

УДК: 912.4

И. А. Рыльский¹, М. С. Малеванная², Д. А. Парамонов³, Р. В. Груздев⁴**СРАВНЕНИЕ ЦМР ARCTICDEM С ДАННЫМИ
ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ****АННОТАЦИЯ**

Статья посвящена оценке точности цифровой модели рельефа ArcticDEM в сравнении с данными воздушного лазерного сканирования (ВЛС) на территории Кольского п-ова. ArcticDEM, созданная на основе стереоскопической обработки спутниковых снимков, обладает высокой детальностью (разрешение до 2 м), но ее точность требует проверки, особенно в условиях сложного рельефа и растительного покрова. В качестве эталона авторами использованы данные воздушного лазерного сканирования с плотностью более 6 точек на м², охватывающие площадь 260 км². Основные результаты исследования показывают наличие систематических отклонений на несколько дециметров, что может требовать коррекции для повышения точности данных. Данные ArcticDEM обладают хорошей фильтрацией растительного покрова, без которой итоговые значения могут иметь на порядок большие отклонения. Погрешности возрастают с увеличением расчлененности рельефа. ArcticDEM соответствует требованиям для создания топопланов м-ба 1:10 000 с сечением рельефа 5 м, но не подходит для м-ба 1:5 000 из-за недостаточной точности. На водных объектах наблюдаются значительные отклонения (до 1 м) на водной поверхности, что связано с ограничениями стереофотограмметрии для однородных текстур. ArcticDEM демонстрирует высокую точность, в т. ч. и в условиях тундры и лесотундры, но ее использование требует учета систематических погрешностей и оценки расчлененности рельефа. Модель пригодна для региональных исследований, но в горных районах ее точность может существенно падать. Результаты исследований подтверждают заявленные производителем погрешности, если трактовать их значения как величину одного стандартного отклонения. Исследование подчеркивает важность валидации глобальных ЦМР локальными высокоточными данными, такими как ВЛС, для обеспечения достоверности результатов в научных и прикладных задачах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИС, воздушное лазерное сканирование, лидар, лесотундра, цифровая модель рельефа, ArcticDEM

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119234, *e-mail*: rilskiy@mail.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: malevannaya_m@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: paramonovwork@mail.ru

⁴ ФГБУН Институт природных ресурсов, экологии и криологии, Сибирское отделение РАН, ул. Недорезова, д. 16а, а/я 1032, Чита, Россия, 672002, *e-mail*: roguzdev@mail.ru

Илья А. Рылский¹, Марина С. Малеванная², Дмитрий А. Парамонов³, Роман В. Груздев⁴

COMPARISON OF ARCTICDEM WITH AIRBORNE LASER SCANNING DATA

ABSTRACT

The article is devoted to the assessment of the accuracy of the ArcticDEM digital elevation model in comparison with airborne laser scanning (ALS) data on the Kola Peninsula. ArcticDEM, created on the basis of stereoscopic processing of satellite images, has a high level of detail (resolution up to 2 m), but its accuracy requires verification, especially in conditions of complex relief and vegetation cover. As a standard, the authors used airborne laser scanning data with a density of more than 6 points per m², covering an area of 260 km². The main results of the study show the presence of systematic deviations of several decimeters, which may require correction to improve the accuracy of the data. ArcticDEM data have good filtering of vegetation cover, without which the final values may have an order of magnitude greater deviations. Errors increase with increasing relief dissection. ArcticDEM meets the requirements for creating topographic plans at a scale of 1:10 000 with a relief section of 5 m, but is not suitable for a scale of 1:5 000 due to insufficient accuracy. Significant deviations (up to 1 m) are observed on the water surface on water bodies, which is due to the limitations of stereophotogrammetry for homogeneous textures. Thus, ArcticDEM demonstrates high accuracy, including in tundra and forest-tundra conditions, but its use requires taking into account systematic errors and assessing the ruggedness of the relief. The model is suitable for regional studies, but in mountainous areas its accuracy can drop significantly. The research results confirm the errors declared by the manufacturer if their values are interpreted as the value of one standard deviation. The study emphasizes the importance of validating global DEMs with local high-precision data, such as ALS, to ensure the reliability of results in scientific and applied problems.

KEYWORDS: GIS, airborne laser scanning, LIDAR, forested area, digital elevation model, ArcticDEM

ВВЕДЕНИЕ

К 2025 г. открытые модели данных, включающие в себя цифровые модели рельефа глобального или субглобального охвата, используются очень широко при проведении подавляющего количества географических исследований. Такие модели, как SRTM, AW3D, AsterDEM с их детальностью на уровне топографических карт м-ба 1:50 000–1:100 000 нашли применение в тысячах исследований. Долгое время более детальные модели рельефа, построенные по данным космической съемки, были доступны только за деньги, причем стоили они довольно дорого. Тем не менее, с 2022 г. стала доступна еще одна цифровая модель рельефа [Porter, 2022] с гораздо большей детальностью — ArcticDEM. Ее охват, к сожалению, не глобальный, а региональный (охватывает арктический регион с некоторыми прилегающими территориями, например, Камчатским п-овом). Однако детальность данной модели оставляет всех предшественников далеко позади. Так, если SRTM, AW3D, AsterDEM имеют размер ячейки 30 м [Mukul, 2017], то у ArcticDEM

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: rilskiy@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: malevannaya_m@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: paramonovwork@mail.ru

⁴ FGBUN Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Department of Russian Academy of Sciences, 16a, Nedorezova str., PO box 1032, Chita, 672002, Russia, e-mail: roguzdev@mail.ru

(в наиболее детальной версии) размер ячейки составляет 2 м. Для сравнения, для создания топографических планов м-ба 1:2 000 обычно используется ячейка раstra ЦМР в 1 м.

ArcticDEM создана по данным оптических сенсоров и в теории должна обладать всеми недостатками, присущими ЦМР, созданным по оптическим материалам с использованием стереоскопического метода [Chandler, 2001]. К ним относятся:

- невозможность получения информации о рельефе под пологом растительности (конечно, в арктическом регионе растительность не столь развита, как в более близких к экватору районах, но это не значит, что ее нет совсем);
- большое количество неточностей в областях однородных структур (снег, водные поверхности и пр.);
- зависимость от угла съемки и наличия теней или дымки в районе работ (фактическая детальность снимков и, следовательно, высотная погрешность ЦМР и ее подробность могут очень сильно ухудшаться).

