

Изменение оледенения Новой Земли по данным дистанционного зондирования

*А.А. Алейников¹⁾, О.Н. Липка^{1,2)}**

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Россия, 109028, г. Москва, Покровский бульвар, д. 11

*Адрес для переписки: olipka@mail.ru

Реферат. В условиях изменений климата оледенение архипелага Новая Земля сокращается, что подтверждается данными дистанционного зондирования. Для оценки была использована картосхема ледников Новой Земли по состоянию на 1952 г., мозаика космических снимков программы «Corona» за 1961-1962 гг.; мозаика Landsat-7 ETM+ за август 2001 г.; мозаика Landsat-8 OLI/TIRS и Landsat-7 ETM+ за август-сентябрь 2013 г.; мозаика Landsat-8 OLI/TIRS за август 2023 г. и Sentinel-2A/B за сентябрь 2023 г. Сравнение покрытой льдом площади конца летнего сезона 2023 г. с картами и таблицами Каталога ледников СССР показало суммарное сокращение до $21\,702 \pm 108$ км², т.е. на 9.9%. Наиболее активно процесс дегляциации проходит южнее 74.5° с.ш., где площадь оледенения сократилось на 33.3%. Средняя скорость сокращения ледников Новой Земли выросла с 29.8 км²/год в период 1961-2001 гг. до 57.7 км²/год за период 2013-2023 гг. Сокращение ледников бассейна Баренцева моря происходит интенсивнее сокращения ледников бассейна Карского моря в среднем 1.7 раза.

Ключевые слова. Новая Земля, изменения климата, дистанционное зондирование, деградация оледенения.

Changes in glaciation of Novaya Zemlya according to remote sensing data

*A.A. Aleynikov¹⁾, O.N. Lipka^{1,2)}**

¹⁾ Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya st., 107258, Moscow, Russian Federation

²⁾ National Research University Higher School of Economics,
11, Pokrovsky Boulevard, 109028, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: olipka@mail.ru

Abstract. In the context of climate change, glaciation of the Novaya Zemlya archipelago is decreasing, which is confirmed by remote sensing data. For the assessment, we used a map of Novaya Zemlya glaciers as of 1952, a mosaic of space images from the Corona program for 1961-1962; Landsat-7 ETM+ mosaic for August 2001; mosaic of Landsat-8 OLI/TIRS and Landsat-7 ETM+ for August – September 2013; Landsat-8 OLI/TIRS mosaic for August 2023 and Sentinel-2A/B for September 2023. A comparison of the ice-covered area at the end of the 2023 summer season with maps and tables of the USSR Glacier Catalog showed a total reduction to $21702 \pm 108 \text{ km}^2$, i.e. by 9.9%. The deglaciation process is most active south of 74.5° N , where the glaciation area has decreased by 33.3%. The average rate of shrinkage of Novaya Zemlya glaciers increased from $29.8 \text{ km}^2/\text{year}$ in 1961-2001 up to $57.7 \text{ km}^2/\text{year}$ in 2013-2023. The reduction of glaciers in the Barents Sea basin is more intense than near the Kara Sea on average in 1.7 times.

Keywords. Novaya Zemlya archipelago, climate change, remote sensing, glaciation degradation.

Введение

Деграция оледенения горных систем материков, а также островов Арктики считается одним из наиболее очевидных и доказанных проявлений изменений климата (Roe et al., 2017; IPCC, 2019). Наблюдаемая в настоящее время скорость потери массы арктических ледников выше, чем в любой из периодов за последние 4000 лет (IPCC, 2019), и увеличилась в XXI веке (Hugonnet et al., 2021). Регулярно выходят публикации, в которых на основе данных дистанционного зондирования оценивается динамика площадей ледников или линейная скорость отступления, оценивается изменение массы (Ciraci et al., 2018; Li et al., 2019; Hock, Huss, 2021; Tepes et al., 2021; Dussaillant, et al., 2024). Как правило, фиксируется и анализируется состояние ледниковых систем на определенный период времени по отношению к некому базовому периоду с разной степенью детализации. Т.к. периоды выбираются разные, довольно трудно сопоставлять полученные результаты. Даже в тех случаях, когда исследованием были охвачены все зоны материкового и островного оледенения России (Котляков и др., 2015; Хромова и др., 2021), информация быстро устаревает, т.к. отступление краевой части ледника продолжается и может достигать более 20 м/год (Алейников, Липка, 2018).

Негативные последствия деграции оледенения включают снижение водообеспеченности аридных регионов, формирование прорывоопасных ледниковых озер, отступление береговой линии арктических островов, распреснение прилегающих акваторий, формирование айсбергов и др. (Carey et al., 2017; IPCC, 2019; Davison et al., 2020; IPCC, 2022; Третий оценочный доклад..., 2022). В целях планирования хозяйственной деятельности и обеспечения безопасности населения необходимо получать регулярно обновляющуюся и подготовленную по единой системе информацию о состоянии ледников, которая в контексте адаптации к изменениям климата может рассматриваться как часть климатического обслуживания.

Современное оледенение арктических островов России играет доминирующую роль в природе этих областей и служит важным естественным природным индикатором изменения климата. Важнейшей особенностью ледников данного региона является то, что заметная доля потерь состоит из айсбергов, а не из жидкой воды (Второй оценочный..., 2014). Прослеживается связь интенсивности айсбергообразования, включая количество айсбергов, ежегодно откалывающихся от выводящих ледников Земли Франца-Иосифа, Северной Земли и Новой Земли, с аномалиями температуры приповерхностного воздуха в Арктике. Максимальная айсберговая активность ледников наблюдалась в рекордно теплом 2020 г., когда размер наибольшего айсберга составил 5 км (Бычкова и др., 2024).

Расположенные на арктических островах ледниковые системы приурочены к зоне наиболее быстрого повышения температуры воздуха на территории нашей страны в последние десятилетия: 0.8-1.2°C/год. Однако после 2020 г. намечилось некоторое понижение температуры на побережье Северного Ледовитого океана. Количество осадков не меняется или слабо убывает на архипелагах Новая Земля, Северная Земля, Новосибирских островах. На акватории арктических морей минимальная ледовитость в сентябре сокращалась с 1996 г. и за десять лет уменьшилась в восемь раз: с 1892 тыс. км² до 234 тыс. км². В последующие годы площадь колебалась вблизи этого уровня с минимальным значением 26.3 тыс. км² в 2020 г. (Доклад об особенностях климата..., 2024). Северо-восточную часть Баренцева и восточную часть Карского морей вдоль побережья Новой Земли охватил процесс «атлантификации»: в последние десятилетия наблюдаются значительные положительные аномалии температуры воды в зимний сезон (1.5-2°C), что связано с общим сокращением ледяного покрова в Северном Ледовитом океане и возрастанием влияния океанского тепла на приповерхностный слой океана и ледяной покров (Третий оценочный..., 2022).

Для оценки изменений ледников, в том числе арктических островов, необходимо использовать как минимум два параметра: линейная мера отступления и площадь. Линейная мера – расстояние, на которое отступил или наступил ледник, не вполне достаточна и во многих случаях (особенно для широкого фронта ледника) не характеризует полностью реальные изменения. То же относится и к отдельно взятой площадной мере, так как, например, узкие языки ледников могут заметно сократиться при малых потерях площади (Оледенение Северной..., 2006).

Целью исследования является оценка изменения ледников в условиях меняющегося на примере крупного района оледенения (архипелаг Новая Земля) на нескольких временных горизонтах и сопоставление скоростей деградации. Для этого решались задачи:

- разработка методики исследования, опирающейся на доступные данные, которая может быть использована для любого района оледенения России;
 - тестирование предлагаемой методики на примере архипелага Новая Земля;
-

- сопоставление результатов дешифрирования данных дистанционного зондирования и картографических материалов;
- оценка скоростей изменения оледенения для рассматриваемых временных интервалов.

Материалы и методика

Система регулярной оценки динамики площадей ледников (скорость деградации) с использованием данных дистанционного зондирования за регулярные периоды наблюдений может быть организована следующим образом.

В качестве наиболее ранней исходной картографической информации, охватывающей все ледниковые системы страны, можно использовать данные Каталога ледников СССР (1966-1982). Он был составлен по решению, принятому секцией гляциологии Межведомственного геофизического комитета при президиуме Академии наук СССР в марте 1962 г. (Котляков и др., 2015). В Каталоге по бассейновому принципу были выделены районы, которые соответствовали томам описания (рис. 1). Для каждой ледниковой системы приводятся данные о площадях, по картам возможно оценить длины ледников на момент сбора информации для тома. Использование единой унифицированной системы отсчета тем самым позволяет обеспечить сравнимость результатов.

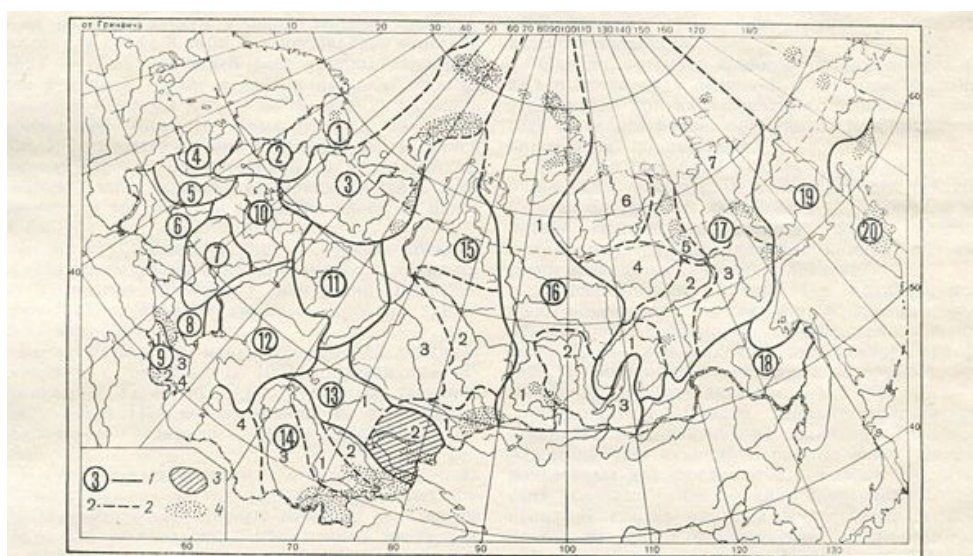


Рисунок 1. Схема деления территории СССР на тома и выпуски Каталога ледников (1966-1982)

1 – номера томов и границы отнесения к ним территорий; 2 – номера выпусков и границы отнесения к ним территорий; 3 – территории, сведения о которых включены в спецвыпуск; 4 – районы современного оледенения

Figure 1. Scheme of dividing the territory of the USSR into volumes and issues of the Catalog of Glaciers (1966-1982)

1 – volume numbers and boundaries of the territories indicated for them; 2 – numbers of issues and boundaries of territories assigned to them; 3 – territories, information about which is included into a special volume; 4 – areas of modern glaciation

В качестве базовой линии для разных временных интервалов можно использовать следующие данные:

1) Каталог ледников СССР (исходные схемы составлены по результатам аэрофотосъемки 1952 г.);

2) открытые данные космической съемки программы Corona, которая была разработана Управлением по науке ЦРУ при поддержке ВВС США. Предназначалась для слежения за наземными объектами потенциального противника, в основном: СССР, КНР, странами Варшавского договора. Действовала с июня 1959 до мая 1972 г. Снимки в панхроматическом спектре, имеют высокое разрешение (3.5-5 метров), но нуждаются в пространственной привязке и ортотрансформации (Dashora et al., 2007);

3) космические снимки Landsat-5 TM; Landsat-7 ETM+; Landsat-8/OLI/TIRS с 1984 г. (с пространственным разрешением – 30 м, панхроматический канал – 15 м);

4) космические снимки Sentinel-2A/B (10 м) доступны с 2015 г.;

5) в литературных источниках публикуются данные наземных наблюдений для отдельных ледников, в том числе массбалансовые;

6) Каталог ледников России Института географии РАН, по данным снимков Sentinel на 2016-2019 гг. (Хромова и др., 2021).

