

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-1-127-139>

УДК 551.326.02



## Электронный архив данных о разрывах в ледяном покрове арктических морей

Л.Н. Дымент<sup>✉</sup>, Е.Г. Бойкая, А.А. Ершова, К.Г. Кортикова,  
В.С. Порубаев, А.А. Чиркова

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>✉</sup>[ldymant@aari.ru](mailto:ldymant@aari.ru)

ЛНД, 0000-0002-3412-922X; ААЕ, 0009-0006-6545-3635; ВСП, 0000-0003-2941-9772

**Аннотация.** Разрывы в ледяном покрове арктических морей являются потенциальными маршрутами более легкого плавания в зимне-весенний период. В связи с этим климатические и прогностические значения их характеристик весьма востребованы для нужд навигации. До настоящего времени не существовало архива, содержащего данные о разрывах за достаточно продолжительный период времени и в виде, позволяющем рассчитывать такие важные характеристики, как преобладающая ориентация и протяженность разрывов. В статье изложен процесс создания архива данных о разрывах в морском ледяном покрове с использованием метода их автоматической идентификации на снимках видимого и инфракрасного диапазона ИСЗ SuomiNPP и Terra с пространственным разрешением 250–1000 м. Формат представления информации в архиве позволяет определять длину и ориентацию каждого разрыва. Проведена верификация данных созданного архива путем сопоставления значений модальной ориентации и удельной длины разрывов, рассчитанных по данным автоматического и экспертного дешифрирования. Показано, что сформированный архив может быть использован при прогнозировании преобладающей ориентации разрывов для нужд судоходства, а также при определении характеристик разрывов, необходимых для исследования их пространственной и временной изменчивости в контексте изменения климата в Арктике.

**Ключевые слова:** автоматическое дешифрирование, арктический ледяной покров, модальная ориентация, нарушения сплошности льда, пространственная плотность разрывов, сверточная нейронная сеть, спутниковые снимки арктических морей

**Для цитирования:** Дымент Л.Н., Бойкая Е.Г., Ершова А.А., Кортикова К.Г., Порубаев В.С., Чиркова А.А. Электронный архив данных о разрывах в ледяном покрове арктических морей. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2026;72(1):127–139. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-1-127-139>

Поступила 20.01.2026

После переработки 24.02.2026

Принята 03.03.2026

© Авторы, 2026


© Authors, 2026

## Electronic archive of data on leads in the Arctic seas

Liudmila N. Dyment✉, Ekaterina G. Boikaya, Anastasia A. Ershova,  
Karina G. Kortikova, Viktor S. Porubaev, Alla A. Chirkova

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

✉ldyment@aari.ru

 LND, 0000-0002-3412-922X; AAE, 0009-0006-6545-3635; VSP, 0000-0003-2941-9772

**Abstract.** Sea ice leads are narrow linear-shaped openings enclosed in ice. They may be covered with nilas or young ice. Climatological values of modal lead orientation and specific lead length are important characteristics for the study of spatial and temporal variability of leads both for needs of navigation in the Arctic and in the context of the Arctic climate change. To calculate climatological lead characteristics, a long-period data archive is required. The main source of observations on leads is satellite imagery. Manual interpretation of leads in satellite images is an extremely labor-intensive process. In 2025, we developed a method for automatic identification of leads retrieved from SuomiNPP infrared satellite images using a convolutional neural network. As a result of image processing with this method, each lead is represented as a polyline and defined by a set of geographic coordinates for the ends of the line segments. This kind of data representation provides calculation of all the main lead characteristics. Using the method, we compiled a data archive on leads in the Laptev and East Siberian Seas for 2012–2025. Data on leads for spring months were derived from visible-range SuomiNPP (for April–May 2012–2025) and Terra (for March–May 2000–2011) images. For this type of images, the model was retrained. The results obtained were verified by comparing the modal orientation and specific length of leads calculated from automatically identified data with those from expert interpretation data. It was found that the difference in modal orientation of leads was minor in a vast majority of cases: the average difference was 7–8°. Differences in the specific lead length were also small, averaging 1–10 m/km<sup>2</sup>. Data on leads in the winter months of 2000–2011 were retrieved from the free available results of processing the MODIS ice surface temperature data by applying the “multiway” algorithm, which is part of our method for automatic identification of leads. Verification of the results obtained in this way showed that the average difference in modal orientation values was 11°. Therefore, using lead data from all the datasets produced will not introduce significant error in the subsequent determination of generalized lead characteristics, provided that differences in the spatial resolution are taken into account. This enables us to aggregate all the datasets produced into a single data archive on leads in the Laptev and East Siberian seas in 2000–2025.

**Keywords:** automatic interpretation, Arctic sea ice leads, ice convolutional neural network, ice openings, modal orientation, satellite images, spatial density of leads

**For citation:** Dyment L.N., Boikaya E.G., Ershova A.A., Kortikova K.G., Porubaev V.S., Chirkova A.A. Electronic archive of data on leads in the Arctic seas. *Arctic and Antarctic Research*. 2026;72(1):127–139. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-1-127-139>

Received 20.01.2026

Revised 24.02.2026

Accepted 03.03.2026

### Введение

Морской ледяной покров неоднороден. Одним из его характерных структурных элементов являются разрывы — протяженные пространства открытой воды в виде трещин, разводий и каналов среди сплошного льда. В ходе происходящего в разрывах активного ледообразования они покрываются ниласом или молодым льдом. Разрывы могут простираются на сотни и тысячи километров, при этом их ширина варьирует от нескольких метров до нескольких километров.