В официальных отчетах о точности ArcticDEM (как и у других моделей рельефа глобального охвата) есть сведения об ожидаемой вертикальной точности, однако как показывает практика использования предшествующих ArcticDEM ЦМР глобального охвата, ситуация с погрешностями может очень сильно отличаться от средних цифр погрешностей, заявленных производителями.

Для оценки и понимания точности ArcticDEM, особенностей пространственного распределения ее погрешностей в зависимости от растительности и степени расчлененности рельефа было решено произвести сравнение материалов ArcticDEM с данными воздушного лазерного сканирования некоторой территории в арктическом регионе. Общеизвестно, что на сегодняшний день воздушное лазерное сканирование (далее — ВЛС) дает наиболее детальные и точные результаты в части данных о рельефе, причем эти сведения могут покрывать сотни и тысячи квадратных километров территории. При средней точности измерения высоты рельефа методом ВЛС на уровне 10 см [Gorgens, 2017] эти данные являются, пожалуй, идеальным эталоном для проведения массовой площадной оценки точности менее точных ЦМР. Конечно, использование наземных геодезических измерений позволяет обеспечить еще большую точность (1 см и лучше), однако данный уровень точности не слишком востребован при оценке данных, точность которых предположительно составляет около 1 м или хуже. Конечно же, обеспечиваемая наземными геодезическими измерениями площадь в лучшем случае измеряется первыми квадратными километрами, что совершенно недостаточно для массовой площадной оценки.

В качестве эталона для оценки точности и характера распределения погрешностей модели ArcticDEM было принято решение использовать материалы ВЛС.

Краткое описание модели ArcticDEM

ArcticDEM — это высокоточная цифровая модель рельефа (ЦМР), созданная для территории Арктики (севернее 60° широты, рис. 1) с использованием методов стереофотограмметрии на основе спутниковых снимков. Проект разрабатывается Полярным геопространственным центром (PGC, University of Minnesota) совместно с Национальным геопространственным разведывательным агентством (NGA) и другими научными организациями.

Основная цель ArcticDEM — обеспечить исследователей, государственные учреждения и коммерческие структуры актуальными и точными данными о рельефе для изучения изменений климата, динамики ледников, картографирования и планирования инфраструктуры.

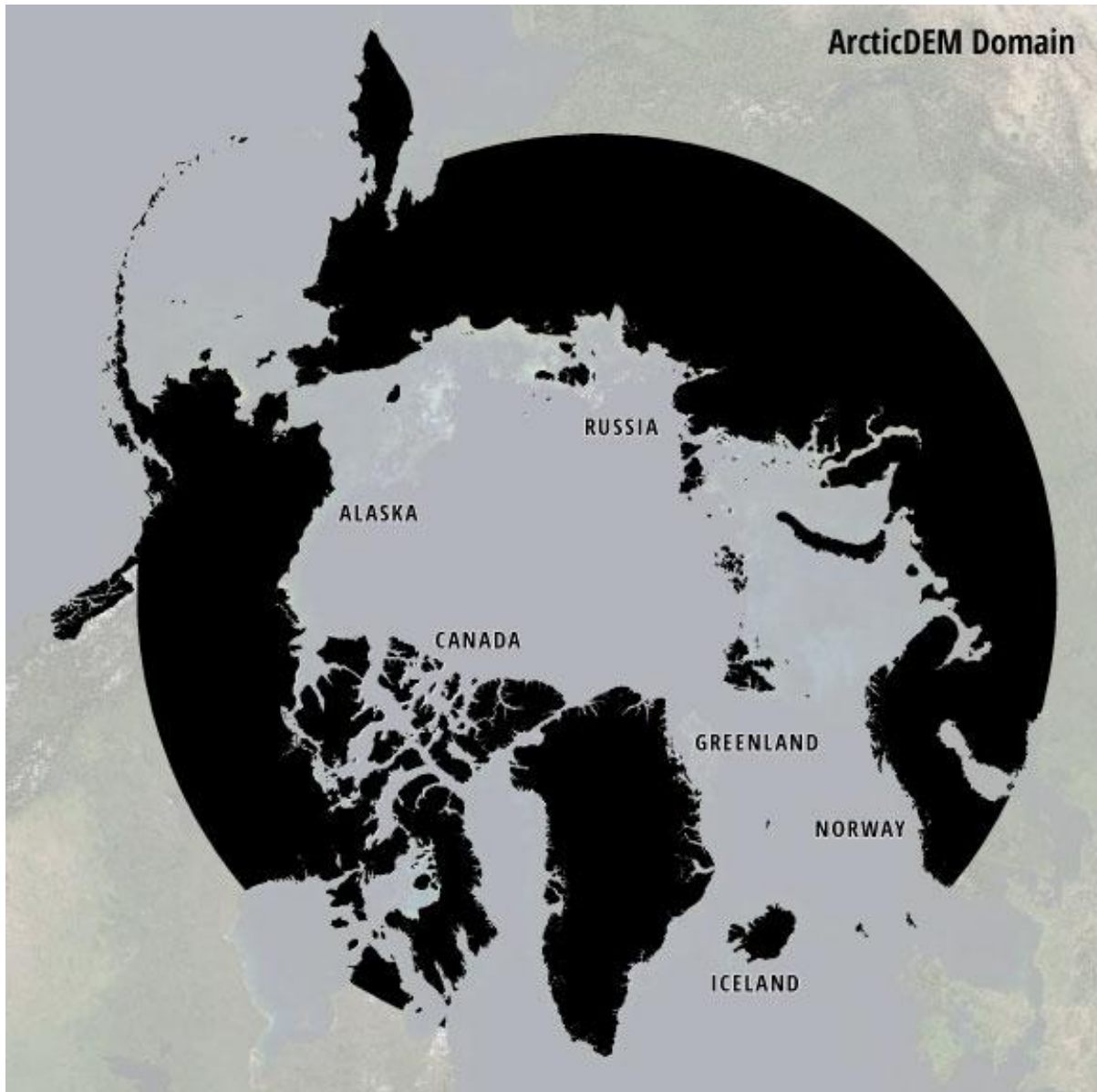


Рис. 1. Область покрытия данными модели ArcticDEM
Fig. 1. The coverage area of the ArcticDEM model data

Модель ArcticDEM построена на основе стереопар [Morin, 2016] высокодетаальных спутниковых снимков, полученных с коммерческих аппаратов WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3 (Maxar Technologies), GeoEye-1 (Maxar), Pleiades (Airbus Defence and Space). Эти спутники обладают разрешением до 0,3–0,5 м в панхроматическом режиме и возможностью выполнения стереосъемки (перекрытие снимков $\geq 80\%$), что позволяет строить 3D-модели.