Таким образом, для любого района оледенения на территории России можно оценить изменение площади оледенения для нескольких сопоставимых временных горизонтов, используя данные: Каталога ледников СССР (или CORONA) за период 1950-1970-е годы – в зависимости от наличия исходной информации; данные по состоянию на 80-е гг. по снимкам Landsat-5 TM; данные на начало XXI века (1999-2003 гг.) по более современным снимкам Landsat-7 ETM; данные для 2013-2023 гг. доступны по снимкам Landsat-8/OLI/TIRS, а начиная с 2015 г. – и по снимкам Sentinel-2A/B, имеющим более высокое пространственное разрешение.

Использованные материалы для оценки динамики ледников Новой Земли:

1) картосхема ледников Новой Земли, опубликованная в «Каталоге ледников СССР» (1978). Для определения положения и изменения фронтов всех выводных ледников было использовано 13 листов топографических карт масштаба 1:200 000, составленных по данным аэрофотосъемки 1952 г. Схемы, собранные в мозаику ледников Новой Земли из Каталога ледников СССР, представлены на рис. 2а;

2) мозаика космических снимков, полученных по космической программе «Corona» (USGS)¹⁾ за 1961-1962 гг. (рис. 2б);

3) мозаика космических снимков Landsat-7 ETM+ за август 2001 г. (рис. 3а), (USGS), 2001 г. был выбран нами как последний год работы спутника Landsat-7 ETM+ в полноценном режиме;

4) мозаика космических снимков Landsat-8 OLI/TIRS и Landsat-7 ETM+ за август-сентябрь 2013 г., т.к. 2013 г. – дата запуска нового спутника Landsat-8 OLI/TIRS рис. 3б, (USGS);

¹⁾US Geological Survey, available at: URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 02.10.2024).

5) мозаика космических снимков Landsat-8 OLI/TIRS за август 2023 г. (рис. 4а) и Sentinel-2A/B(Copernicus²⁾) на конец периода абляции – начало сентября 2023 г. (рис. 4б).

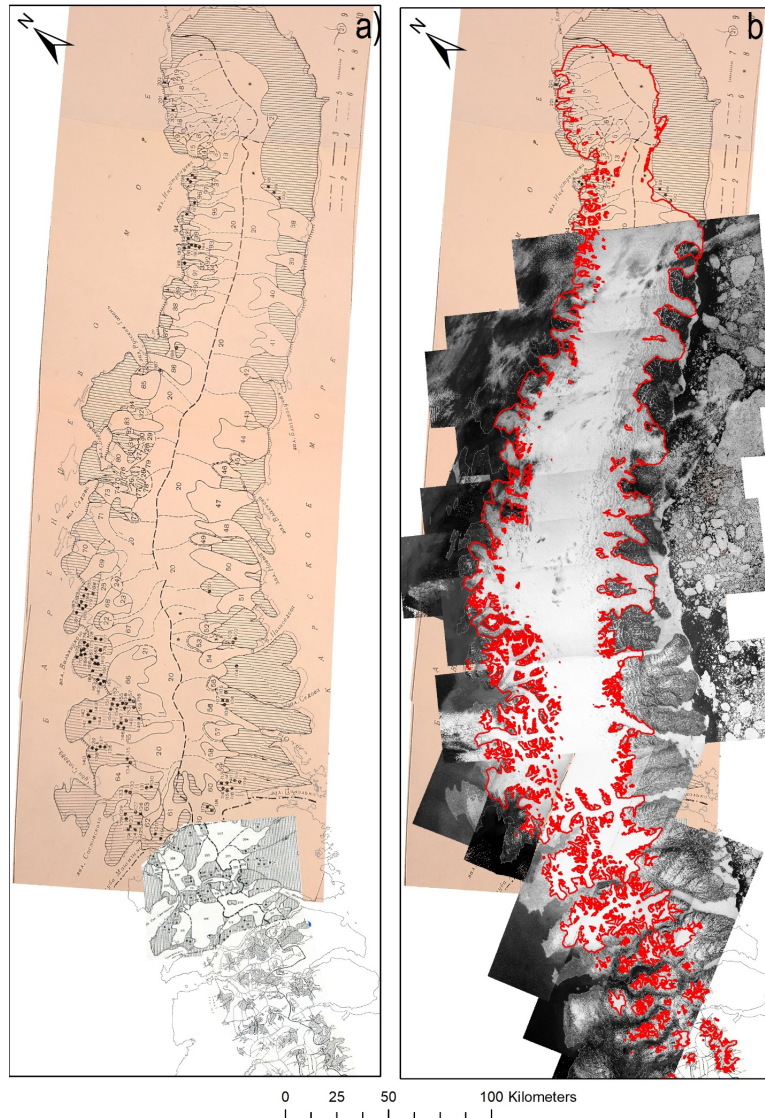


Рисунок 2. Схема расположения ледников: а) – картосхема из «Каталога ледников СССР», отражающая состояние ледников на 1952 г.; б) – наложение мозаики космических снимков по программе Corona за 1961 г. на картосхему 1952 г.

Красным цветом отрисован совместный контур ледников 1952-1961 г. Большая часть ледников отрисована по снимку 1961 г., крайние северные и южные участки по схеме 1952 г.

Figure 2. The scheme of glaciers: a) – map from the “Catalog of Glaciers of the USSR”, as the state of glaciers in 1952; b) – overlaying a mosaic of space images of Corona program 1961 on the map from 1952. The joint contour of glaciers from 1952-1961 is marked by red. Most of the glaciers are drawn according to image 1961 (b), and the extreme northern and southern sections are drawn using map 1952

²⁾The Earth observation component of the European Union’s Space programme. available at: URL: <https://dataspace.copernicus.eu> (дата обращения 02 октября 2024).

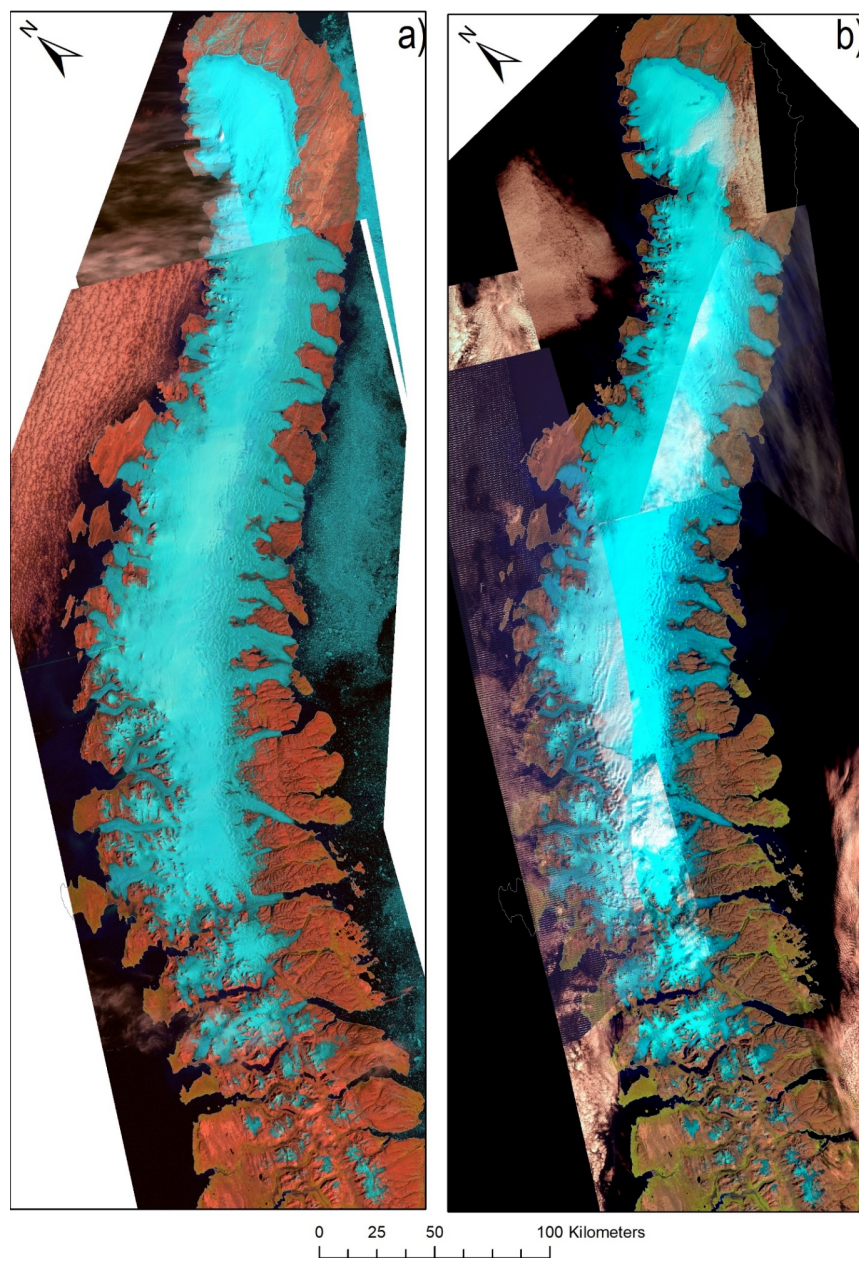


Рисунок 3. Мозаика космических снимков: а) Landsat-7 ETM+ за август 2001 г;
б) Landsat-8 OLI/TIRS, Landsat-7 ETM+ за август-сентябрь 2013 г.

