and at the Salmanovskoye oil and gas condensate field, respectively

На фотографиях запечатлен процесс вскрытия припая по ледовым каналам (они идентифицируются как тонкие белые линии по центру губы с ответвлениями к берегам, с расположением, аналогичным представленным выше судоходным трассам). Видно, что после разрушения ледяного покрова граница заприпайной полыньи проходит именно по этим линиям.

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПРИПАЯ В ОБСКОЙ ГУБЕ

Граница распространения припая в Обской губе может изменяться в широких пределах в течение короткого отрезка времени. При сильном динамическом воздействии (из-за ветра, колебаний уровня и др.), особенно на фоне оттепели, возможен взлом припая на значительной площади и быстрое отступление его кромки на юг. Резкое похолодание в спокойных условиях (без существенного влияния динамических факторов) способствует ускоренному становлению неподвижного ледяного покрова на акватории и смещению его границы далеко на север губы. Такие колебания затрудняют выделение одного положения кромки припая, характеризующего его распространение за весь сезон. Дополнительные сложности возникают из-за множества вариаций расположения и формы линии разграничения дрейфующего и припайного льда по ширине акватории. Она может проходить через губу перпендикулярно оси или наискосок, быть как прямой, так и вогнуто-выпуклой.

В качестве количественной характеристики суровости зимних условий принято использовать параметр СГДМ (сумма градусо-дней мороза). Для наглядности сопоставления суровости зимних условий с масштабами распространения припая в каждом рассматриваемом сезоне необходим подобный единый показатель для неподвижного ледяного покрова. Дополнительно следует учитывать, что распространение припая в Обской губе рассматривается в данной работе не само по себе, а в связке с вопросами судоходства. На наш взгляд, при таком подходе наиболее объективным показателем тяжести ледовых условий является среднесезонное положение южной границы заприпайной полыньи. Причем, с учетом особенностей ледового режима

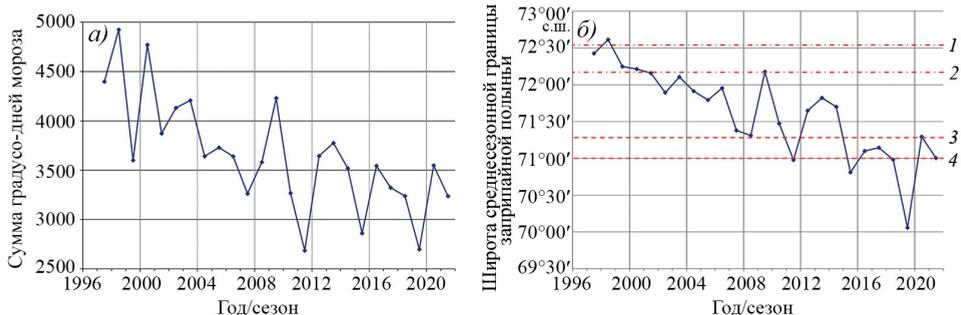


Рис. 4. Межгодовые колебания СГДМ (а) и среднесезонной границы заприпайной полыньи (б) в Обской губе для ледовых сезонов (XI–V) 1997–2022 гг.

1 и 2 — широта северной и южной границы Морского канала соответственно; 3 и 4 — широта положения терминалов в Сабетте и на СНГКМ соответственно

Fig. 4. Interannual fluctuations of the sum of the freezing degree days (a) and the average seasonal – boundary of the flaw polynya (b) in the Ob’ Bay for ice seasons (XI–V) 1997–2022

1 and 2 — latitude of the northern and southern borders of the Sea Channel, respectively; 3 and 4 — the latitude of the terminals in Sabetta and on the Salmanovskoye oil and gas condensate field, respectively

Обской губы, для указанного осреднения отбираются данные только с ноября по май (включительно), когда наблюдается преимущественно устойчивый ледостав. Этим минимизируется влияние осенних и весенних ледовых процессов с их быстрыми сменами форм льда (дрейфующий или неподвижный) и значительными смещениями вдоль губы линии их разграничения.