Технология обработки данных включает:

- фотограмметрический метод (алгоритмы Surface Extraction from TIN-based Search-space Minimization, SETSM);
- облачную обработку (используются суперкомпьютеры для параллельных вычислений);
- коррекцию геометрических искажений (учитываются орбитальные параметры, искажения за рельеф).

Географический охват модели включает в себя Арктику (севернее 60° с. ш.), в т. ч. Россию (Сибирь, Дальний Восток, арктические острова, п-ов Камчатка).

ArcticDEM выпускается в нескольких вариантах детальности: 2 м (для детального анализа), 5 м (региональные исследования), 10 м (для широкомасштабного анализа), а также 32 и 100 м. Наиболее точная версия — 2 м, но для широкого использования часто применяется 5–10 м.

Заявленные производителем погрешности (вертикальная ошибка) таковы:

- на открытой местности: ~0,5–2 м (зависит от типа поверхности);
- в горных районах: до 3–5 м (из-за теней и сложного рельефа);
- на ледниках: 1–3 м (из-за изменяющейся поверхности).

Началом проекта можно считать 2015 г. (первые тестовые участки), основная фаза происходила в 2016–2020 гг. (массовая обработка данных).

Как уже говорилось выше, спутниковые стереоснимки фиксируют не только рельеф, но и растительность (леса, кустарники), что искажает истинную высоту поверхности грунта (земли). Для решения или минимизации искажений высот, вносимых растительностью, применяются следующие методы:

- использование зимних снимков (когда растительность покрыта снегом);
- алгоритмы фильтрации (удаление выбросов через статистические методы).

Предполагается, что в открытой тундре и льдах ошибка минимальна, в лесистых районах может потребоваться дополнительная обработка.

По итогам всего сказанного выше, создатели ЦМР ArcticDEM заявляют, что данные с детальностью 2 м подходят для картографирования в м-бе 1:5 000–1:10 000.

Постановка задачи

Задачами данного исследования являются:

- оценка того, к какой из моделей, построенных по данным ВЛС (ЦМР или ЦМП) ближе данные ArcticDEM;
- каковы систематические отклонения данных ArcticDEM от ЦМР и ЦМП по данным ВЛС;
- каковы случайные отклонения данных ArcticDEM от ЦМР и ЦМП по данным ВЛС;
- как зависит погрешность ArcticDEM от углов наклона и расчлененности рельефа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория для анализа и ее географическое положение

В качестве участка для сравнения был выбран участок территории Кольского п-ова в районе Колмозерского месторождения лития. Материалы съемки были получены в 2023 г. В административном отношении участок расположен в Российской Федерации, на территории Мурманской обл. на Кольском п-ове. Участок расположен на северо-востоке от г. Апатиты, на горах Большой и Малый Потчемварак в районе оз. Колмозеро. Район работ расположен за Полярным кругом, поэтому среднегодовая температура тут составляет –0,1 °С. Полярная ночь начинается 10 декабря и заканчивается 3 января. Полярный день длится с 31 мая по 13 июля. Лето и весна здесь прохладные и довольно поздние. Снег начинает таять в конце апреля, когда температура поднимается выше 0 °С. Безморозный период в горах продолжается не дольше 60–80 дней. Средняя летняя температура равняется 12 °С.

Колмозерское месторождение (рис. 1) расположено в центральной части Кольского п-ова, примерно в 80 км к востоку от Ловозерских тундр (известных своим массивом Ловозерских гор). Ближайшие населенные пункты: пгт Ревда (Ловозерский р-н), г. Оленегорск. Главный водный объект — оз. Колмозеро, от которого месторождение получило

название. Реки — Колма, Сергевань, другие малые реки и ручьи. Территория характеризуется древними разломами и складчатостью.