Figure 3. Mosaic of satellite images: a) Landsat-7 ETM+ for August 2001; b) Landsat-8 OLI/TIRS, Landsat-7 ETM+ for August-September 2013

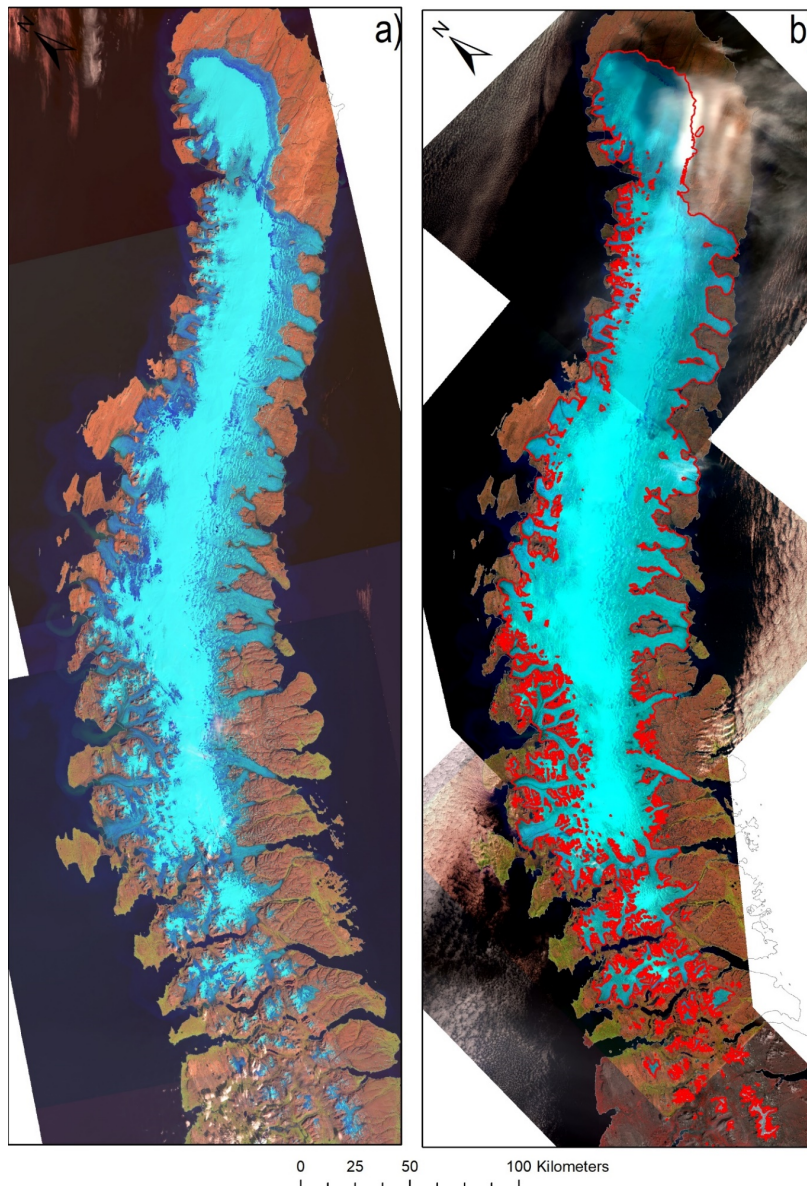


Рисунок 4. Мозаика космических снимков: а) Landsat-8 OLI/TIRS за август 2023 г.;
б) Sentinel-2 за сентябрь 2023 г.
Красным цветом отрисован итоговой контур ледников в 2023 г.

Figure 4. Mosaic of satellite images: a) Landsat-8 OLI/TIRS for August 2023;
b) Sentinel-2 for September 2023
The red line marks the final contour of the glaciers in 2023

Методы дешифрирования и картографирования

Картирование открытого льда и снежного покрова по космическим снимкам мы осуществляли методом спектральной классификации с последующей ручной коррекцией. Данный метод основан на спектральных призна-

ках, в качестве которых служит набор спектральных яркостей, зарегистрированных многозональным снимком. При дешифрировании ледников по серии многозональных снимков, используется эффект оптимального отображения различных объектов в определенных зонах спектра для разделения снежного покрова, льда и скальных поверхностей. Мы использовали комбинацию спектральных каналов в ближнем инфракрасном спектре – NIR : RED : GREEN (4:3:2 – для Landsat-7 ETM+, 5:4:3 – для Landsat-8/9 OLI/TIRS и 8:4:3 для Sentinel 2A/B); и в среднем инфракрасном спектре – SWIR : NIR : GREEN (7:4:2 – для Landsat-7 ETM+, 7:5:3 – для Landsat-8/9 OLI/TIRS и 11:8:3 для Sentinel 2A/B).

Задача компьютерного дешифрирования снимков сводится к кластеризации – разбиению всех пикселей цифрового снимка на несколько групп. При использовании кластеризации мы заранее задаем количество классов, которые хотим получить.

ISODATA – один из наиболее популярных алгоритмов, используемых для классификации по спектральной яркости «без учителя». Он базируется на кластеризации изображения, основанной на разнице между средними значениями кластеров (минимальном спектральном расстоянии между центрами классов). Перед началом классификации неизвестно: сколько и каких объектов есть на снимке. После проведения классификации необходимо дешифрирование полученных классов, чтобы определить, каким именно объектам они соответствуют (рис. 5).

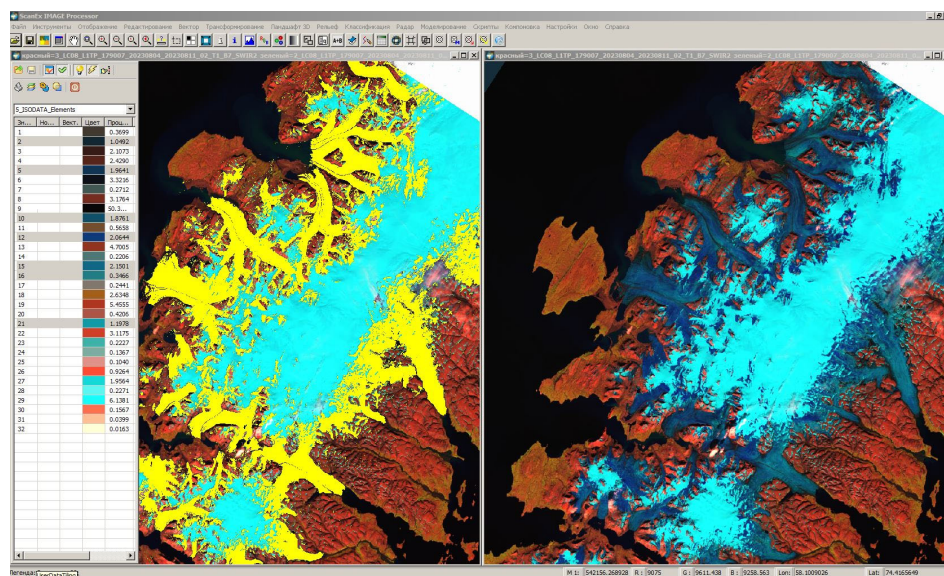


Рисунок 5. Применение метода спектральной классификации. Разбивка изображения на 32 класса по спектральной яркости. Выделение класса ледовой поверхности (жёлтый цвет на левом снимке). Правый снимок – спектральное изображение в инфракрасных тонах. (Каналы SWIR-NIR-GREEN)

Figure 5. Application of the spectral classification method. Dividing the image into 32 classes according to spectral brightness. Identification of the class of the ice surface (yellow color in the left photo). The right image is a spectral image in infrared tones. (SWIR-NIR-GREEN channels)

Затем оператор объединяет классы, которые соответствуют ледовому и снежному покрову, и изображение переводится в векторный формат по классам льда и снега (рис. 6).

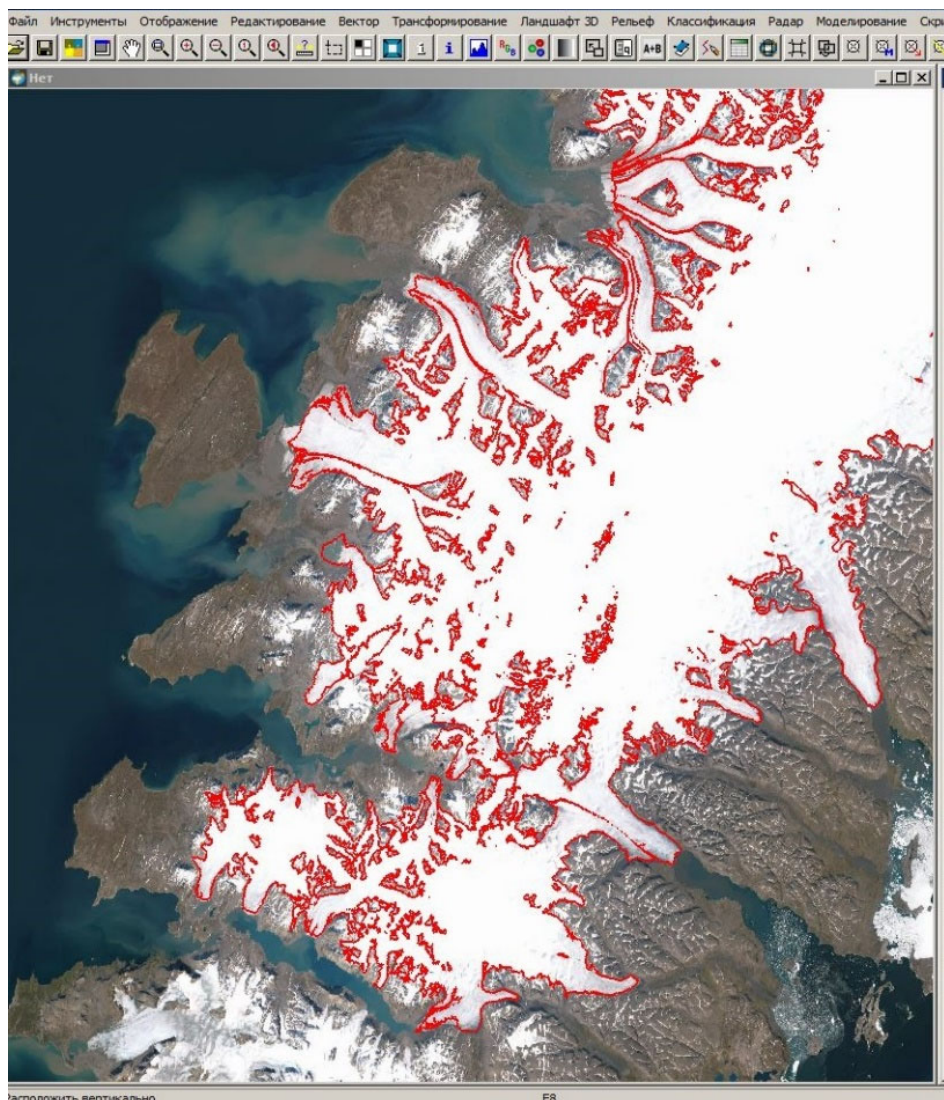


Рисунок 6. Автоматическая векторизация изображения по классу льда и снега (красный контур)

Figure 6. Automatic vectorization of an image by ice and snow class (red line)

Дальнейшее дешифрирование и коррекция осуществлялась в векторном формате. Ручная корректировка результатов классификации заключалась в проверке результатов автоматической классификации, отбраковки поверхностей, покрытых снегом, но не относящихся к ледникам, а также дешифрировании контуров, покрытых поверхностной мореной.