Образование разрывов обуславливается процессами деформации растяжения и сдвига ледяного покрова, возникающими вследствие пространственной неравномерности поля скорости дрейфа льда. Последняя обусловлена главным образом

структурой поля атмосферного давления и особенностями распределения суши [1]. При отсутствии существенных изменений анемобарических условий ориентация в пространстве и размеры разрывов могут сохраняться на протяжении синоптического периода (до 10 суток). При возникновении подвижек и деформаций в ледяном покрове, вызванных изменениями поля скорости дрейфа, существующие разрывы могут закрыться в результате сжатия, а в образовавшихся зонах растяжения и сдвига будут формироваться новые разрывы с иными характеристиками.

Данные о разрывах в дрейфующем ледяном покрове представляют большой интерес при навигации в арктических морях, так как они образуют естественные каналы с более легкими ледовыми условиями. Опыт проведения высокоширотных рейсов доказал значительное повышение эффективности плавания при использовании попутных разрывов [2, 3]. В связи с этим неоднократно указывалось на необходимость включения информации о фактической и прогностической модальной ориентации разрывов в гидрометеорологическое обеспечение (ГМО) рейсов в Арктическом бассейне и арктических морях [4, 5]. Особенно эффективно использование разрывов при навигации в зимне-весенний период, когда арктические моря полностью покрываются льдом возрастом от тонкого однолетнего и старше. При этом наибольший интерес представляют крупные разрывы шириной от 200 м, что позволяет осуществлять в них свободное маневрирование судна или каравана. В летние месяцы сплоченность льда в арктических морях понижается, и разрывы как таковые уже не выделяются.

Большой объем исходных данных о разрывах необходим как для проведения исследований пространственной и временной изменчивости их обобщенных характеристик в контексте изменения климата в Арктике, так и для разработки методов прогнозов преобладающей ориентации разрывов для нужд навигации. Источником информации о разрывах в арктическом ледяном покрове служат снимки искусственных спутников Земли (ИСЗ). В связи со значительными размерами самих разрывов предпочтение отдается снимкам оптического диапазона низкого и среднего пространственного разрешения (ПР), позволяющим охватить одновременно значительную по площади акваторию. На таких снимках средние (ширина 200–500 м) и большие (ширина более 500 м) разрывы отображаются в виде темных линий на фоне светлого льда. Дешифрирование разрывов на снимках ИСЗ оптического диапазона вручную является крайне трудоемким процессом. Тем не менее на протяжении нескольких лет в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (АНИИ) проводилось экспертное дешифрирование разрывов на снимках инфракрасного (ИК) диапазона радиометра VIIRS ИСЗ SuomiNPP (ПР 375 м), что позволило создать электронный архив разрывов в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском. Формат данных архива позволяет рассчитывать ориентацию и протяженность каждого занесенного в него разрыва.

До 2025 г. зарубежными исследователями были разработаны методы автоматического дешифрирования разрывов на снимках ИСЗ Terra с ПР 1000 м [6–8], однако анализ полученных результатов, представленных авторами, выявил их непригодность для получения данных об ориентации и протяженности разрывов [9].

В 2025 г. авторами данной статьи был разработан метод автоматической идентификации разрывов на снимках ИК-диапазона ИСЗ SuomiNPP, позволяющий представлять каждый выделенный на снимке разрыв как отдельный объект — ломаную линию, заданную последовательностью географических координат концов образующих ее отрезков [10]. Таким образом, вид получаемых данных аналогичен резуль-

татам ручного экспертного дешифрирования и позволяет рассчитывать по ним все основные характеристики разрывов. Появление данного метода позволяет в кратчайшие сроки сформировать архив данных о разрывах по снимкам ИК-диапазона ИСЗ SuomiNPP. Кроме того, на основе разработанного алгоритма могут быть созданы методы обработки снимков оптического диапазона других ИСЗ и с другим ПР. Таким образом, появилась реальная возможность значительно увеличить объем имеющейся информации о разрывах в ледяном покрове арктических морей, которая будет востребована для ГМО круглогодичных рейсов по трассе Северного морского пути.

### Формирование архива данных о разрывах за 2012–2025 гг.

Для формирования электронного архива использовались снимки ИК-диапазона ИСЗ SuomiNPP за январь–март 2012–2025 гг. и ноябрь–декабрь 2012–2024 гг. по акватории морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, полученные ААНИИ с помощью спутниковой наземной станции Российской научной экспедиции на архипелаге Шпицберген. При наличии за одну дату нескольких снимков одной и той же акватории из них отбирался один наиболее информативный, т. е. с наибольшей площадью моря, свободной от плотной облачности и, как следствие, доступной для дешифрирования разрывов. Всего за указанные периоды было отобрано около 4000 снимков, на которых была проведена автоматическая идентификация разрывов при помощи ранее разработанного метода [10]. Поскольку полоса обзора ИСЗ SuomiNPP превышает размер акватории одного моря, на снимках моря Лаптевых присутствует часть акватории Восточно-Сибирского моря и наоборот. Для предотвращения дублирования информации о разрывах в зоне, расположенной на границе морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, перед занесением в архив данные проверялись на уникальность.