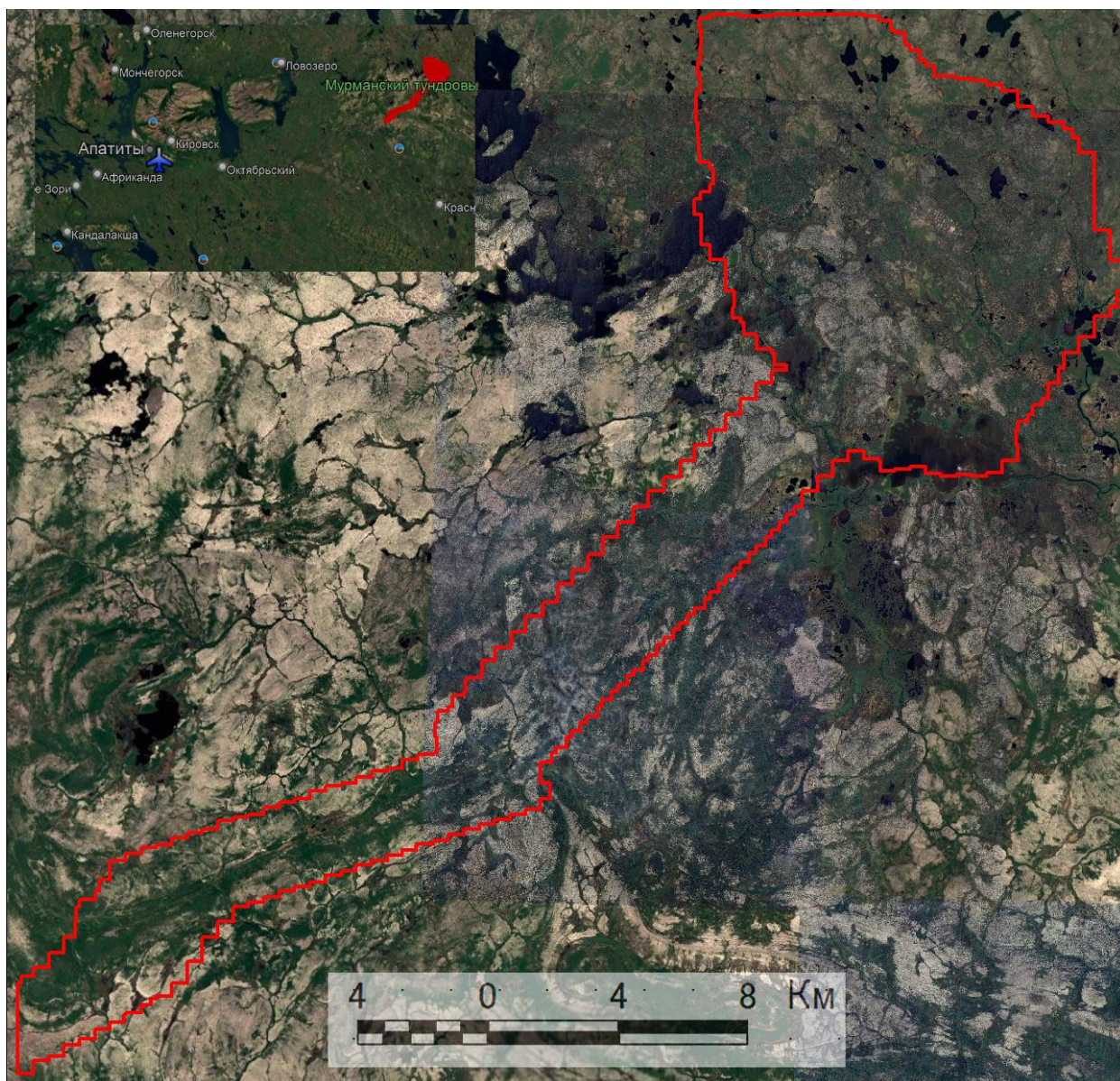


Рис. 2. Космический снимок территории района работ (Колмозерское месторождение с прилегающими территориями). Красным показаны границы территории, на которой проводилось сравнение

Fig. 2. Space image of the area of work (Kolmozerskoye deposit with adjacent territories). The boundaries of the territory where the comparison was made are shown in red

Рельеф местности. Колмозерское месторождение находится в зоне холмисто-грядового рельефа, типичного для центральной части Кольского п-ова. Высоты находятся в диапазоне 100–300 м н. у. м. (отдельные возвышенности до 350–400 м); относительные превышения — 50–150 м. Основные формы рельефа:

- холмистые гряды (сложены кристаллическими породами);
- ледниковые формы (моренные валы, камы);
- озерно-болотные понижения.

В результате влияния четвертичного оледенения широко представлены моренные отложения (валунные суглинки, пески), озы и камы (ледниково-аккумулятивные формы), бараньи лбы (отполированные ледником скальные выступы).

Современные процессы, влияющие на формы рельефа:

- криогенные явления (мерзлотные процессы слабо выражены, но есть участки многолетней мерзлоты);
- эрозионные процессы (размыв реками, оврагообразование);
- болотообразование (в понижениях рельефа).

Растительность и ландшафты представлены тундровой и лесотундровой зонами. Основные типы растительности: сосновые и еловые редколесья, кустарничково-лишайниковые тундры, болота (верховые и переходные).

Рельеф и растительность территории, выбранной для сравнения, могут быть отнесены к «средней сложности» для построения ЦМР по данным оптических сенсоров космического базирования.

Методика аэрофотосъемочных работ с использованием ВЛС

Аэрофотосъемка и воздушное лазерное сканирование выполнялось в 2023 г. Работы велись с использованием пилотируемого носителя (Piper Aztec), лазерной сканирующей системы REIGL LMS Q560 и цифровой среднеформатной аэрофотосъемочной камеры IGI DIGICAM H60 (60 Мпикс). Итоговые результаты получены в системе координат WGS84 (эллипсоидальные высоты), также было проведено уточнение локальных параметров связи WGS84-ГСК2011 и уточнены остаточные поправки в высоты при переходе к Балтийской системе высот 1977 г. с использованием модели геоида EGM2008.

Воздушное лазерное сканирование выполнялось с высоты 550 м (+/-30 м) с одновременной аэрофотосъемкой в видимом диапазоне. Плотность лазерного сканирования составила 6,1 точек на 1 м², среднее расстояние между прямыми измерениями координат облучаемой поверхности — 39 см. Пространственное разрешение аэрофотоснимков на местности получено не хуже 0,08 м/пикс. Съемка велась параллельными залетами с продольным перекрытием 65 % и поперечным перекрытием 30–35 % [Руководство..., 1986].

Съемка велась с 9 по 13 июня в период с неполным распусканием листвы. По результатам проведенных наземных измерений на контрольных точках, координаты которых определялись методом статических ГНСС-измерений, оценочная среднеквадратическая погрешность лазерно-локационной съемки по высоте составила 8,5 см, и 21,3 см — в плане. Время выполнения работ составило 6 ч.

По результатам лазерного сканирования была выполнена классификация [Lohr, 1997] точек лазерных отражений (классы «Земля», «Растительность», «Прочее») с использованием средств автоматизации с последующей визуальной проверкой построенной модели (использовался пакет Terra Solid). Из точек класса «Земля» методом триангуляции Делоне [Капранов, 2004] (средняя длина ребра 2,1–2,3 м в зависимости от типа рельефа) была построена TIN-модель местности [Chen, 2007], позднее преобразованная в регулярно-ячеистую модель данных (формат ArcINFO GRID) с шагом 2 м. На основе цифровой матрицы (формат ArcINFO GRID) построены изолинии рельефа местности с сечением 0,5 м.