Таким образом мы получили векторные слои ледников Новой Земли 2023 г. (по данным Sentinel-2A/B и Landsat-8 OLI/TIRS), 2013 г. (по данным

Landsat-8 OLI/TIRS и Landsat-7 ETM+) и 2001 года (по данным Landsat-7 ETM+).

Космические снимки программы Corona 1961/1962 гг. и схемы ледников из Каталога ледников СССР геопривязывали и ортотрансформировали с использованием цифровой модели рельефа (для снимков программы Corona) по космическим снимкам Sentinel-2A/B 2023 г. Точность привязки для снимков Corona соответствовала точности привязки Sentinel – ± 20 м.

Схемы ледников из каталога СССР (рис. 2а) были представлены в Каталоге ледников СССР в масштабе 1:1 000 000. Точность привязки контуров к снимкам Sentinel оценивается порядка ± 250 -300 м из-за отсутствия картографической проекции и мелкого масштаба опубликованного оригинала схемы. Толщина линии контуров ледников на схеме в Каталоге соответствует 150-200 м на местности. Поэтому для сравнения и уточнения площадей ледников использовалась наложенная мозаика космических снимков Corona за 1961 г. на картосхему 1952 г. (рис. 2б). Векторный слой 1952/1961 гг. был получен при помощи ручной оцифровки.

Таким образом, были получены векторные слои ледников Новой Земли за четыре срока: 1952/1961; 2001; 2013 и 2023 гг. Для рабочего проекта использовалась географическая система координат WGS-1984, UTM, Zone 41N.

Изображения одной и той же территории снимаются в разных условиях. На качество изображения влияют погодные колебания, разница в освещенности, облачность, тени, отбрасываемые на исследуемый объект. На земле могут оставаться сезонные участки снега (снежники), которые спектрально похожи на заснеженные ледники. Для оценки неопределенности площади вручную скорректированных контуров ледников применяется буфер, который равняется 1 пикселю разрешения космического снимка (Paul et al., 2013). Для слоя 1952/1961 гг. нами был использован буфер ± 50 м, для слоев 2001 и 2013 гг. – ± 30 м, для слоя 2023 г. – ± 10 м.

Результаты и обсуждение

Оледенение Новой Земли по площади занимает первое место в Российской Арктике (Котляков и др., 2015; Ледники России, 2020). Горная система Новой Земли, состоящая из нескольких параллельных хребтов, сдвинута к баренцевоморскому побережью (Каталог ледников СССР, 1978). Абсолютные высоты: 400-1500 м. Общий объем льда на современном этапе оценивается в 69 км^3 . Предположительно, с конца Малого ледникового периода до 20-х гг. XXI в. было утрачено около 17% объема ледников Новой Земли (Reinthalер, Paul, 2024).

Основу новоземельского оледенения составляет обширный ледниковый покров Северного острова, состоящего из ледникового щита и его северного продолжения – Северного ледникового купола (Ледники России, 2020). В центральных областях лёд перекрывает подлёдный рельеф, а в краевых частях появляются многочисленные нунатаки и выводные ледники. Южнее широты

74.5° расположены области горно-покровного оледенения – это сравнительно небольшие ледяные плато с плоской и слабовыпуклой поверхностью. На юге острова Северный и на севере острова Южный разбросаны многочисленные горные ледники и ледники малых форм (рис. 7).

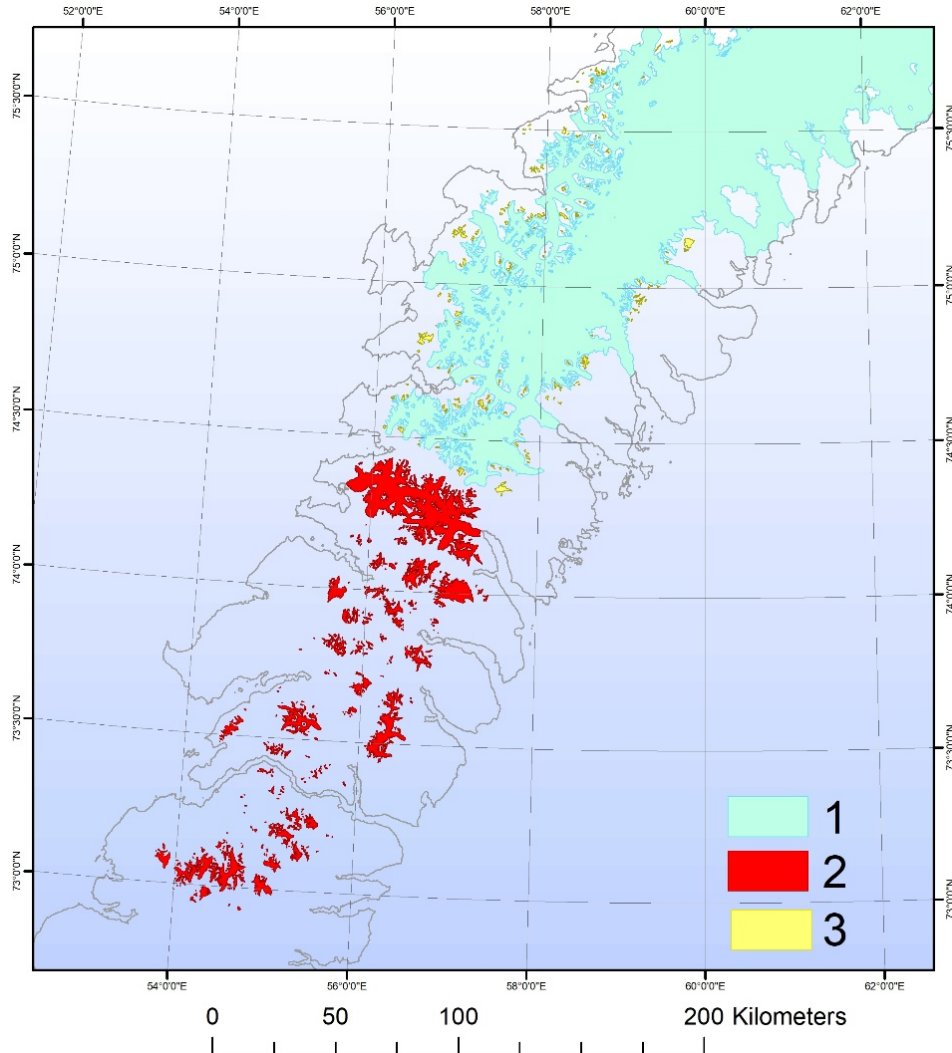


Рисунок 7. Ледники Новой Земли

1 – Покровное оледенение с поперечными выводными ледниками; 2 – горно-покровное, горное оледенение и ледники малых форм южнее широты 74.5°; 3 – горное оледенение и ледники малых форм севернее широты 74.5°с.ш.

Figure 7. Glaciers of Novaya Zemlya

1 – Cover glaciation with transverse outlet glaciers; 2 – mountain cover, mountain glaciation and small glaciers south of 74.5°N; 3 – mountain glaciation and small glaciers north of 74.5°N

Оледенение Новой Земли, согласно Каталогу ледников СССР (1978), в 1952 г. составляло около 23 645.4 км². По картографическим материалам В.С. Корякин (1997) оценил общую убыль оледенения Новой Земли для четырёх периодов: 1913-1933 гг. – 38 км² (0.4%), 1933-1959 гг. – 186 км² (2.2%),

1959-1973 гг. – 133 км² (1.4%), 1973-1988 гг. – 67 км² (0.7%) (Корякин, 1997). По нашим данным, сокращение площади ледников, начиная с 1952 г., шло более высокими темпами.

По данным (Zeeberg, Forman, 2001), отступление выводных ледников на севере Новой Земли в первой половине XX века было относительно быстрым (более 300 м/год), но во второй половине XX века они убывали втрое медленнее, и между 1964 и 1993 гг. половина из исследованных этими авторами ледников были стационарными (Zeeberg, Forman, 2001; Оледенение Северной..., 2006). По нашим данным, скорость отступления ледников с 1952 по 2001 гг. действительно была неравномерна, существенно выше для ледников бассейна Баренцева моря.

На рис. 8 и 9 показаны примеры отступления краев выводных ледников Новой Земли. Многие выводные ледники за 70 лет отступили более чем на 5-7 км по стрещню ледникового потока. При помощи снимков спутников программы Corona 1961 г. мы смогли уточнить границы льда недостаточно подробно отрисованных на схеме 1952 г., в том числе и более мелких ледников. В итоге мы получили базовый контур ледников 1952-1961 гг. (рис. 2б), который использовался в расчётах изменения ледников за 70-летний период.

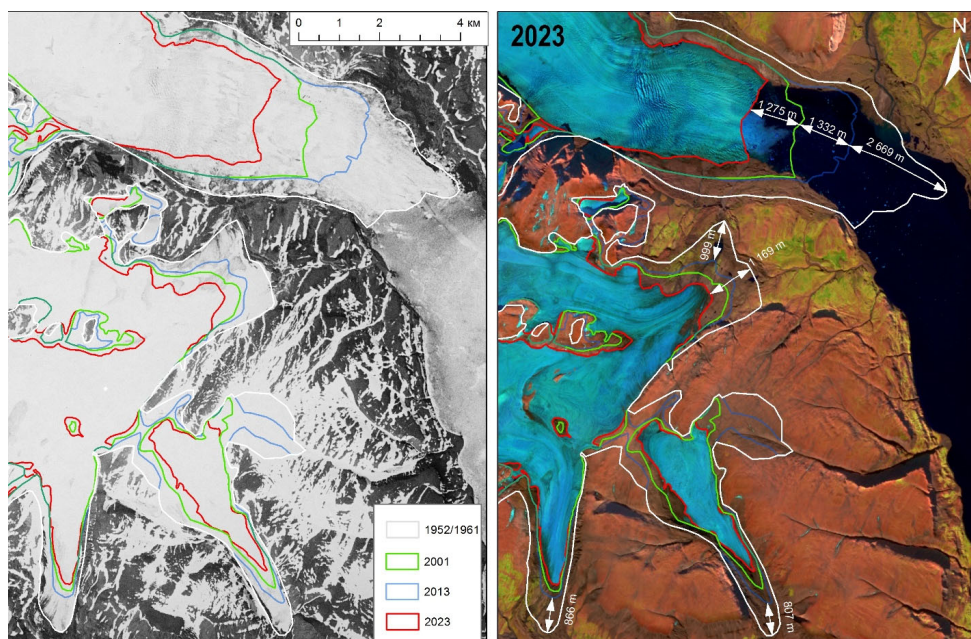


Рисунок 8. Пример отступления краев долинных выводных ледников Витте (№ 208), Ярошевского (№ 210) и Рейгардта (№ 211), согласно нумерации Каталога ледников СССР, на склонах юго-восточного побережья о. Северный, Карское море, залив Медвежий. Левый снимок – по программе Corona, 1961 г., правый – Sentinel-2A, 2023 г.