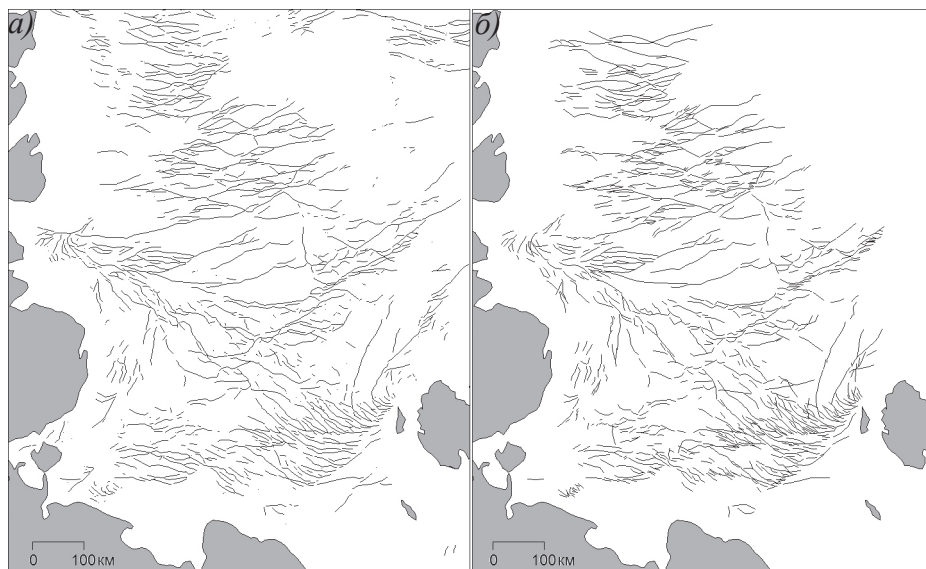


Рис.1. Результаты автоматического (а) и экспертного (б) дешифрирования разрывов в море Лаптевых на снимке, полученном с ИСЗ SuomiNPP 3 января 2024 г.

Fig. 1. Results of automatic (a) and expert (б) interpretation of leads in the Laptev Sea in SuomiNPP image on January 3, 2024

Выборочная визуализация полученных результатов и данных за соответствующие даты из электронного архива ААНИИ, сформированного в ходе ручного дешифрирования, показала совпадение в расположении и ориентации подавляющего большинства разрывов. Пример данных о разрывах, полученных при автоматическом и экспертном дешифрировании снимка ИК-диапазона ИСЗ SuomiNPP, представлен на рис. 1.

Поскольку основное предназначение создаваемого архива заключается в определении характеристик разрывов, для проверки данных, полученных путем автоматической идентификации разрывов, по ним были рассчитаны значения модальной ориентации  $\alpha_a$  и удельной длины разрывов  $l_a$  (суммарная протяженность разрывов на  $1 \text{ км}^2$ ) по квадратам сетки  $100 \times 100 \text{ км}$  на акватории морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. Значения характеристик  $\alpha_a$  и  $l_a$  были сопоставлены с соответствующими значениями, рассчитанными по данным ручного дешифрирования ( $\alpha_p$  и  $l_p$ ). При расчете использовались все данные за январь–март и ноябрь–декабрь 2018–2025 гг., имеющиеся в электронном архиве разрывов ААНИИ, что соответствовало информации о разрывах за 449 дней и являлось результатом экспертного дешифрирования почти 700 снимков. Для каждого  $i$ -го квадрата, обеспеченного данными, рассчитывались различия в значениях модальной ориентации  $\Delta\alpha_i = |\alpha_{pi} - \alpha_{ai}|$  и удельной длины разрывов  $\Delta l_i = l_{pi} - l_{ai}$ . Общее количество квадратов, по которым проводилось сопоставление, равнялось 23125.

В результате проведенного расчета было установлено, что среднее значение различий модальной ориентации разрывов  $\overline{\Delta\alpha}$  составляет  $8^\circ$ , а удельной длины  $\overline{\Delta l}$  —  $1,0 \text{ м/км}^2$ . Если среднее квадратическое отклонение (СКО) различий модальной ориентации невелико и составляет  $9,2^\circ$ , то СКО различий удельной длины значительно выше:  $22,3 \text{ м/км}^2$ .

На рис. 2 приведен график функции распределения различий в удельной длине разрывов  $\Delta l_i$ . Как видно из графика, при автоматической идентификации разрывов значительное занижение удельной длины разрывов (более чем на  $30 \text{ м/км}^2$ ) происходит менее чем в 10 % случаев.