Сравнение ЦМР и ЦМР, полученных по данным ВЛС, с ArcticDEM

Сравнение материалов ВЛС с данными ArcticDEM производилось в среде ArcView версии 3.2. Для выполнения сравнения в системе координат WGS84 (зона 37) выполнялся анализ ЦМР с равными габаритами и равным пространственным разрешением (2 м). Для анализа данных ВЛС использовались две поверхности:

- ЦМР, построена по данным точек лазерных отражений класса «Земля»;
- ЦМП, модель видимой поверхности, построена по данным классов «Земля» и «Растительность» с использованием высших точек в пределах каждого пиксела. Общая площадь территории анализа составила 260 км².

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Построенные модели рельефа показывают, что рельеф участка весьма разнообразен (рис. 3).

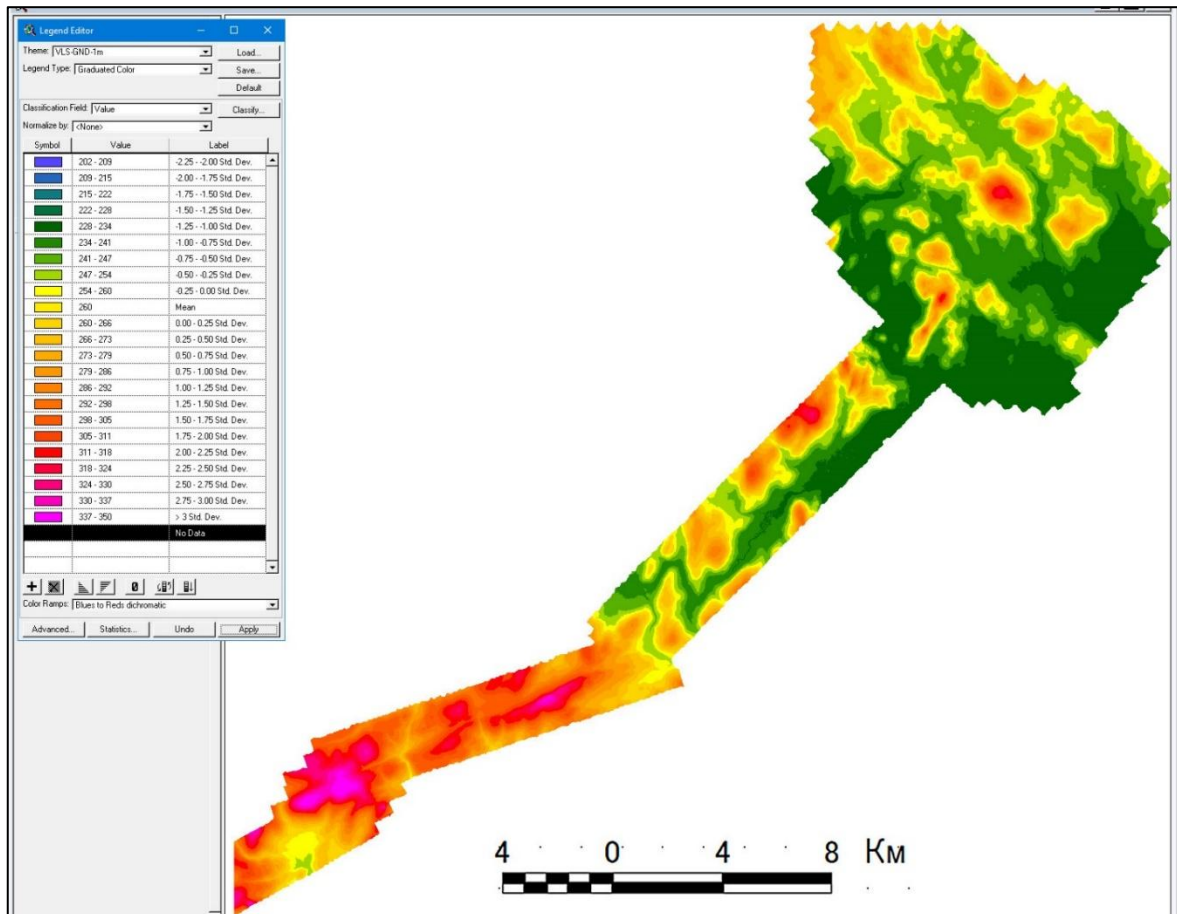


Рис. 3. Цифровая модель рельефа, построенная по данным ВЛС
Fig. 3. Digital elevation model constructed using ALS data

Этап 1. Оценка расхождений моделей в целом

По результатам вычитания из ЦМР_{ВЛС} и ЦМП_{ВЛС} данных модели ArcticDEM были получены гриды дельт, которые имеют следующие статистические характеристики (табл. 1). Исходная модель ArcticDEM, несмотря на заявленную фильтрацию, имеет значительное количество мелких по площади, но значительных по амплитуде артефактов, которые хорошо видны глазами и могли бы быть отфильтрованы создателями данного продукта.

Исходные гриды дельт имеют очень высокие предельные значения отклонений (до 140 м), однако количество таких ячеек минимально. Работать с такими гридами крайне неудобно, каждый грид дельт был подвергнут фильтрации — значения дельты более 5 м (по модулю) принимались равными 5 м.