Figure 8. An example of the retreat of the edges of the valley outlet glaciers Witte (208), Yaroshevsky (210) and Reigardt (211), according to the numbering of the Catalog of Glaciers of the USSR, on the slopes of the southeastern coast of the island. Northern, Kara Sea, Bear Bay. The left image is from the Corona program, 1961, the right is Sentinel-2A, 2023

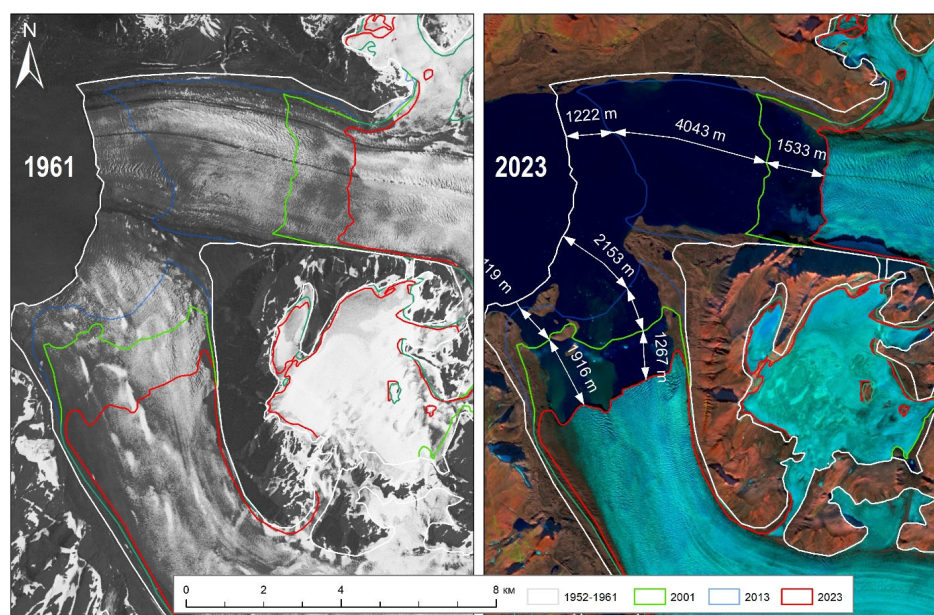


Рисунок 9. Пример отступления краев выводных ледников Вильницкого южный и Вильницкого северный (№ 67, № 68 согласно нумерации Каталога ледников СССР) на склонах западного побережья о. Северный, Баренцево море
Левый снимок – по программе Corona, 1961 г., правый – Sentinel-2A, 2023 г.

Figure 9. An example of the retreat of the edges of the Vilnitsky southern and Vilnitsky northern outlet glaciers (No. 67, No. 68 according to the numbering of the USSR Glacier Catalog) on the slopes of the western coast of Northern Island, Barents Sea
The left image is from the Corona program, 1961, the right is Sentinel-2A, 2023

2023 г. оказался очень благоприятен для съёмки. В этот год было много безоблачных дней в конце периода абляции и лето было аномально жарким. Всё это облегчило дешифрирование снега и льда. Благодаря новому спутнику Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м, что в 3 раза больше, чем у снимков Landsat, мы получили контуры ледников 2023 г. с максимальной проработкой.

Мы сравнивали 2 основных контура ледников Новой Земли: 1952-1961 гг. и 2023 г. И дополнительно, промежуточные контура – 2001 и 2013 гг. Для отдельных ледников мы анализировали космическую съёмку 1977 г. (снимки по программе Corona) и 1986 г. (Landsat-5 TM).

По результатам дешифрирования космических снимков Новой Земли мы смогли оценить отступление ледников Новой Земли, а также получили значения суммарной площади оледенения за 3 срока: 2001 г., 2013 г. и 2023 г. в сравнении с временным горизонтом 1952/1961 гг., который был принят нами за 100% (табл. 1).

По материалам базы данных «Ледники России» Института географии РАН (2020), площадь оледенения Новой Земли в результате дешифрирования космических снимков Sentinel и Landsat 2019 г. составляла 22 241.4 км², что довольно близко к полученным нами результатам с учетом погрешностей.

Недавние оценки изменения площади 480 ледников Новой Земли, по космическим снимкам Landsat, для трех временных горизонтов (Ali et al., 2023) несколько ниже наших, не отражают эффект распада ледников. Возможны методические отличия при дешифрировании поверхностных морен на языках ледников (табл. 1).

Таблица 1. Суммарная площадь оледенения Новой Земли, количество ледников

Table 1. Total area of Novaya Zemlya glaciation, number of glaciers

Годы	Количество ледников	Данные	Площадь, км кв.	%
1952	242*	Каталог ледников СССР	23 645**	98.1
1952/1961	330***	авторские	24 107*** ± 548****	100.0
1986/1989	480	Ali et al., 2023	22 990 ± 301	
2000/2001	480	Ali et al., 2023	22 525 ± 308	
2001	479	авторские	22 914 ± 350	95.1
2013	531	авторские	22 279 ± 335	92.4
2019	729	Институт географии РАН, 2020	22 241	92.3
2019/2021	480	Ali et al., 2023	21 670 ± 292	
2023	705	авторские	21 702 ± 108	90.0

- * – согласно векторному слою, полученному по схеме Каталога ледников СССР;
- ** – согласно таблице Каталога ледников СССР;
- *** – согласно наложенной мозаике космических снимков Corona и картосхемы 1952 г.;
- **** – оценка точности для авторских оценок приводится по доверительным границам (ширина буфера соответствует разрешению раstra).

Как видно из табл. 1, суммарная площадь оледенения Новой Земли, полученная по космическим снимкам 1961 г. и отрисованная по схеме из Каталога ледников СССР (24 106.6 км²), отличается от цифры, приведённой в таблице Каталога ледников СССР (23 645.4 км²) на 461.2 км². Мы предполагаем, что в 1952 г. часть ледников не была отдешифрирована.

Суммарно оледенение Новой Земли сократилось с 1952/1961 гг. почти на 10%. При этом количество ледников увеличилось в 2.1 раза за счёт распада более крупных ледников на части в процессе отступания. Ряд мелких ледников в Каталоге обозначен точками с номерами, т.к. они не выражались в масштабе схемы. В таблице площадей ледников сведения о них указаны. Предположительно, некоторые небольшие ледники могли быть пропущены в ходе аэрофотосъёмки, а некоторые отдешифрированы слишком схематично из-за снежного покрова или недоучтены участки, покрытые поверхностной мореной.

Обобщение полученных результатов показывает, что практически все фронты выводных ледников Новой Земли отступили по стрелю на километры, за исключением нескольких стабильных. На рис. 10 показан один из

таких ледников – ледник Ога (№ 56 Каталога ледников СССР). Действительно, в среднем за период 1973/1976-2015 гг. выводные ледники (в том числе обрывающиеся во внутренние водоемы) отступали в 3-3.5 раза быстрее, чем те, которые заканчивались на суше (Carr et al., 2017). При этом интенсивность отступления выводных ледников Новой Земли в большинстве случаев ниже, чем для Земли Франца-Иосифа, Северной Земли или Шпицбергена (Kochtitzky et al., 2022).

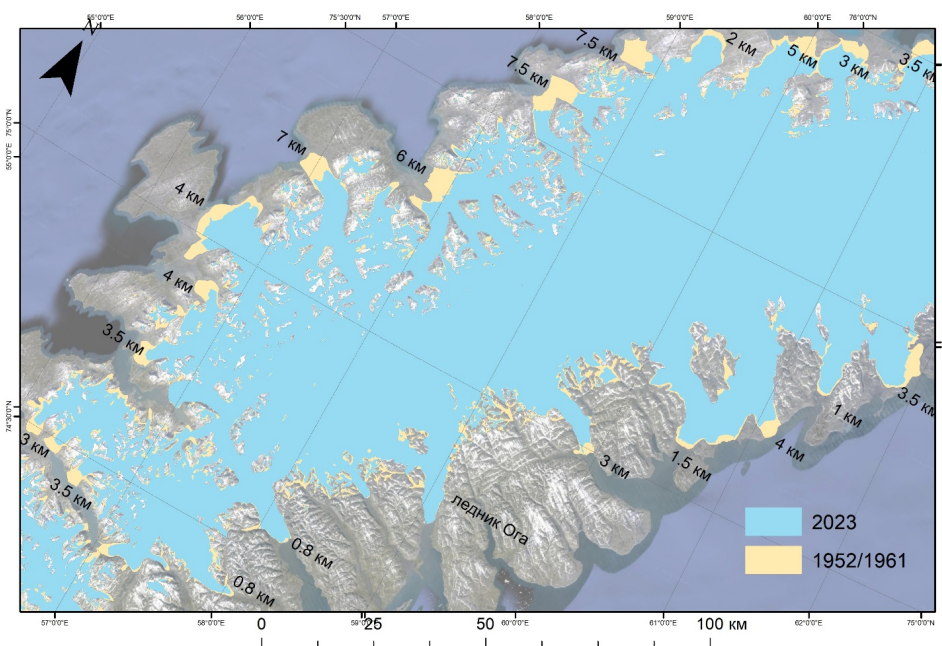


Рисунок 10. Значения отступления некоторых выводных ледников

Figure 10. Retreat values of some outlet glaciers

В табл. 2 и 3 представлены площади ледникового щита и оледенения южной части ледникового района (рис. 7), где сосредоточено наибольшее количество небольших горных ледников со средней площадью 2.6 км². Ледниковый щит сократился на 8.1% с 1961 г. (табл. 2). Южнее широты 74.5° картина деградации выглядит иначе. Суммарное сокращение площади на данном участке значительно выше и составляет 33.26% (табл. 3).

Таблица 2. Площадь ледникового щита с выводными ледниками (рис. 8)

Table 2. Area of the ice sheet with outlet glaciers (Fig. 8)

Годы	Площадь, км кв.	%
1952/1961	21 867.7	100.0
2001	20 981.0	96.0
2013	20 496.1	93.7
2023	20 098.4	91.9

Таблица 3. Суммарная площадь горно-покровного, горного оледенения и ледников малых форм южнее широты 74.5° (рис. 8)

Table 3. Total area of reticular glaciation, mountain glaciers and small glaciers south of 74.5°N (Fig. 8)

Годы	Количество ледников	Площадь, км кв.	%
1952/1961	284	2202.1	100.0
2001	380	1833.3	83.3
2013	394	1650.5	75.0
2023	492	1469.6	67.0

Скорость отступления ледников не была постоянной. С 1961 по 2001 гг. оледенение Новой Земли сокращалось со средней скоростью 29.8 км²/год, с 2001 по 2013 гг. – со скоростью 52.9 км²/год. И за последний период с 2013 по 2023 гг. скорость сокращения ледников Новой Земли достигла 57.7 км²/год. Предположительно, 32 ледника (18% площади оледенения) могли быть пульсирующими (Grant et al., 2009).