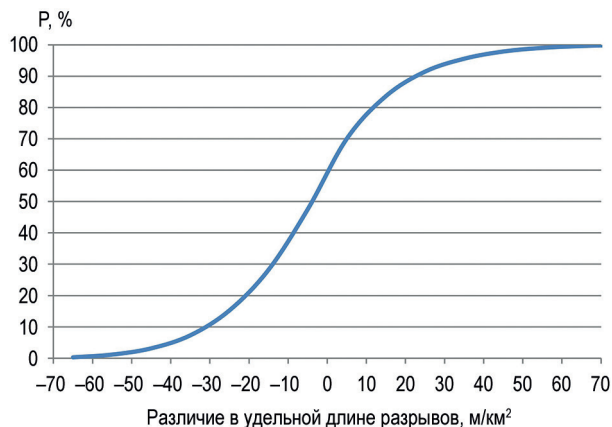


Рис. 2. Функция распределения различий в значениях удельной длины разрывов, рассчитанных по данным экспертного и автоматического дешифрирования снимков ИК-диапазона ИСЗ SuomiNPP

Fig. 2. Distribution function of differences in value of specific lead length calculated from expert interpretation and automatic interpretation of the SuomiNPP images in the infrared range

Отрицательные значения на оси абсцисс (см. рис. 2) соответствуют превышению количества разрывов, идентифицированных автоматически, над количеством, полученным по данным ручного дешифрирования. Как было установлено, данные случаи свидетельствуют не об ошибочной работе алгоритма [10], а о ситуациях, когда эксперт выделил не все имеющиеся разрывы в рассматриваемом квадрате. Пропуски разрывов экспертом в основном обусловлены тем, что при формировании архива ААНИИ стояла задача определения преобладающей ориентации разрывов в квадратах сетки, поэтому при наличии большого количества параллельно идущих разрывов эксперт дешифрировал не все разрывы, а лишь их часть.

Значения удельной длины разрывов в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, рассчитанные по всем данным архива ААНИИ при осреднении по квадратам  $100 \times 100$  км, варьируют от 10 до  $188 \text{ м/км}^2$ . Среднее значение удельной длины составляет  $40 \text{ м/км}^2$ , а ее СКО —  $24,4 \text{ м/км}^2$ . В связи с этим в качестве критерия «успешной автоматической идентификации разрывов» нами было принято различие между значениями удельной длины разрывов, рассчитанными по данным автоматического и ручного дешифрирования, равное  $10 \text{ м/км}^2$ , т. е. менее 0,5 СКО. Доля случаев, когда при использовании данных автоматического дешифрирования различия в определении удельной длины разрывов  $\Delta l_i$  не превышают  $10 \text{ м/км}^2$ , составляет более 70 % (см. рис. 2).

При температуре воздуха выше  $-6 \text{ }^\circ\text{C}$  качество дешифрирования ледяного покрова по снимкам ИК-диапазона при наличии даже легкой облачности существенно ухудшается [11]. В связи с этим нами было принято решение для идентификации разрывов в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском в весенние месяцы (апрель–май) использовать снимки как ИК, так и видимого диапазона. Чтобы иметь возможность осуществлять автоматическое дешифрирование разрывов на снимках видимого диапазона спутника SuomiNPP, потребовалось переобучить нейросетевую модель, входящую в состав метода автоматической идентификации разрывов [10]. Для этого нами был создан новый обучающий набор данных, представляющий собой результаты ручного дешифрирования 30 снимков видимого диапазона ИСЗ SuomiNPP. Разработка модели производилась с использованием сверточной нейронной сети (U-net) аналогично разработке модели для снимков ИК-диапазона [10]. Для оценки качества сегментации использовались коэффициент Жаккара (IoU) и коэффициент Соренсена–Дайса (Dice Coefficient), которые на тестовой выборке составили:  $\text{IoU} = 0,75$ ,  $\text{Dice Coefficient} = 0,89$ .

Верификация метода автоматической идентификации разрывов на снимках видимого диапазона ИСЗ SuomiNPP также проводилась путем расчета модальной ориентации и удельной длины разрывов, осредненных по квадратам  $100 \times 100$  км, по данным автоматического и экспертного дешифрирования и сопоставления полученных результатов. В расчете использовались данные, полученные в ходе ручного дешифрирования разрывов в ледяном покрове морей Лаптевых и Восточно-Сибирского на 20 снимках SuomiNPP видимого диапазона. Общее число квадратов, по которым проводилось сопоставление, равнялось 450. В среднем значение различий в модальной ориентации разрывов  $\overline{\Delta\alpha}$  составило  $8^\circ$  при СКО, равном  $8,5^\circ$ , а в значениях удельной длины разрывов  $\overline{\Delta l}$  —  $9,7 \text{ м/км}^2$  при СКО, равном  $11,9 \text{ м/км}^2$ . По сравнению с соответствующими величинами, полученными при верификации данных автоматического дешифрирования снимков ИК-диапазона, различия в определении

модальной ориентации принимают практически те же значения, а в определении удельной длины изменились. Увеличение средней величины различий в значениях удельной длины разрывов, рассчитанных по данным автоматического и экспертного дешифрирования, при уменьшении ее СКО связано с тем, что ручное дешифрирование снимков видимого диапазона, используемых для проверки, проводилось более тщательно, т. к. его цель состояла именно в верификации результатов автоматической идентификации разрывов. Случаи пропуска разрывов экспертом встречались крайне редко. Таким образом, при автоматическом дешифрировании разрывов происходит некоторое занижение их удельной длины, что мы отмечали ранее [10].

### **Формирование архива данных о разрывах за март–май 2000–2011 гг.**

Спутник SuomiNPP начал свою работу в 2012 г. Для получения данных о разрывах за более ранний период можно использовать архивные снимки спектрорадиометра MODIS спутника Terra, имеющиеся в свободном доступе [12]. В видимом диапазоне ПР снимков MODIS составляет 250 м, однако возможность использовать эти снимки для арктических морей наступает только с марта, когда заканчивается период полярной ночи. Из архива спутниковых снимков Terra нами было получено 1443 снимка акватории морей Лаптевых и Восточно-Сибирского за март–май 2000–2011 гг.