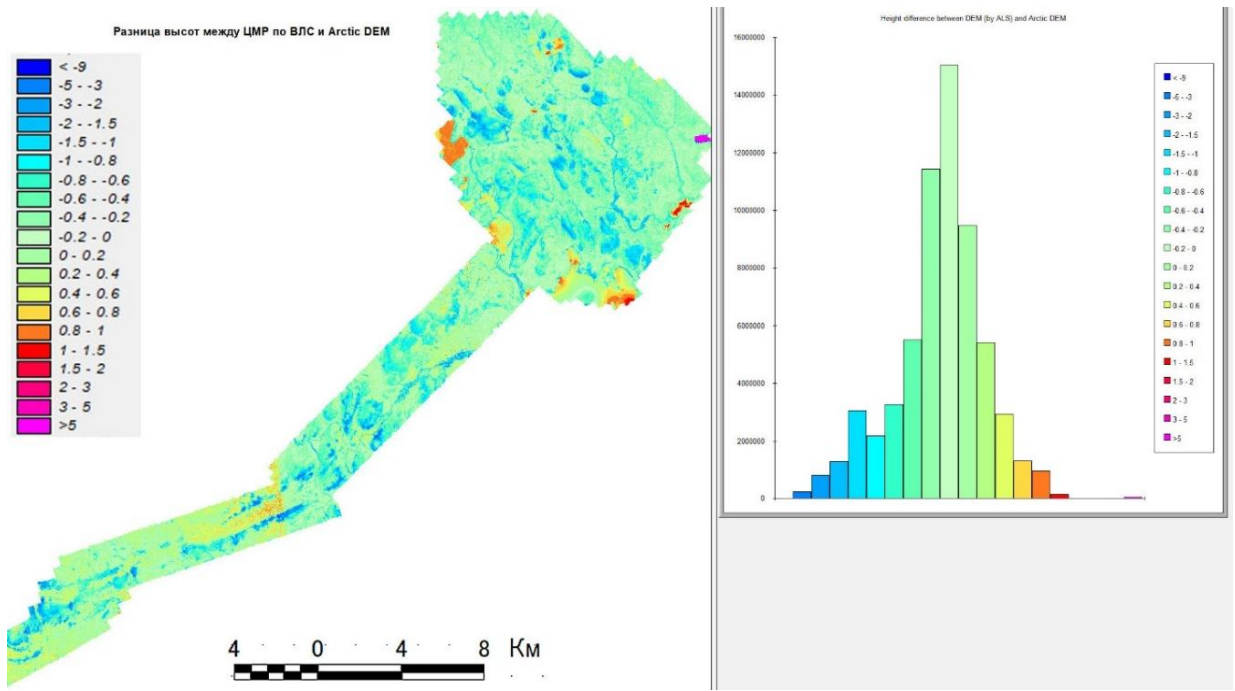


Рис. 4. Различия по высоте между ArcticDEM и ЦМР по данным ВЛС
 Fig. 4. Differences in height between ArcticDEM and DEM based on ALS data

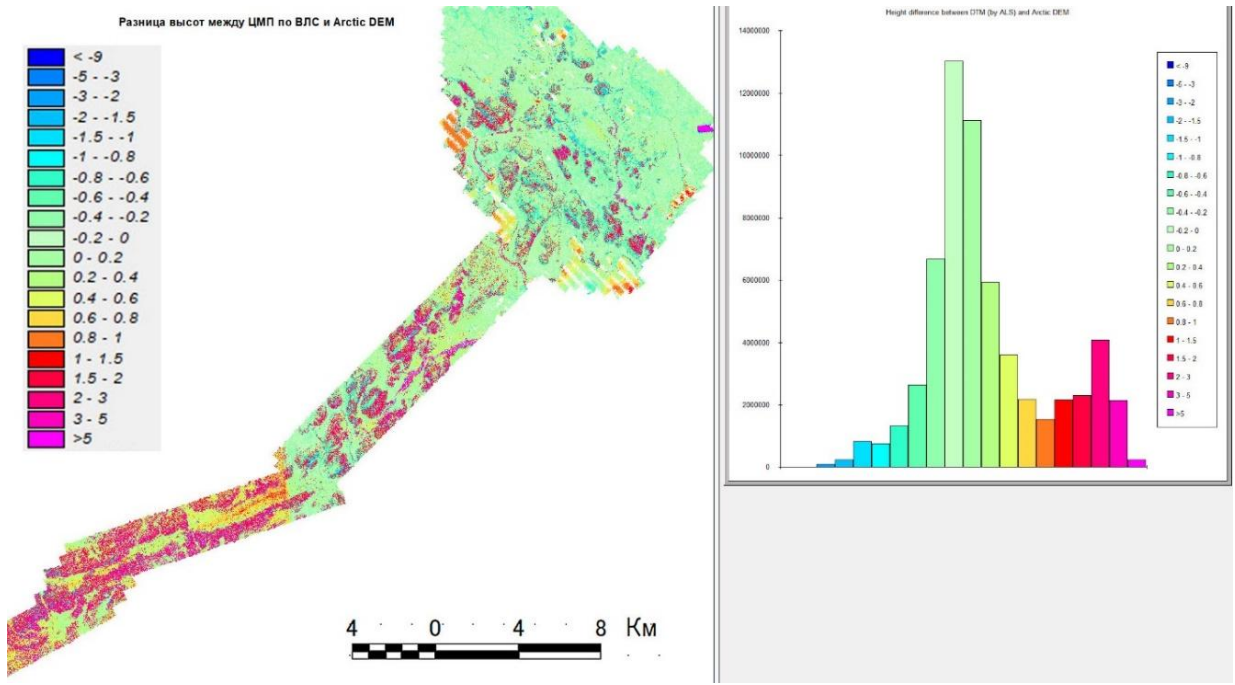


Рис. 5. Различия по высоте между ArcticDEM и ЦМП по данным ВЛС
 Fig. 5. Differences in height between ArcticDEM and DSM based on ALS data

Табл. 1. Статистика разностных поверхностей
Table 1. Statistics of difference surfaces

	Средняя разница, м	Стандартное отклонение, м
ЦМР _{в.лс} – ArcticDEM	-0,23	0,610
ЦМП _{в.лс} – ArcticDEM	+0,42	1,051

Нетрудно видеть, что несмотря на схожие систематические отклонения, как среднее значение (по модулю), так и величина стандартного отклонения для ЦМП_{в.лс} больше, чем для ЦМР_{в.лс}.

Этап 2. Оценка пространственного распределения отклонений

«Средняя по больнице» величина отклонений для столь большой территории мало о чем говорит, поэтому было решено проанализировать пространственное распределение отклонений. Для этого в программной среде Avenue (входит в состав ArcView 3.2) был написан программный продукт, выполняющий следующее:

1. Территория разбивается на векторные прямоугольные сегменты размера 500×500 м.
2. Для каждого из сегментов вычисляется грид разности (ЦМР_{в.лс} – ArcticDEM или ЦМП_{в.лс} – ArcticDEM). Для каждого грида дельты считается статистика: среднее отклонение и стандартное отклонение, полученные числа записываются в таблицу атрибутов каждого сегмента. Ниже (на рис. 6–7) приведены визуализации пространственного распределения значений средних отклонений (для ЦМР_{в.лс} – ArcticDEM и ЦМП_{в.лс} – ArcticDEM соответственно).