Оценки изменения массы также фиксируют неравномерность процесса деградации. Так, потеря массы ледников Новой Земли увеличилась с 10 ± 5 Гт/год в 2003-2009 гг. до 14 ± 4 Гт/год в 2010-2016 гг., с коротким периодом почти нулевого баланса массы между 2009 и 2011 гг. Увеличение потери массы связывают с повышением температуры атмосферного воздуха (Ciraci et al., 2018). По другим оценкам, изменение массы ледников в 2010-2020 гг. осталось в пределах 10.7 ± 0.9 Гт/год (Jakob, Gourmelen, 2023).

К факторам, которые напрямую влияют на деградацию ледников и могут зависеть от изменения климата относятся: увеличение продолжительности безлёдного периода (водная поверхность свободна ото льда), а также повышение температуры приземного слоя атмосферного воздуха и слоя перемешивания морской воды. Для Баренцева моря с 1979 г. отмечается сокращение площади, покрытой льдом, в зимний период, а для Карского моря – увеличение площади, свободной ото льда, в летний период (IPCC, 2019). Прослеживается статистически значимая отрицательная связь между региональной протяженностью морского льда в конце лета (Баренцево и Карское моря) и количеством дней наблюдаемого таяния ледников Новой Земли (Zhao et al., 2014).

По данным дистанционного зондирования, сокращение площади ледников бассейна более теплого Баренцева моря шло активнее, чем Карского (рис. 11), что согласуется с данными Программы арктического мониторинга и оценки (AMAP, 2011) и других исследователей (Terres et al., 2021). Действительно, благодаря теплым течениям, годовые суммы потоков тепла с поверхности Баренцева моря в среднем в 3-4 и в 5-6 раз, для потоков H (явное тепло) и LE (скрытое тепло) соответственно, превышают значения для Карского моря, а в отдельные годы могут различаться в десятки раз (Суркова, Романенко, 2021).

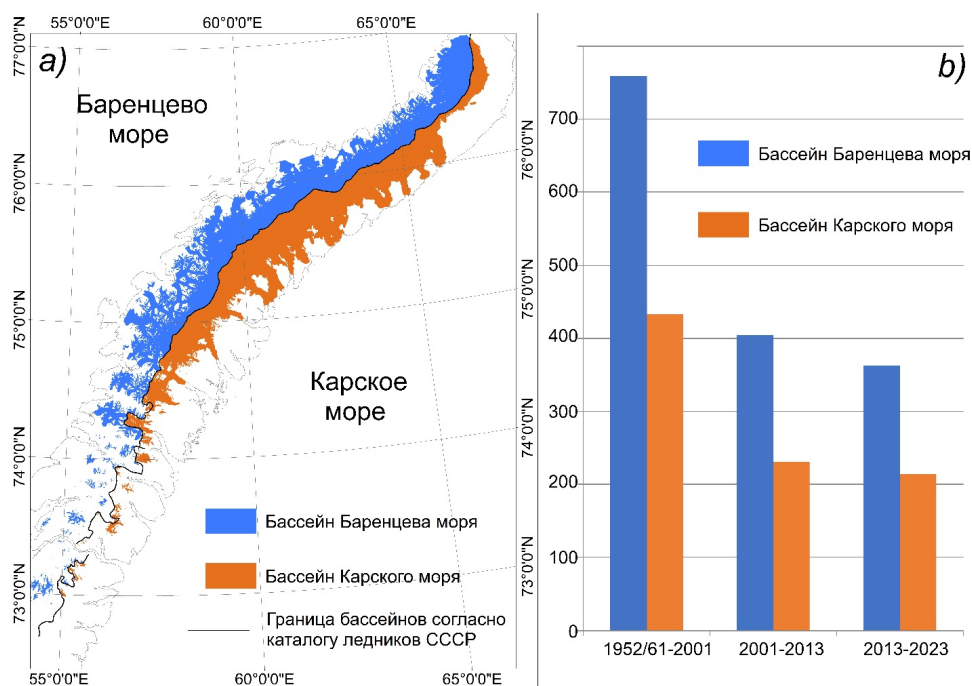


Рисунок 11. Бассейны Баренцева и Карского моря согласно Каталогу ледников СССР
 (а) сокращение площади ледников Новой Земли (км²) по бассейнам (б)

Figure 11. Basins of the Barents and Kara Seas according to the USSR Glacier Catalog
 (a) reduction in the area of Novaya Zemlya glaciers (km²) by the sea basins (b)

В публикациях отмечается вклад фёнов в деградацию ледников Гренландии и Антарктиды. Высказывается предположение, что эффект может проявляться и для Новой Земли (Naacker et al., 2024). Действительно, разница температур между теплым Баренцевым морем, большая часть акватории которого даже зимой остается свободной ото льда, и холодным Карским морем способствуют возникновению сильных локальных ветров. Однако высота горной цепи в пределах 1200-1500 м недостаточна для разогрева стекающих воздушных масс (в отличие от Гренландии), т.е. формируется холодная Новоземельская бора, которая характерна не только в летнее, но и в зимнее время (Ефимов, Комаровская, 2018).

Айсберги

Для выводных ледников Новой Земли на скорость изменения фронтальных частей немалое влияние оказывает айсберговый сток. Предполагается, что именно он может являться основной составляющей потери массы в нижней части выводных ледников (Carr et al., 2014), тогда как выше 500 м решающую роль играет именно таяние (Melkonian et al., 2016).

Изменения расхода льда на айсберги определяются глубиной морских вод у фронтов ледников, рельефом морского дна и берегов в местах выхода ледников, распределением температур, локальными течениями, приливным

режимом и др. (Второй оценочный..., 2014). Оценить вклад айсбергов в уменьшение площади ледников принципиально возможно при помощи интерпретации космических радарных изображений. Нам удалось обнаружить на снимках результаты откалывания и разрушения айсбергов в 2023 г. для ледников Витте и Полисадова (рис. 12, 13).

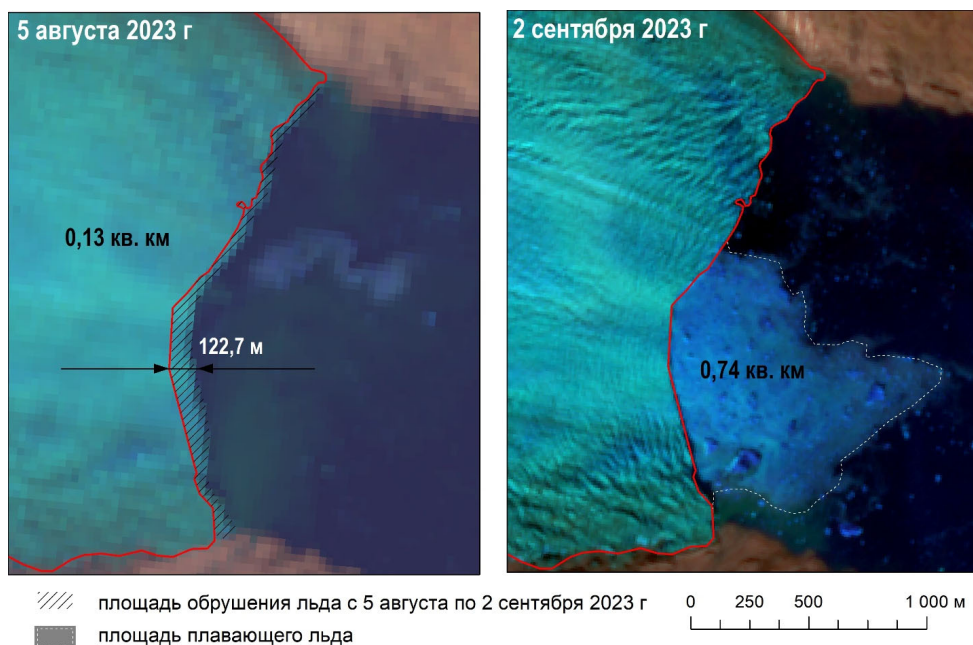


Рисунок 12. Язык ледника Витте (№ 208), о. Северный, Карское море, залив Медвежий
Левый снимок – Landsat-8 OLI/TIRS от 5 августа; правый снимок –
Sentinel-2A от 2 сентября 2023 г.

Стрелкой показано отступление ледника за месяц и площадь растаявшего льда

Figure 12. Tongue of the Witte glacier (208) in Northern Island, Kara Sea, Bear Bay
Left image – Landsat-8 OLI/TIRS from August 5; right image –
Sentinel-2A from September 2, 2023.

The arrow shows the retreat of the glacier over the month and the area of melted ice

Язык ледника Витте отступил на 122 м, в обрушения льда сформировалось поле плавающих льдов площадью 0.7 км², тогда как площадь уменьшения ледника составляет 0.13 км² за месяц. Язык ледника Полисадова отступил на 588 м за 1.5 месяца, в обрушения льда сформировалось поле плавающих льдов площадью 7.2 км², а площадь уменьшения ледника составляет 0.92 км² за этот период.

Точная оценка вклада айсберговой составляющей в разрушение фронта ледников является трудоемкой задачей и требует ежедневного мониторинга по данным дистанционного зондирования.

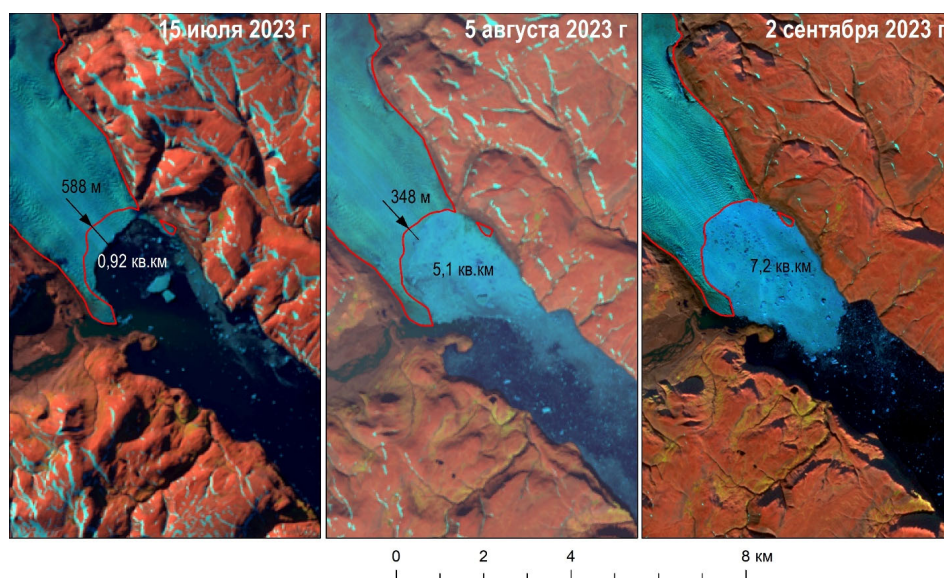


Рисунок 13. Язык ледника Полисадова (№ 54), о. Северный, Карское море, бухта Полисадова. Левый снимок – Landsat-8 OLI/TIRS от 15 июля; центральный снимок – Landsat-8 OLI/TIRS от 5 августа; правый снимок – Sentinel-2A от 2 сентября 2023 г. Стрелкой показано отступление ледника за полтора месяца. Цифрами на левом рисунке – площадь растаявшего льда, а на среднем и правом – площадь плавающих льдов от обвала ледника (в км²)

Figure 13. Tongue of the Polisadov glacier (54) in Northern Island, Kara Sea, Polisadov Bay. Left image – Landsat-8 OLI/TIRS from July 15; central image – Landsat-8 OLI/TIRS from August 5; right image – Sentinel-2A from September 2, 2023. The arrow shows the retreat of the glacier over a month and a half. The numbers in the left figure are the area of melted ice, and in the middle and right are the area of floating ice from the glacier collapse (km²)

Выводы

Суммарная площадь оледенения Новой Земли, по данным дистанционного зондирования, на конец периода абляции 2023 г. составила 21 702.3 км². Оледенение Новой Земли сократилось на 9.9% с 1952/1961 гг.