На рис. 4 представлены графики межгодовых колебаний СГДМ и среднесезонной границы заприпайной полыньи в северной части Обской губы за ледовые сезоны (XI–V) 1997–2022 гг. Также отмечено (см. рис. 4б) широтное положение трех ключевых объектов: Морского канала, Сабетты и СНГКМ.

Максимальная чувствительность к ледовым условиям при зимней навигации будет наблюдаться на участках трассы плавания с ограничениями для маневрирования судов. В Обской губе к таким критическим районам относятся Морской канал и подходы к трем точкам погрузки-выгрузки. По графику на рис. 4б видно, что положение среднесезонной границы заприпайной полыньи фиксировалось только севернее 70° с. ш. До широты терминала «Ворота Арктики» у м. Каменный (68° 30' с. ш.) она не опускалась, т. к. здесь наблюдался устойчивый ледостав. Следовательно, наибольшее внимание необходимо уделить условиям ледового плавания на севере губы от района Сабетта–СНГКМ до выхода из Морского канала в Карское море. В данном случае, в дополнение к уже использованному параметру среднесезонной границы заприпайной полыньи, можно рассмотреть диапазон преобладающего за сезон широтного положения кромки припая. Этот критерий является, по сути, модальной характеристикой распространения неподвижного льда. На его основе ледовые условия на рассматриваемой акватории были разделены на типы, представленные в табл. 1.

Наглядное представление о характерном распространении припая при каждом из выделенных типов ледовых условий дают карты ледовой обстановки из архива ААНИИ, представленные на рис. 5. Чередование типов за 1997–2022 гг. приведено в табл. 2.

Типы ледовых условий в Обской губе по преобладающему положению кромки припая

Table 1

Types of ice conditions in the Ob' Bay according to prevailing location of the fast ice edge

Сокращенное наименование типа	Полное наименование типа	Характеристика района преобладающего распространения кромки припая в Обской губе
ОТ	Очень тяжелые	На север от Морского канала вплоть до 73° 30' с. ш. (о. Белый)
Т	Тяжелые	В районе Морского канала с периодическим (эпизодическим) распространением за его северную границу
С	Средние	В границах Морского канала
Л	Легкие	Между Сабеттой и Морским каналом с редким пересечением его южной границы
ОЛ	Очень легкие	В районе между ШГКМ и Сабеттой с редким пересечением широты рейдовой стоянки у Сабетты в северном направлении (иногда до появления в границах Морского канала)

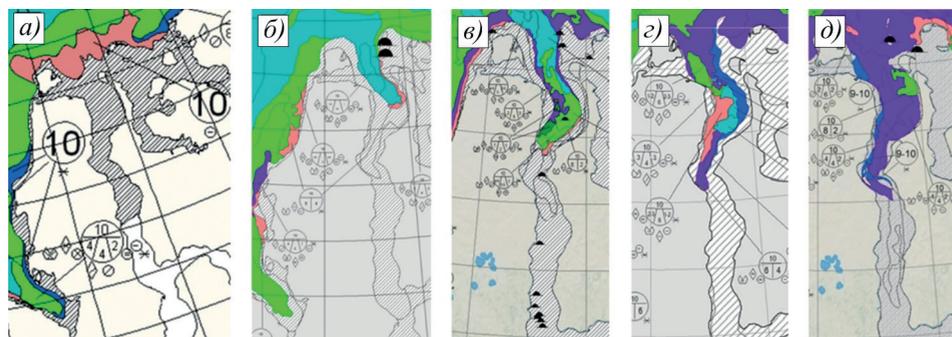


Рис. 5. Примеры характерных границ припая по выделенным типам ледовых условий: 06.03.2002 — ОТ (а), 17.04.2018 — Т (б), 30.03.2021 — С (в), 14.04.2019 — Л (г), 13.03.2020 — ОЛ (д)

Fig. 5. Examples of typical fast ice boundaries by selected types of ice conditions: 06.03.2002 — OT (a), 17.04.2018 — T (b), 30.03.2021 — S (c), 14.04.2019 — L (d), 13.03.2020 — OL (e)

Таблица 2

Межгодовая изменчивость типа ледовых условий в Обской губе за 1997–2022 гг.