Для автоматического дешифрирования разрывов на снимках видимого диапазона спутника Terra также потребовалось создание соответствующего обучающего набора данных и переобучение модели. Обучающий набор данных был сформирован в ходе ручного дешифрирования разрывов на снимках морей Лаптевых и Восточно-Сибирского за март–апрель 2000–2024 гг. Модель, разработанная для обработки снимков видимого диапазона ИСЗ Terra, показала на тестовой выборке значения метрик  $IoU = 0,66$ ,  $Dice\ Coefficient = 0,71$ .

Верификация данных о разрывах, полученных при автоматическом дешифрировании снимков видимого диапазона ИСЗ Terra, проводилась аналогично данным со снимков ИСЗ SuomiNPP. Расчет модальной ориентации и удельной длины разрывов проводился в 649 квадратах, обеспеченных данными при выполнении ручного дешифрирования разрывов на 17 снимках видимого диапазона ИСЗ Terra морей Лаптевых и Восточно-Сибирского за март–апрель 2000–2024 гг. Среднее значение различий в модальной ориентации разрывов  $\overline{\Delta\alpha}$  составило  $7^\circ$  при СКО, равном  $7,1^\circ$ , а в удельной длине разрывов  $\overline{\Delta l}$  —  $1,5\text{ м/км}^2$  при СКО, равном  $8,5\text{ м/км}^2$ .

### **Формирование архива данных о разрывах за январь–февраль и ноябрь–декабрь 2000–2011 гг.**

Снимки спектрорадиометра MODIS с ИСЗ Terra в ИК-диапазоне, позволяющие получать данные по арктическим морям в темное время года (ноябрь–февраль), имеют ПР 1000 м. Сопоставлять абсолютные значения суммарной протяженности разрывов, полученной по данным снимков с ПР 375 м и 1 км, некорректно. Однако, согласно ранее проведенным исследованиям [13], преобладающая ориентация разрывов не зависит от ПР снимка. Следовательно, для расчета модальной ориентации могут быть использованы данные о разрывах, полученные со снимков с ПР 1000 м.

С учетом того, что спутник Terra в этом году прекращает свою работу, было принято решение не создавать модель для снимков ИК-диапазона этого ИСЗ. Для пополнения архива за ноябрь–февраль 2000–2011 гг. была использована информа-

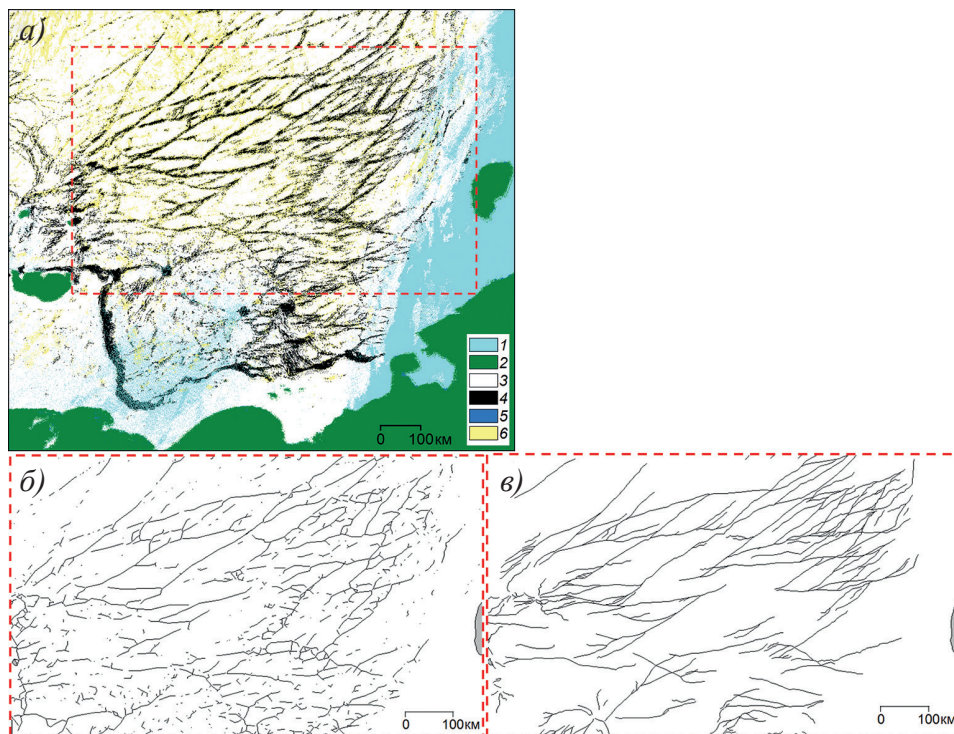


Рис. 3. Разрывы в ледяном покрове Восточно-Сибирского моря 20.02.2019.

*a* — визуализация данных [6]; *б* — данные [6] после скелетизации и обработки алгоритмом «ветвления»; *в* — результаты экспертного дешифрирования снимка ИК-диапазона ИСЗ SuomiNPP. 1 — облака; 2 — суша; 3 — морской лед; 4 — разрывы; 5 — вода; 6 — артефакты

Fig. 3. Leads in the East-Siberian Sea ice cover on February 20, 2019.