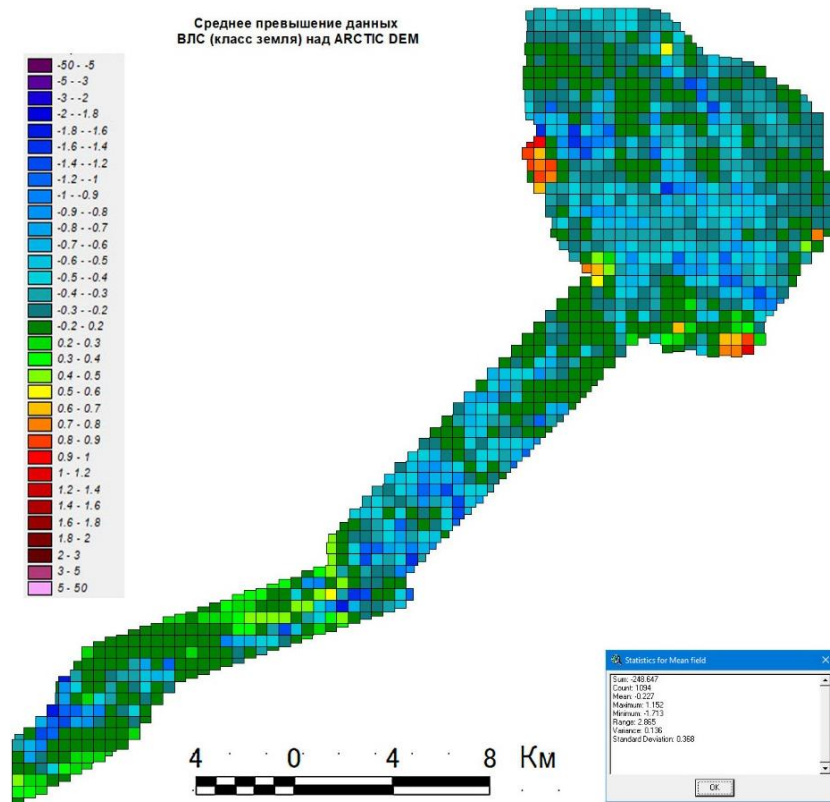


Рис. 6. Среднее отклонение грида дельт ЦМР_{в.лс} – ArcticDEM
Fig. 6. Average deviation of the DEM_{als} delta grid – ArcticDEM

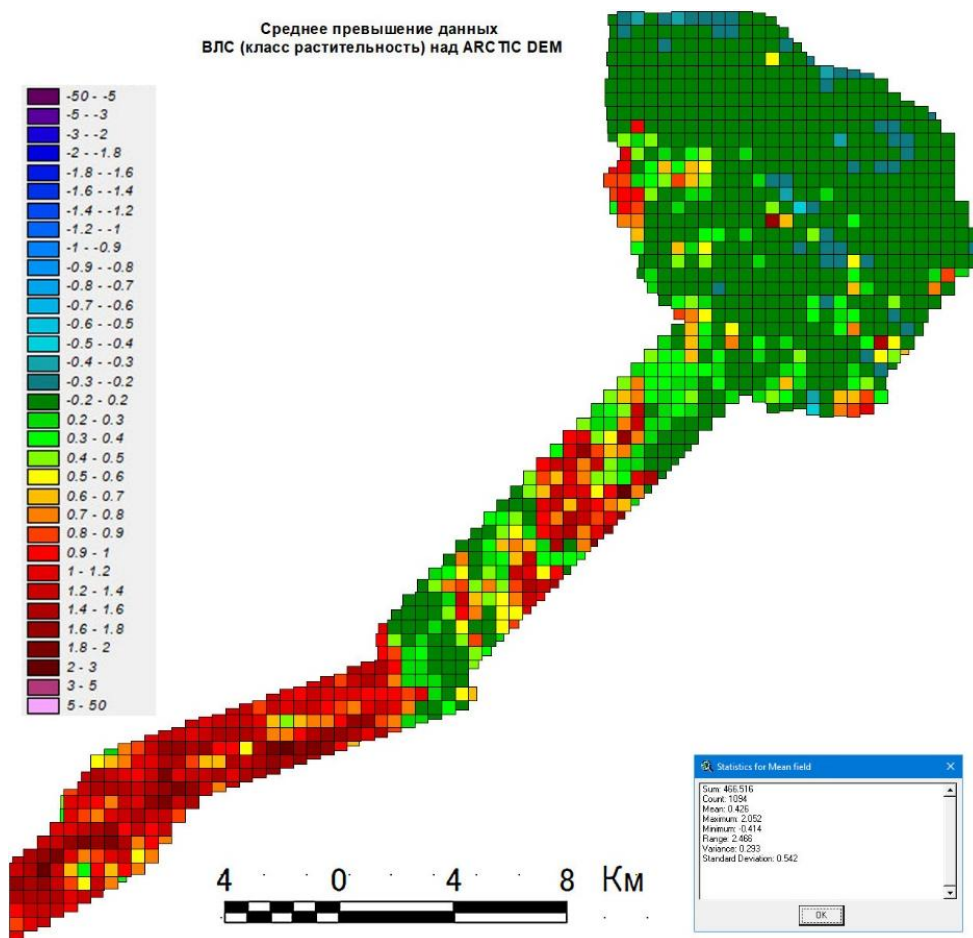


Рис. 7. Среднее отклонение грида дельта ЦМП_{влс} – ArcticDEM
 Fig. 7. Average deviation of the DSM_{als} delta grid – ArcticDEM

На рис. 6 хорошо видно, что ArcticDEM в среднем примерно соответствует, а на значительной части территории находится несколько выше, чем значения высот ЦМР_{влс}.

Напротив, на рис. 7 сразу же бросается в глаза значительная разница в высотах в юго-западной части полигона (где ArcticDEM существенно, на несколько метров ниже ЦМП_{влс}). Сравнив эти два изображения с картой относительных высот растительности (получена методом вычитания: ЦМП_{влс} – ЦМР_{влс}), мы можем уверенно утверждать, что причиной подобных отклонений является растительный покров, и величина отклонений полностью коррелирует с высотой растительного покрова.