Оледенение Новой Земли южнее 74.5° с.ш. сократилось с 1952/1961 гг. по 2023 г. еще более существенно: на 33.3%.

Средняя скорость сокращения площади ледников Новой Земли выросла с 29.8 км²/год в период 1961-2001 гг. до 57.7 км²/год в период 2013-2023 гг. Единичные ледники остаются стабильными.

Сокращение ледников Баренцева моря происходит интенсивнее сокращения ледников бассейна Карского моря в среднем в 1.7 раза.

На примере ледников Витте и Полисадова в 2023 г. оценен масштаб айсберговой активности. Линейное отступление ледника может достигать 588 м за 1.5 месяца, в результате обрушения льда сформировалось поле плавающих льдов, площадью 7.2 км², а площадь уменьшения ледника составляет 0.92 км² за этот период.

Согласно результатам расчетов четырех моделей CMIP5, Баренцево море может стать полностью свободным ото льда зимой после 2050 г. в условиях сценария RCP8.5 (IPCC, 2019; Onarheim, Årthun, 2017). Прогнозируется, что к 2100 г. ледники Российской Арктики утратят около половины своей массы в зависимости от сценариев изменения климата (Rounce et al., 2023). Необходим регулярный мониторинг оледенения арктических островов по единой методике для контроля происходящих изменений и своевременного принятия решений, с учетом масштабных планов развития Арктической зоны Российской Федерации.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы госзадания № АААА-А20-120070990079-6 ФГБУ «ИГКЭ».

Список литературы

Алейников, А.А., Липка, О.Н. (2018) Деграляция покровного оледенения острова Ушакова по материалам космических съемок, *Земля из космоса*, № 9 (25), с. 32-39.

Бычкова, И.А., Смирнов, В.Г., Михальцева, С.В., Платонова, Е.В. (2024) Айсберговая опасность в морях Арктической зоны Российской Федерации в условиях современных климатических изменений, *Проблемы Арктики и Антарктики*, т. 70, № 1, с. 71-86.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2014) Под ред. В.М. Катцова, С.М. Семенова, М., Росгидромет, 1009 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год (2024) М., Росгидромет, 104 с.

Ефимов, В.В., Комаровская, О.И. (2018) Сезонная изменчивость и гидродинамические режимы новоземельской боры, *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, т. 54, № 6, с. 684-698.

Каталог ледников СССР, т. 3, Северный край, Часть 2, Новая Земля (1978) Л., Гидрометеиздат, 112 с.

Каталог ледников СССР (1966-1982) в 20 томах, Л., Гидрометеиздат.

Корякин, В.С. (1997) Ледники Новой Земли, *Земля и Вселенная*, № 1, с. 17-24.

Котляков, В.М., Хромова, Т.Е., Носенко, Г.А., Попова, В.В., Чернова, Л.П., Муравьев, А.Я., Рототаева, О.В., Никитин, С.А., Зверкова, Н.М. (2015), *Современные изменения ледников горных районов России*, М., Тов-во научных изданий КМК, 288 с.

Ледники России (2020) ГИС online для визуализации и анализа данных о состоянии ледников России, полученных на основе космической информации по состоянию на вторую декаду XXI в., М., Институт географии РАН, электронный ресурс, URL: <https://sites.google.com/view/glaciersrussia/> (дата обращения 02 октября 2024).

Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху (2006) Отв. ред. В.М. Котляков, М., Ин-т географии РАН, 482 с.

Суркова, Г.В., Романенко, В.А. (2021) Изменение климата и теплообмен между атмосферой и океаном в Арктике на примере Баренцева и Карского морей, *Проблемы Арктики и Антарктики*, т. 67, № 3, с. 280-292.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2022) Под ред. В.М. Катцова, СПб., Наукоемкие технологии, 676 с.

Хромова, Т.Е., Носенко, Г.А., Глазовский, А.Ф., Муравьев, А.Я., Никитин, С.А., Лаврентьев, И.И. (2021) Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016-2019 гг.), *Лед и снег*, т. 61, № 3, с. 341-358.

Ali, A., Dunlop, P., Coleman, S., Kerr, D., McNabb, R.W., Noormets, R. (2023) Glacier area changes in Novaya Zemlya from 1986-89 to 2019-21 using object-based image analysis in Google Earth Engine, *Journal of Glaciology*, vol. 69, no. 277, pp. 1305-1316.

AMAP (2011) *Snow, Water and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Climate Change and the Cryosphere*, Oslo, Arctic Monitoring and Assessment (AMAP), Xii +, 538 p.

Carey, M., Molden, O.C., Rasmussen, M.B., Jackson, M., Nolin, A.W., Mark, B.G. (2017) Impacts of glacier recession and declining meltwater on mountain societies, *Annals of the American Association of Geographers*, vol. 107, no. 2, pp. 350-359.

Carr, J.R., Bell, H., Killick, R., Holt, T. (2017) Exceptional retreat of Novaya Zemlya's marine-terminating outlet glaciers between 2000 and 2013, *The Cryosphere*, vol. 11, no. 5, pp. 2149-2174.

Carr, J.R., Stokes, C., Vieli, A. (2014) Recent retreat of major outlet glaciers on Novaya Zemlya, Russian Arctic, influenced by fjord geometry and sea-ice conditions, *Journal of Glaciology*, vol. 60, no. 219, pp. 155-170.

Ciraci, E., Velicogna, I., Sutterley, T.C. (2018) Mass balance of Novaya Zemlya archipelago, Russian High Arctic, using time-variable gravity from grace and altimetry data from ICES at and Cryosat-2, *Remote Sensing*, vol. 10, no. 11, p. 1817.

Dashora, A., Lohani, B., Malik, J.N. (2007) A repository of earth resource information – the Corona satellite programme, *Current Science*, vol. 92, no. 7, pp. 926-932.

Davison, B.J., Cowton, T.R., Cottier, F.R., Sole, A.J. (2020). Iceberg melting substantially modifies oceanic heat flux towards a major Greenlandic tidewater glacier, *Nature communications*, vol. 11, no. 1, p. 5983.

Dussaillant, I., Hugonnet, R., Huss, M., Berthier, E., Bannwart, J., Paul, F., Zemp, M. (2024) Annual mass changes for each glacier in the world from 1976 to 2023, *Earth System Science Data Discussions*, vol. 2024, pp. 1-41.

Grant, K.L., Stokes, C.R., Evans, I.S. (2009) Identification and characteristics of surge-type glaciers on Novaya Zemlya, Russian Arctic, *Journal of Glaciology*, vol. 55, no. 194, pp. 960-972.

Haacker, J., Wouters, B., Fettweis, X., Glissenaar, I.A., Box, J.E. (2024) Atmospheric-river-induced foehn events drain glaciers on Novaya Zemlya, *Nature Communications*, vol. 15, no. 1, p. 7021.

Hock, R., Huss, M. (2021). Glaciers and climate change, *Climate change. Observed Impacts on Planet Earth*, Third Edition. In Trevor M., Letcher, Elsevier, (eds.), pp. 157-176.

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., Käab, A. (2021) Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century, *Nature*, vol. 592, no. 7856, pp. 726-731.

IPCC (2019) *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 p.

IPCC (2022) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.), Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 p.

Jakob, L., Gourmelen, N. (2023) Glacier mass loss between 2010 and 2020 dominated by atmospheric forcing, *Geophysical Research Letters*, vol. 50, no. 8, e2023GL102954.

Kochtitzky, W., Copland, L., Van Wychen, W., Hugonnet, R., Hock, R., Dowdeswell, J.A., Benham, T., Strozzì, T., Glazovsky, A., Lavrentiev, I., Rounce, D.R., Millan, R., Cook, A., Dalton, A., Jiskoot, H., Cooley, J., Jania, J., Navarro, F. (2022) The unquantified mass loss of Northern Hemisphere marine-terminating glaciers from 2000-2020, *Nature Communications*, vol. 13, no. 1, p. 5835.

Li, Y.J., Ding, Y.J., Shangguan, D.H., Wang, R.J. (2019) Regional differences in global glacier retreat from 1980 to 2015, *Advances in Climate Change Research*,

vol. 10, no. 4, pp. 203-213.

Melkonian, A.K., Willis, M.J., Pritchard, M.E., Stewart, A.J. (2016) Recent changes in glacier velocities and thinning at Novaya Zemlya, *Remote Sensing of Environment*, vol. 174, pp. 244-257.

Onarheim, I.H., Årthun, M. (2017) Toward an ice-free Barents Sea, *Geophysical Research Letters*, vol. 44, no. 16, pp. 8387-8395.

Paul, F., Barrand, N.E., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., Casey, K., Frey, H., Joshi, S.P., Konovalov, V., Le Bris, R., Mölg, N., Nosenko, G., Nuth, C., Pope, A., Racoviteanu, A., Rastner, P., Raup, B., Scharrer, K., Steffen, S., Winsvold, S. (2013) On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data, *Annals of Glaciology*, vol. 54, no. 63, pp. 171-182.

Reinthaler, J., Paul, F. (2024) Assessment of methods for reconstructing Little Ice Age glacier surfaces on the examples of Novaya Zemlya and the Swiss Alps, *Geomorphology*, vol. 461, p. 109321.

Roe, G.H., Baker, M.B., Herla, F. (2017). Centennial glacier retreat as categorical evidence of regional climate change, *Nature Geoscience*, vol. 10, no. 2, pp. 95-99.

Rounce, D.R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M., Berthier E., Brinkerhoff, D., Compagno L., Mc Nabb, R.W. (2023). Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters, *Science*, vol. 379, no. 6627, pp. 78-83.

Tepes, P., Nienow, P., Gourmelen, N. (2021) Accelerating ice mass loss across Arctic Russia in response to atmospheric warming, sea ice decline, and Atlantification of the Eurasian Arctic Shelf Seas, *Journal of Geophysical Research. Earth Surface*, vol. 126, no. 7, p. e2021JF006068.

Zeeberg, J., Forman, S. (2001) Changes in glacier extent on North Novaya Zemlya in the twentieth century, *Holocene*, vol. 11, no. 2, 1161-1175.