Table 2

Interannual variability of the type of ice conditions in the Ob' Bay for 1997–2022

Ледовые условия	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22
ОТ	×	×	-	×	×	-	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Т	-	-	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-
С	-	-	-	-	-	×	-	-	-	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-	-	-
Л	-	-	-	-	-	-	-	×	×	-	×	×	-	×	×	-	-	×	-	-	-	-	×	-	-
ОЛ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	×	-	×	×	-	×

*Примечание.* Ледовые условия даны по табл. 1. Крестом отмечен наблюдаемый тип ледовых условий для каждого зимнего сезона. Полуужирным шрифтом выделены сезоны с регулярной зимней навигацией в акватории Обской губы (2013–2022 гг.).

*Note.* Ice conditions are given according to Table 1. The observed type of the ice conditions for each winter season is marked by a cross. The seasons with regular winter navigation in the Ob' Bay water area (2013–2022) are marked by semi-bold type.

Предложенная типизация не заменяет и не повторяет рассмотренный выше показатель тяжести ледовых условий, основанный на среднесезонном широтном положении южной границы заприпайной полыньи. Это видно при сравнении межгодовой изменчивости двух указанных показателей (см. рис. 4 и табл. 2). Несмотря на идентичность общей направленности временного хода, наблюдаются и частные отличия для некоторых зимних сезонов. Оба варианта формализации сезонного распределения припая органично дополняют друг друга, учитывая как межгодовую изменчивость, так и характер сезонных флуктуаций.

### АНАЛИЗ

В естественных условиях без существенной антропогенной нагрузки параметры ледяного покрова (форма, возраст, площадь распространения и др.) конкретной акватории зависят, в первую очередь, от температурного фона (т. е. суровости зимних условий). В простейшем виде фоновые метеоусловия характеризуются суммой градусо-дней мороза. При этом уровень естественного динамического воздействия на лед также взаимосвязан с СГДМ. При хозяйственной деятельности (в нашем случае — судоходстве) природный уровень динамического воздействия корректируется антропогенным вмешательством при неизменном характере фонового температурного влияния. Такая поправка может отразиться на состоянии ледяного покрова акватории. Для выявления возможного эффекта нами было проанализировано совместное распределение количественных показателей тяжести зимних (температурных) и ледовых условий (т. е. СГДМ и среднесезонной границы заприпайной полыньи). Как было указано выше, для анализа привлекались результаты наблюдений только за 7 месяцев (XI–V). Весь ряд данных был разделен на две части — до начала регулярной зимней навигации (1997–2013 гг.) и после (2014–2022 гг.). Ввиду незначительности судопотока в зимнюю навигацию 2013/14 г. (2 судна), показатели этого сезона были отнесены к естественным условиям. На рис. 6 для обоих периодов приведены зависимости положения границы заприпайной полыньи от температурных условий зимнего сезона. Для антропогенных данных указаны сезон и количество судов (в скобках). Это позволяет сориентироваться в уровне дополнительной нагрузки. На рисунке также отмечено широтное положение Морского канала, Сабетты и СНГКМ.

По положению отметок на распределениях видно, что точки, соответствующие антропогенному периоду, в подавляющем большинстве смещены ниже естественных для аналогичных температурных условий. Данные были аппроксимированы линейными трендами, и на их графиках заметно расхождение в углах наклона. При средних зимних условиях из-за регулярного судоходства смещение к югу среднесезонного положения границы заприпайной полыньи составило порядка 24 минут широты (около 45 км). С переходом к очень легким условиям смещение увеличивается в 2 раза (до 48 минут широты, или 90 км). Полученные результаты свидетельствуют только о сокращении протяженности припая из-за его дополнительного ослабления в результате функционирования ледовых каналов. Для более детального анализа