*a* — data [6] visualization; *б* — data [6] after skeleting and processing by the “multiway” algorithm; *в* — results of expert manual interpretation of SuomiNPP image in the infrared range. 1 — clouds; 2 — land; 3 — sea ice; 4 — leads; 5 — water; 6 — artefacts

ция о разрывах, полученная из находящихся в свободном доступе данных о типе подстилающей поверхности в Северном Ледовитом океане [6] за соответствующие периоды. Данные [6] были сформированы с помощью алгоритма автоматической идентификации разрывов, разработанного коллективом авторов [14]. Алгоритм [14] использует массивы данных температуры поверхности льда, которая вычисляется по данным ИК-диапазона спектрорадиометра MODIS (продукт MOD29/MYD29) ИСЗ Terra/Aqua. В результате работы алгоритма в узлах сетки с шагом 1 км, охватывающей весь Северный Ледовитый океан, устанавливаются значения ключа. Ключ принимает одно из шести возможных значений, обозначающее облака, сушу, морской лед, разрывы, открытую воду или артефакты. Такое представление данных позволяет визуализировать изображение ледяного покрова с обнаруженными разрывами, но не позволяет определить характеристики каждого разрыва как отдельного объекта (рис. 3а). Визуализация данных, получаемых по этому алгоритму, и сопоставление их с результатами экспертного дешифрирования разрывов из

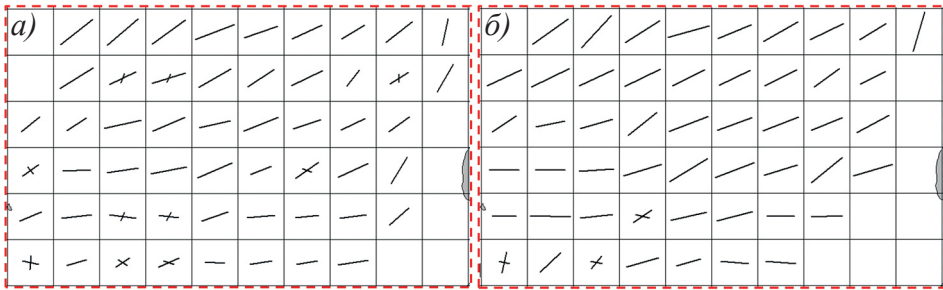


Рис. 4. Модальная ориентация разрывов 20.02.2019, рассчитанная по квадратам сетки 100×100 км: *a* — по данным [6] после скелетизации и обработки алгоритмом «ветвления»; *б* — по данным экспертного дешифрирования снимка ИК-диапазона ИСЗ SuomiNPP

Fig. 4. Modal orientation of leads averaged in grid squares 100×100 km on February 20, 2019: *a* — calculated from data [6] after skeleting and processing by the “multiway” algorithm; *б* — calculated from expert interpretation of SuomiNPP image in the infrared range

архива ААНИИ показали хорошее распознавание разрывов при наличии легкой облачности и совпадение в ориентации наиболее крупных систем разрывов на акватории морей Лаптевых и Восточно-Сибирском за исключением зон, расположенных вблизи границы припая [9].

По данным типа подстилающей поверхности [6] были построены бинарные маски разрывов, созданные путем визуализации узлов сетки со значением ключа «разрыв». Далее для корректной работы алгоритма скелетизации к изображению применялась комбинация трех фильтров: Vox Blur, Гауссовского и медианного — и приведение вновь к бинарному виду по пороговому значению яркости. Данное преобразование позволяет объединить близко расположенные точки, относящиеся к разрывам, в полигоны и исключить шум типа «соль и перец», возникающий из-за одиночных пикселей со значением ключа «разрыв». Полученные бинарные изображения с полигонами обрабатывались по алгоритму «ветвления», входящему в состав метода автоматической идентификации разрывов [10]. В качестве примера на рис. 3б представлены разрывы, полученные после обработки фрагмента снимка (см. рис. 3а) вышеизложенным способом, а на рис. 3в для сравнения — результаты экспертного дешифрирования разрывов на снимке ИК-диапазона ИСЗ SuomiNPP за ту же дату по данным электронного архива ААНИИ.

Информация с разных ИСЗ может различаться не только ПР, но и временем совершения съемки в течение суток. Тем не менее, несмотря на некоторые различия в протяженности и плотности расположения разрывов в пространстве (см. рис. 3), модальная ориентация разрывов при осреднении по квадратам сетки принимает близкие значения. На рис. 4 модальная ориентация представлена ориентированными отрезками, длина которых пропорциональна обеспеченности модального интервала, характеризующей степень устойчивости преобладающего направления разрывов. При двумодальном распределении ориентации разрывов в квадрате на рисунке указываются оба модальных направления (см. рис. 4).

Для верификации такого способа получения данных использовалась информация о разрывах в ледяном покрове морей Лаптевых и Восточно-Сибирского за 35 дат в период январь–февраль 2018–2022 гг., имевшаяся в электронном архиве ААНИИ.

По квадратам  $100 \times 100$  км, расположенным вне зон границы припая, были рассчитаны значения модальной ориентации разрывов по сформированным нами данным и по данным экспертного дешифрирования разрывов на снимках ИК-диапазона ИСЗ SuomiNPP. Всего в расчете участвовало 926 квадратов. Среднее значение различий в модальной ориентации  $\Delta\alpha$  составило  $11^\circ$  при СКО  $12,0^\circ$ . Сопоставление значений удельной длины разрывов не проводилось из-за значительной разницы в ПР используемых снимков ИК-диапазона: 1000 м у ИСЗ Terra и 375 м у ИСЗ SuomiNPP.