Zhao, M., Ramage, J., Semmens, K., Obleitner, F. (2014) Recent ice cap snowmelt in Russian High Arctic and anti-correlation with late summer sea ice extent, *Environmental Research Letters*, vol. 9, no. 4, p. 045009.

References

Aleynikov, A.A., Lipka, O.N. (2018) Degradaciya pokrovnogo oledeneniya ostrova Ushakova po materialam kosmicheskikh s"emok [Degradation of glaciation on Ushakov Island based on satellite imagery], *Zemlya iz kosmosa*, no. 9 (25), pp. 32-39.

Bychkova, I.A., Smirnov, V.G., Mikhaltseva S.V., Platonova, E.V. (2024) Aysbergovaya opasnost' v moryakh Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii v usloviyakh sovremennykh klimaticheskikh izmeneniy [Iceberg danger in the seas

of the Arctic zone of the Russian Federation in the conditions of modern climate changes], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, vol. 70, no. 1, pp. 71-86.

Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation] (2014) In V.M. Kattsov, S.M. Semenov (eds.), Roshydromet, Moscow, Russia, 1009 p.

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2023 god [Report on climate features on the territory of the Russian Federation for 2023] (2024) Roshydromet, Moscow, Russia, 104 p.

Efimov, V.V., Komarovskaya, O.I. (2018) Sezonnaya izmenchivost' i gidrodinamicheskiye rezhimy novozemel'skoy bory [Seasonal variability and hydrodynamic regimes of the Novaya Zemlya bora], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 54, no. 6, pp. 684-698.

Katalog lednikov SSSR, T. 3, Severnyy kray, Chast' 2, Novaya Zemlya [Catalog of glaciers of the USSR, vol. 3, Northern Territory, Part 2, Novaya Zemlya] (1978) Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR, 112 p.

Katalog lednikov SSSR [Catalog of glaciers of the USSR] (1966-1982), in 20 volumes, Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR.

Koryakin, V.S. (1997) Ledniki Novoy Zemli [Glaciers of Novaya Zemlya], *Zemlya i Vselennaya*, no. 1, pp. 17-24.

Kotlyakov, V.M., Khromova, I.E., Nosenko, G.A., Popova, V.V., Chernova, L.P., Muravyov, A.Ya., Rototaeva, O.V., Nikitin, S.A., Zverkova, N.M. (2015), *Sovremennyye izmeneniya lednikov gornyykh rayonov Rossii* [Modern changes in glaciers in mountainous regions of Russia], KMK Scientific Publishing Company, Moscow, Russia, 288 p.

Ledniki Rossii [Glaciers of Russia] (2020) GIS online for visualization and analysis of data on the state of Russian glaciers, obtained on the basis of space information as of the second decade of the 21st century, Institut geografii RAN, Moscow, Russia, available at: URL: <https://sites.google.com/view/glaciersrussia/> (accessed October 2, 2024).

Oledeneniye Severnoy i Tsentral'noy Yevrazii v sovremennuyu epokhu [Glaciation of Northern and Central Eurasia in the modern era] (2006) Rep. ed. V.M. Kotlyakov, Institut geografii RAN, Moscow, Russia, 482 p.

Surkova, G.V., Romanenko, V.A. (2021) *Izmeneniye klimata i teploobmen mezhdru atmosferoy i okeanom v Arktike na primere Barentseva i Karskogo morey* [Climate change and heat exchange between the atmosphere and the ocean in the Arctic using the example of the Barents and Kara Seas], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, vol. 67, no. 3, pp. 280-292.

Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [Third assessment report on climate change and its

consequences on the territory of the Russian Federation] (2022) In V.M. Kattsov (ed.), *Naukoemkie tekhnologii*, St. Petersburg, Russia, 676 p.

Khromova, T.E., Nosenko, G.A., Glazovsky, A.F., Muravyov, A.Ya., Nikitin, S.A., Lavrentiev, I.I. (2021) *Novyy Katalog lednikov Rossii po sputnikovym dannym (2016-2019 gg.)* [New Catalog of Russian glaciers based on satellite data (2016–2019)], *Led i sneg*, vol. 61, no. 3, pp. 341-358.

Ali, A., Dunlop, P., Coleman, S., Kerr, D., McNabb, R.W., Noormets, R. (2023) Glacier area changes in Novaya Zemlya from 1986-89 to 2019-21 using object-based image analysis in Google Earth Engine, *Journal of Glaciology*, vol. 69, no. 277, pp. 1305-1316.

AMAP (2011) *Snow, Water and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Climate Change and the Cryosphere*, Oslo, Arctic Monitoring and Assessment (AMAP), Xii +, 538 p.

Carey, M., Molden, O.C., Rasmussen, M.B., Jackson, M., Nolin, A.W., Mark, B.G. (2017) Impacts of glacier recession and declining meltwater on mountain societies, *Annals of the American Association of Geographers*, vol. 107, no. 2, pp. 350-359.

Carr, J.R., Bell, H., Killick, R., Holt, T. (2017) Exceptional retreat of Novaya Zemlya's marine-terminating outlet glaciers between 2000 and 2013, *The Cryosphere*, vol. 11, no. 5, pp. 2149-2174.

Carr, J.R., Stokes, C., Vieli, A. (2014) Recent retreat of major outlet glaciers on Novaya Zemlya, Russian Arctic, influenced by fjord geometry and sea-ice conditions, *Journal of Glaciology*, vol. 60, no. 219, pp. 155-170.

Ciraci, E., Velicogna, I., Sutterley, T.C. (2018) Mass balance of Novaya Zemlya archipelago, Russian High Arctic, using time-variable gravity from grace and altimetry, data from ICESat and Cryosat-2, *Remote Sensing*, vol. 10, no. 11, p. 1817.

Dashora, A., Lohani, B., Malik, J.N. (2007) A repository of earth resource information – the Corona satellite programme, *Current Science*, vol. 92, no. 7, pp. 926-932.

Davison, B.J., Cowton, T.R., Cottier, F.R., Sole, A.J. (2020). Iceberg melting substantially modifies oceanic heat flux towards a major Greenlandic tidewater glacier, *Nature communications*, vol. 11, no. 1, p. 5983.

Dussailant, I., Hugonnet, R., Huss, M., Berthier, E., Bannwart, J., Paul, F., Zemp, M. (2024) Annual mass changes for each glacier in the world from 1976 to 2023, *Earth System Science Data Discussions*, vol. 2024, pp. 1-41.

Grant, K.L., Stokes, C.R., Evans, I.S. (2009) Identification and characteristics of surge-type glaciers on Novaya Zemlya, Russian Arctic, *Journal of Glaciology*, vol. 55, no. 194, pp. 960-972.

Haacker, J., Wouters, B., Fettweis, X., Glissenaar, I.A., Box, J.E. (2024) Atmospheric-river-induced foehn events drain glaciers on Novaya Zemlya, *Nature Communications*, vol. 15, no. 1, p. 7021.

Hock, R., Huss, M. (2021). Glaciers and climate change, *Climate change. Observed Impacts on Planet Earth*, Third Edition. In Trevor M., Letcher, Elsevier, (eds.), pp. 157-176.

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussailant, I., Brun, F., Kääb, A. (2021) Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century, *Nature*, vol. 592, no. 7856, pp. 726-731.

IPCC (2019) *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 p.

IPCC (2022) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.), Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 p.

Jakob, L., Gourmelen, N. (2023) Glacier mass loss between 2010 and 2020 dominated by atmospheric forcing, *Geophysical Research Letters*, vol. 50, no. 8, p. e2023GL102954.

Kochtitzky, W., Copland, L., Van Wychen, W., Hugonnet, R., Hock, R., Dowdeswell, J.A., Benham, T., Strozzi, T., Glazovsky, A., Lavrentiev, I., Rounce, D.R., Millan, R., Cook, A., Dalton, A., Jiskoot, H., Cooley, J., Jania, J., Navarro, F. (2022) The unquantified mass loss of Northern Hemisphere marine-terminating glaciers from 2000-2020, *Nature Communications*, vol. 13, no. 1, p. 5835.

Li, Y.J., Ding, Y.J., Shangguan, D.H., Wang, R.J. (2019) Regional differences in global glacier retreat from 1980 to 2015, *Advances in Climate Change Research*, vol. 10, no. 4, pp. 203-213.

Melkonian, A.K., Willis, M.J., Pritchard, M.E., Stewart, A.J. (2016) Recent changes in glacier velocities and thinning at Novaya Zemlya, *Remote Sensing of Environment*, vol. 174, pp. 244-257.

Onarheim, I.H., Årthun, M. (2017) Toward an ice-free Barents Sea, *Geophysical Research Letters*, vol. 44, no. 16, pp. 8387-8395.

Paul, F., Barrand, N.E., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., Casey, K., Frey, H., Joshi, S.P., Konovalov, V., Le Bris, R., Mölg, N., Nosenko, G., Nuth, C., Pope, A., Racoviteanu, A., Rastner, P., Raup, B., Scharrer, K., Steffen, S., Winsvold, S. (2013) On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data, *Annals of Glaciology*, vol. 54, no. 63, pp. 171-182.

Reinthalер, J., Paul, F. (2024) Assessment of methods for reconstructing Little Ice Age glacier surfaces on the examples of Novaya Zemlya and the Swiss Alps, *Geomorphology*, vol. 461, p. 109321.

Roe, G.H., Baker, M.B., Herla, F. (2017). Centennial glacier retreat as categorical evidence of regional climate change, *Nature Geoscience*, vol. 10, no. 2, pp. 95-99.

Rounce, D.R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M., Berthier E., Brinkerhoff, D., Compagno L., Mc Nabb, R.W. (2023). Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters, *Science*, vol. 379, no. 6627, pp. 78-83.

Tepes, P., Nienow, P., Gourmelen, N. (2021) Accelerating ice mass loss across Arctic Russia in response to atmospheric warming, sea ice decline, and Atlantification of the Eurasian Arctic Shelf Seas, *Journal of Geophysical Research. Earth Surface*, vol. 126, no. 7, p. e2021JF006068.

Zeeberg, J., Forman, S. (2001) Changes in glacier extent on North Novaya Zemlya in the twentieth century, *Holocene*, vol. 11, no. 2, 1161-1175.

Zhao, M., Ramage, J., Semmens, K., Obleitner, F. (2014) Recent ice cap snowmelt in Russian High Arctic and anti-correlation with late summer sea ice extent, *Environmental Research Letters*, vol. 9, no. 4, p. 045009.

Статья поступила в редакцию (Received): 04.08.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 06.10.2024.

Принята к публикации (Accepted): 13.10.2024.

Для цитирования / For citation

Алейников, А.А., Липка, О.Н. (2024) Изменение оледенения Новой Земли по данным дистанционного зондирования, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 4, с. 464-491, doi:10.21513/2410-8758-2024-4-464-491.

Aleynikov, A.A., Lipka, O.N. (2024) Changes in glaciation of Novaya Zemlya according to remote sensing data, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 4, pp. 464-491, doi:10.21513/2410-8758-2024-4-464-491.