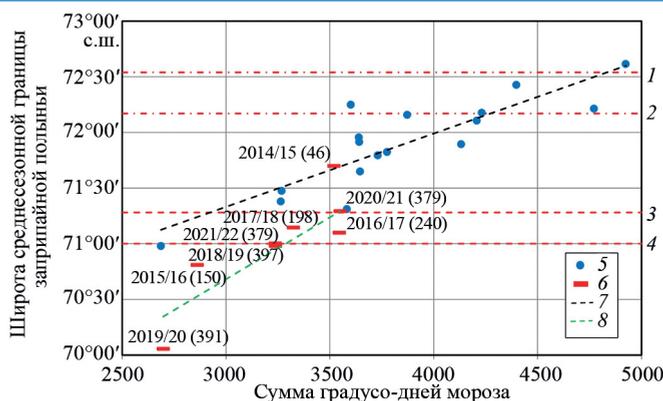


Рис. 6. Взаимосвязь среднесезонной границы заприпайной полыньи и фоновых метеоусловий (СГДМ) за 1997–2022 гг. при разном уровне антропогенного воздействия.

1 и 2 — широта северной и южной границы Морского канала соответственно; 3 и 4 — широта положения терминалов в Сабетте и на СНГКМ соответственно; 5 — отметки для периода естественных воздействий (1997–2013 гг.); 6 — отметки для периода естественных и антропогенных воздействий (2014–2022 гг.), дополнительно указаны сезоны и количество судов (в скобках); 7 — линейный тренд для периода 1997–2013 гг.; 8 — линейный тренд для периода 2014–2022 гг.

Fig. 6. The relationship between the average seasonal boundary of the flaw polynya and background weather conditions (the sum of the freezing degree days) for 1997–2022 with different levels of anthropogenic impact

1 and 2 — latitude of the northern and southern borders of the Sea Channel, respectively; 3 and 4 — the latitude of the terminals in Sabetta and on the Salmanovskoye oil and gas condensate field, respectively; 5 — marks for the period of natural influences (1997–2013); 6 — marks for the period of natural and anthropogenic impacts (2014–2022), additionally, the years and the number of vessels are indicated (in parentheses); 7 — linear trend for the period 1997–2013; 8 — linear trend for the period 2014–2022

и выводов в настоящее время еще недостаточно данных. Так, например, с начала активного судоходства в районе наблюдались достаточно легкие зимние условия. Продолжение наблюдений позволит увеличить длину рядов и, вероятно, получить данные об антропогенном влиянии на фоне средних и тяжелых зим. Дополнительно необходимо учитывать, что фоновые температурные условия и движение судов создают (в рассматриваемом случае) только предпосылки для ослабления неподвижного ледяного покрова. Непосредственно разрушение припая происходит под воздействием динамических природных факторов (ветер, колебания уровня и др.), интенсивность которых также имеет межгодовую изменчивость. Комплексный учет термических и динамических условий позволит не только расширить набор параметров для анализа антропогенного воздействия, но и более полно рассмотреть его на фоне происходящих климатических изменений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа данных по трафику судов, ледовым и температурным условиям в Обской губе за последние 25 лет подтвердили значимое влияние судоходства на распространение припая. Было установлено, что для диапазона от средних до очень легких зимних условий (оценка по СГДМ) из-за интенсификации зимней навигации смещение границы заприпайной полыньи в южном направлении составило 0,4–0,8 градуса широты (45–90 км). Зимние условия тяжелее средних за последние годы в регионе не

фиксировались, и подобные оценки для них не были получены. Для расширения комплексного подхода к проблеме антропогенного воздействия на неподвижный ледяной покров с учетом фоновых климатических изменений требуется продолжение наблюдений с расширением набора параметров и последующим их анализом.

Выявленные изменения ледовых условий являются значимыми не только для северной части Обской губы, но и для всей ее акватории. Переход от припая к дрейфующим льдам разных видов, форм и сплоченности приведет к соответствующей перестройке других природных процессов (динамика вод, литодинамический режим и т. д.). Вслед за этим может поменяться воздействие гидрометеорологических факторов на инженерные объекты — изменение условий плавания, сценариев и абсолютных величин нагрузок на ГТС, экстремальных отметок уровня моря в зимний период и т. д. Это необходимо учитывать при хозяйственном освоении региона.