### Обсуждение результатов

Проведенная верификация всех видов данных о разрывах, которые использовались при формировании архива, показала, что значения модальной ориентации разрывов, рассчитанные по данным ручного и автоматического дешифрирования, в подавляющем большинстве случаев различаются незначительно. Опыт гидрометеорологического обеспечения высокоширотных плаваний позволил установить, что разрывы, направление которых отличается от генерального курса судна менее чем на  $30^\circ$ , могут считаться попутными и использоваться судоводителями [3]. В связи с этим среднее различие в определении модальной ориентации разрывов  $\Delta\alpha$  ( $7-11^\circ$  в зависимости от вида спутниковых данных) можно считать вполне допустимым. По результатам расчетов было установлено, что различие, не превышающее  $30^\circ$ , между значениями модальной ориентации разрывов, полученных по данным автоматического и экспертного дешифрирования, наблюдается в 98 % случаев при использовании снимков ИК-диапазона ИСЗ SuomiNPP и в 99 % при использовании снимков видимого диапазона ИСЗ SuomiNPP и Terra. Несколько ниже эта величина при расчете значений ориентации разрывов по спутниковым данным с ПР 1000 м (ИК-диапазон ИСЗ Terra) и составляет 92 %.

Как уже упоминалось ранее, различия в ПР спутниковой информации не оказывают существенного влияния на получаемое значение преобладающей ориентации разрывов, поэтому при исследовании пространственной и временной изменчивости этой характеристики можно объединять все полученные данные о разрывах в один архив.

Полученная в ходе верификации средняя величина различия значений удельной длины разрывов  $\overline{\Delta l}$  позволяет считать вполне достоверным значение этой характеристики при расчете по данным, полученным с помощью разработанного нами метода автоматической идентификации разрывов. При расчете обобщенных значений плотности разрывов, требующих объединения данных от разных источников, отличие ПР снимков видимого диапазона ИСЗ Terra (250 м) от ПР снимков ИСЗ SuomiNPP (375 м) может быть учтено путем применения поправочного коэффициента, приведенного в работе [13].

К значениям плотности разрывов, рассчитанным по информации из архива, основанной на данных MODIS с ПР 1000 м, следует относиться с осторожностью. Необходимо быть уверенным, что в анализируемую акваторию не включена зона заприпайных полыней и раздробленности льда.

Таким образом, при учете указанных выше ограничений, использование созданного электронного архива данных не внесет существенной погрешности при последующем определении обобщенных характеристик ориентации и плотности разрывов.

## **Заключение**

С помощью метода автоматического дешифрирования разрывов на снимках оптического диапазона ИСЗ создан архив данных о разрывах в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском за январь–май и ноябрь–декабрь 2000–2025 гг. Результаты автоматического дешифрирования представляются в таком же виде, как и в архиве данных о разрывах, созданном ранее в ААНИИ по материалам ручного экспертного дешифрирования снимков ИСЗ, т. е. позволяют рассчитывать ориентацию и протяженность каждого отдельного разрыва.

По сравнению с архивом ААНИИ количество снимков ледяного покрова обеих морей, по которым проводилась идентификация разрывов, увеличилось более чем в 7 раз и достигло 6000. В дальнейшем будет производиться постоянное пополнение архива новыми данными о разрывах в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском по спутниковой информации VIIRS ИСЗ SuomiNPP, которая в настоящее время принимается и обрабатывается в ААНИИ.

Разработанные нейросетевые модели для дешифрирования разрывов на разных видах спутниковых снимков будут применены для создания аналогичных архивов данных о разрывах в ледяном покрове других арктических морей. Кроме того, отработанная методика автоматического дешифрирования разрывов при необходимости даст возможность распространить ее на снимки других ИСЗ, в том числе и отечественных.

Полученный длинный ряд данных о разрывах в ледяном покрове морей Российской Арктики позволит рассчитать характеристики разрывов, проанализировать закономерности их пространственной и временной изменчивости, выявить сезонную цикличность, межгодовые тренды и возможные изменения, связанные с климатическими колебаниями. Полученные данные могут быть использованы в оперативной и прогностической работе по обеспечению судов информацией о преобладающей ориентации разрывов в ледяном покрове морей Лаптевых и Восточно-Сибирском.

**Доступность данных.** Фрагмент архива данных о разрывах, полученного по результатам автоматического дешифрирования разрывов на спутниковых снимках VIIRS ИСЗ SuomiNPP за ледовый сезон с ноября 2024 г. по май 2025 г. и MODIS ИСЗ Terra за весенние месяцы с марта по май 2010 г., находится в открытом доступе на сайте Мирового центра данных по морскому льду ФГБУ ААНИИ (МЦД МЛ ААНИИ) по адресу: [http://wdc.aari.ru/projects/grant\\_25-27-00008/](http://wdc.aari.ru/projects/grant_25-27-00008/).

**Конфликт интересов.** Авторы не имеют конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00008, <https://rscf.ru/project/25-27-00008/>.