Рассмотренная проблема актуальна не только для Обской губы, но и в целом для прибрежных акваторий Арктики, осваиваемых человеком. При интенсификации зимнего судоходства в припая эффект от накопления антропогенного воздействия должен на определенном уровне перейти в качественные изменения ледовых условий, что опосредованно может повлиять на хозяйственную деятельность. В частности, подобный сценарий вероятен в Енисейском заливе, где давно осуществляется зимняя навигация, но ее интенсивность еще не достигла критического уровня.

**Конфликт интересов.** Конфликт интересов отсутствует.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках плановой научной тематики ФГБУ ГНЦ РФ «ААНИИ» по теме 5.1.6 НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг.

**Competing interests.** There is no conflict of interests.

**Funding.** The work was prepared within the framework of the planned science topics of FSBI SSC RF “AARI” on the subject 5.1.6 of SRTW of Roshydromet for 2020–2024.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 136 с.
2. Фролов И.Е., Кулаков М.Ю., Фильчук К.В. Баланс льда в Северном Ледовитом океане в 1979–2019 гг. (по данным моделирования) // Лед и снег. 2022. Т. 62. № 1. С. 113–124. doi:10.31857/S2076673422010120.
3. Борзенкова И.И., Ершова А.А., Жильцова Е.Л., Шаповалова К.О. Морской лед Арктического бассейна в свете современных и прошлых климатических изменений // Лед и снег. 2021. Т. 61. № 4. С. 533–546. doi:10.31857/S2076673421040106.
4. Лис Н.А., Егорова Е.С. Климатическая изменчивость ледовитости Баренцева моря и его отдельных районов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 3. С. 234–247. doi:10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247.
5. Bintanja R., Van Oldenborgh G., Katsman C. The effect of increased fresh water from Antarctic ice shelves on future trends in Antarctic Sea ice // Annals of Glaciology. 2015. V. 56 (69). P. 120–126. doi: <https://doi.org/10.3189/2015AoG69A001>.
6. Constable A.J., Harper S., Dawson J., Holsman K., Mustonen T., Piepenburg D., Rost B. Polar Regions // Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2022. P. 2319–2368. doi:10.1017/9781009325844.023.

7. Hao G., Su J, Vihma T., Huang, F. Trends, abrupt shifts and interannual variability of the Arctic Wintertime Seasonal Sea Ice from 1979 to 2019 // *Annals of Glaciology*. 2020. V. 61 (83). P. 441–453. doi: <https://doi.org/10.1017/aog.2020.68>.
8. Андреев О.М., Драбенко Д.В., Виноградов Р.А., Орлова Е.Ю. Влияние потепления климата на прочностные характеристики льда в Обской губе // *Лед и снег*. 2019. Т. 59. № 4. С. 539–545. doi:10.15356/2076-6734-2019-4-409.
9. Виноградов Р.А., Андреев О.М., Орлова Е.Ю. Распространение припая в эстуариях Оби и Енисея при глобальном потеплении // Тезисы докладов всероссийской конференции «Междисциплинарные научные исследования в целях освоения горных и арктических территорий», г. Сочи, 24–29 сентября 2018 г. Сочи, 2018. С. 51.
10. Виноградов Р.А., Андреев О.М., Орлова Е.Ю. Антропогенное воздействие на распространение припая в Обь-Енисейском регионе на фоне климатических изменений // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования», 23–28 сентября 2019, Севастополь. Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2019. С. 167–169.
11. Информационная система государственного портового контроля, Модуль «Регистрация заходов и отходов судов в морских портах Российской Федерации». URL: <https://portcalltable.marinet.ru/> (дата обращения: 01.10.2022).
12. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 26 февраля 2013 г. № 242–р с изменениями от 12.09.2015, 03.10.2015 и 31.08.2019. URL: <https://www.mapm.ru/Port/Sabetta> (дата обращения: 20.10.2022).
13. MarineTraffic. URL: <https://www.marinetraffic.com> (дата обращения 15.10.2022).

## REFERENCES

1. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalev E.G., Smolianitskii V.M. *Nauchnye issledovaniia v Arktike. V. 2. Klimaticheskie izmeneniia ledianogo pokrova morei Evraziiskogo shel'fa*. Scientific research in the Arctic. V. 2. Climatic changes in the ice cover of the seas of the Eurasian shelf. St. Petersburg: Nauka, 2007: 136 p. [In Russian].
2. Frolov I.E., Kulakov M.Iu., Fil'chuk K.V. Ice balance modeling in the Arctic Ocean in 1979–2019. *Led i sneg*. Ice and Snow. 2022, 62 (1): 113–124. doi: 10.31857/S2076673422010120. [In Russian].
3. Borzenkova I.I., Ershova A.A., Zhil'tsova E.L., Shapovalova K.O. Arctic sea ice in the light of current and past climate changes. *Led i sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (4): 533–546. doi: 10.31857/S2076673421040106. [In Russian].
4. Lis N.A., Egorova E.S. Climatic variability of the ice extent of the Barents Sea and its individual areas. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (3): 234–247. doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-234-247. [In Russian].
5. Bintanja R., Van Oldenborgh G., Katsman C. The effect of increased fresh water from Antarctic ice shelves on future trends in Antarctic Sea ice. *Annals of Glaciology*. 2015, 56 (69): 120–126. doi:10.3189/2015AoG69A001.
6. Constable A.J., Harper S., Dawson J., Holsman K., Mustonen T., Piepenburg D., Rost B. Polar Regions. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2022: 2319–2368. doi:10.1017/9781009325844.023.
7. Hao G., Su J, Vihma T., Huang, F. Trends, abrupt shifts and interannual variability of the Arctic wintertime seasonal sea ice from 1979 to 2019. *Annals of Glaciology*. 2020, 61 (83): 441–453. doi:10.1017/aog.2020.68.
8. Andreev O.M., Drabenko D.V., Vinogradov R.A., Orlova E.Iu. Influence of climate warming on the strength characteristics of ice in the Ob Bay. *Led i sneg*. Ice and Snow. 2019, 59 (4): 539–545. doi: 10.15356/2076-6734-2019-4-409. [In Russian].

9. Vinogradov R.A., Andreev O.M., Orlova E.Iu. The fast ice distribution in the Ob and Yenisei Estuaries under global warming. Abstracts of the All-Russian Conference «Multidisciplinary Scientific studies for the development of mountainous and the Arctic areas». Sochi, 2018: 51 [In Russian].

10. Vinogradov R.A., Andreev O.M., Orlova E.Iu. The fast ice distribution in the Ob-Yenisei area under the anthropogenic impact against the background of climate changes. Abstracts of the All-Russian scientific conference «Seas of Russia: Fundamental and Applied Research». Sevastopol: FGBUN FITs MGI, 2019: 167–169. [In Russian].

11. *Informatsionnaia sistema gosudarstvennogo portovogo kontrolya, Modul' «Registratsiia zakhodov i otkhodov sudov v morskikh portakh Rossiiskoi Federatsii»*. Port State Control Information System, Module “Registration of ship entries and departures in the seaports of the Russian Federation”. Available at: <https://portcalltable.marinet.ru/> (accessed 01.10.2022). [In Russian].

12. *Rasporiazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii 26.02.2013 № 242-r s izmeneniiami ot 12.09.2015, 03.10.2015 i 31.08.2019*. Decree of the Government of the Russian Federation of 26 February 2013 № 242–r as amended on 12 September 2015, 3 October 2015 and 31 August 2019. Available at: <https://www.mapm.ru/Port/Sabetta> (accessed 20.10.2022). [In Russian].

13. MarineTraffic. Available at: <https://www.marinetraffic.com> (accessed 15.10.2022).