**Data availability statement.** A fragment of the data archive on leads, resulting from automatic interpretation of leads in VIIRS (SuomiNPP) satellite images for the ice season from November 2024 to May, 2025, and MODIS (Terra) satellite images for the spring months from March to May, 2010, is openly available in the AARI World Data Centre on Sea Ice (AARI WDC Sea-Ice) website at [http://wdc.aari.ru/projects/grant\\_25-27-00008/](http://wdc.aari.ru/projects/grant_25-27-00008/).

**Competing interests.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** The research was funded by Russian Science Foundation, grant number 25-27-00008, <https://rscf.ru/project/25-27-00008/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Горбунов Ю.А., Карелин И.Д., Лосев С.М. К вопросу о причинах нарушения сплошности морского ледяного покрова в зимний период. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 1986;62:110–116.  
Gorbunov Yu.A., Karelin I.D., Losev S.M. On the causes of sea ice cover discontinuities in winter season. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 1986;62:110–116. (In Russ.).
2. Фролов С.В. Влияние ориентации нарушений сплошности льда на эффективность движения судов в Арктическом бассейне в летний период. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2013;3:35–45.  
Frolov S.V. Impact of orientation of ice discontinuities on the efficiency of ship traffic in the Arctic basin in summer. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2013;3(97):35–45. (In Russ.).
3. Фролов С.В., Клячкин С.В. Учет влияния ориентации разрывов в ледяном покрове на скорость движения судна во льдах. *Труды ААНИИ*. 2001;443:103–111.  
Frolov S.V., Kliachkin S.V. Accounting for the impact of orientation of leads in sea ice cover on the speed of ship movement in ice. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Transactions of AARI*. 2001;443:103–111. (In Russ.).
4. Фролов С.В., Юлин А.В. Специализированное гидрометеорологическое обеспечение высокоширотных рейсов НЭС «Академик Федоров» в 2000, 2004–2005 гг. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2007;1(75):128–139.  
Frolov S.V., Yulin A.V. Specialized hydrometeorological providing for high latitude voyages of RV “Akademik Fedorov” in 2000, 2004–2005 years. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2007;1(75):128–139. (In Russ.).
5. Лосев С.М., Горбунов Ю.А. Диагностика и среднесрочный прогноз нарушений сплошности морского ледяного покрова. *Труды ААНИИ*. 1998;438:13–25.  
Losev S.M., Gorbunov Yu.A. Diagnostics and medium-range forecast of sea ice cover discontinuities. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Transactions of AARI*. 1998;438:13–25. (In Russ.).
6. Willmes S., Heinemann G., Reiser F. ArcLeads: Daily sea-ice lead maps for the Arctic, 2002–2021, NOV-APR [dataset]. *PANGAEA*; 2023. Available at: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.955561> (accessed 30.11.2025).
7. Hoffman J.P., Ackerman S.A., Liu Y., Key J.R. The detection and characterization of arctic sea ice leads with satellite imagers. *Remote Sensing*. 2019;11(5):521. <https://doi.org/10.3390/rs11050521>
8. Hoffman J.P., Ackerman S.A., Liu Y., Key J.R., McConnell I.L. VIIRS Sea ice leads detections using a U-Net [dataset]. Dryad; 2022. Available at: <https://doi.org/10.5061/dryad.1vhmgqwd> (accessed 30.11.2025).
9. Дымент Л.Н., Ершова А.А., Бойкая Е.Г., Кортикова К.Г. Проблема автоматического дешифрирования разрывов в морском ледяном покрове по спутниковым снимкам. *Исследование Земли из космоса*. 2025;4:52–61. <https://doi.org/10.7868/S3034540525040046>  
Dyment L.N., Ershova A.A., Boikaya E.G., Kortikova K.G. The problem of automatic identification of leads in the sea ice cover from satellite images. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa = Earth Research from Space*. 2025;4:52–61. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S3034540525040046>
10. Бойкая Е.Г., Кортикова К.Г., Дымент Л.Н., Ершова А.А. Автоматическая идентификация разрывов в морском ледяном покрове по снимкам спутника SuomiNPP. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2025;22(6):43–51. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-6-43-51>

- Boikaya E.G., Kortikova K.G., Dymant L.N., Ershova A.A. Automatic identification of sea ice leads from SuomiNPP satellite images. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2025;22(6):43–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-6-43-51>
11. Смирнов В.Г. (ред.). *Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей*. СПб.: ААНИИ; 2011. 240 с.
  12. NASA's Earth Science Data and Information System (ESDIS) Worldview mapping application. NASA Worldview. Available at: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (accessed 04.12.2025).
  13. Дымент Л.Н., Аксенов П.В., Лосев С.М., Порубаев В.С. Влияние пространственного разрешения снимков ИСЗ на получаемые значения характеристик разрывов в ледяном покрове арктических морей. *Исследование Земли из космоса*. 2021;3:81–86. <https://doi.org/10.31857/S0205961421030039>  
Dymant L.N., Aksenov P.V., Losev S.M., Porubaev V.S. Influence of the spatial resolution of satellite images on the obtained values of the characteristics of leads in the ice cover of the Arctic seas. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021;57(9):1081–1086. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090462>
  14. Reiser F., Willmes S., Heinemann G. A new algorithm for daily sea ice lead identification in the Arctic and Antarctic winter from thermal-infrared satellite imagery. *Remote Sensing*. 2020;12(12):1957. <https://doi.org/10.3390/rs12121957>