Следует отметить, что результаты фильтрации растительности дают очень неплохие результаты, и если бы растительность не фильтровали вообще, то результаты различались бы гораздо больше, чем в среднем на 0,2 м (табл. 1). Можно утверждать, что по показателю «Среднее отклонение» ArcticDEM очень близок к ЦМР_{влс} и весьма далек от ЦМП_{влс}.

Аналогичным образом были проанализированы значения стандартных отклонений по каждому из сегментов. Ниже (на рис. 9–10) приведены визуализации пространственного распределения значений стандартных отклонений (для ЦМР_{влс} – ArcticDEM и ЦМП_{влс} – ArcticDEM соответственно). В целом также очевидно, что и по этому параметру ArcticDEM гораздо ближе к ЦМР_{влс}, нежели к ЦМП_{влс}. Можно уверенно утверждать, что примененная при создании ArcticDEM фильтрация растительности дала хорошие результаты по сравнению с простой, нефилтрованной моделью поверхности, получаемой по материалам стереомоделирования.

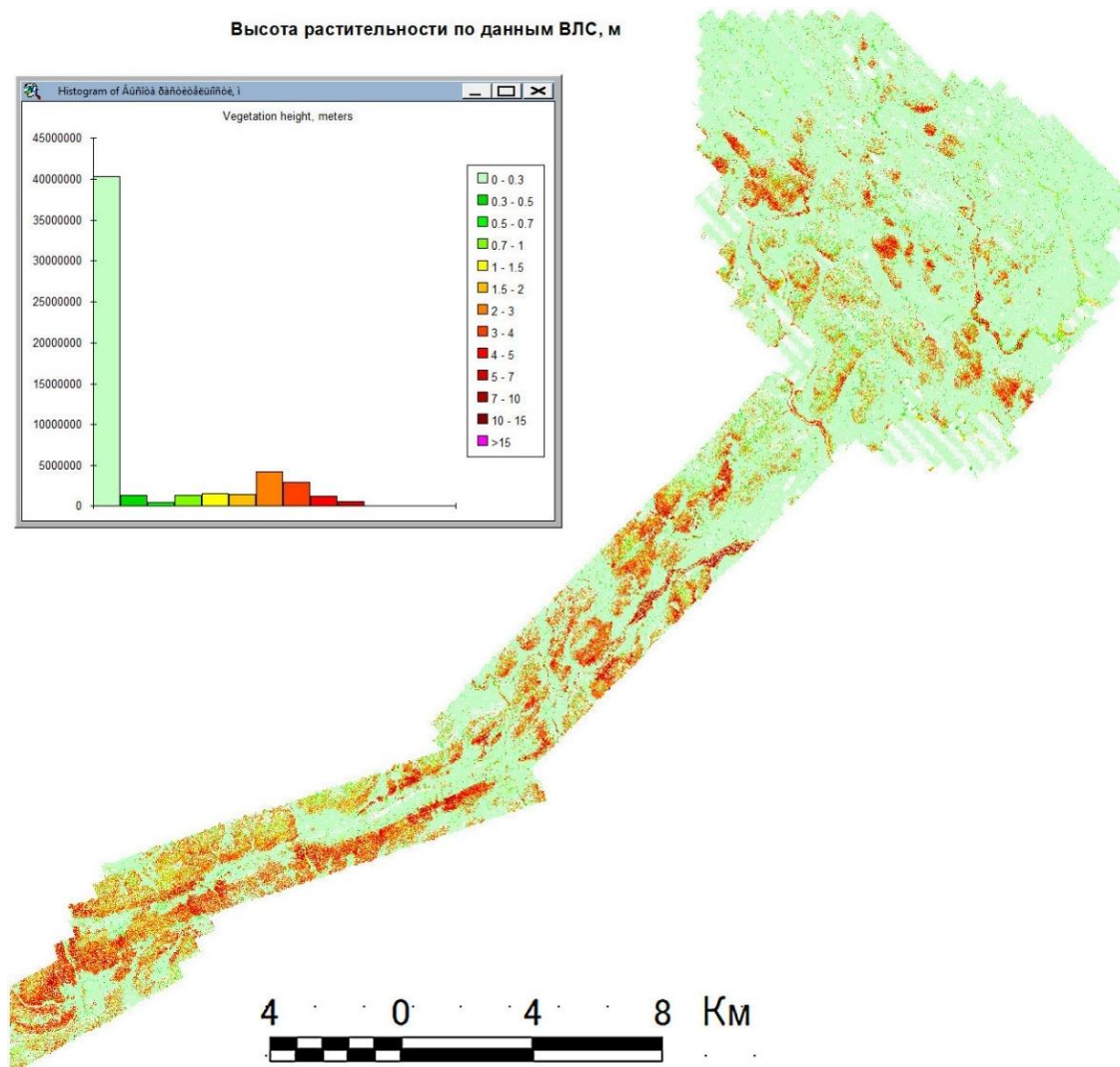


Рис. 8. Карта относительных высот растительности, составленная по разнице высот между ЦМП и ЦМР, полученным по данным ВЛС.

Высоты растительности даны в метрах

Fig. 8. Map of relative vegetation heights, compiled from the difference in heights between the DSM and the DEM obtained from the ALS data. Vegetation heights are given in meters

Этап 3. Оценка отклонений на водной поверхности

По результатам оцифровки водных объектов была создана маска для грида отклонений (рис. 11), для которой была посчитана статистика отклонений (рис. 12).

Как видим, среднее отклонение на поверхности озер близко к нулю, составляя около 0,15 м. Однако возможные отклонения в обе стороны доходят до 1 м, что не позволяет однозначно выделять озера и водные объекты по данным ArcticDEM. В данном случае налицо упоминавшаяся выше проблематика стереомоделирования при работе с объектами с однородной текстурой. Если для малых водных объектов причина появления этих отклонений понятна, то для более крупных озер (на которых, кстати, отклонения максимальны) создатели могли бы провести дешифрирование водных объектов и принудительно сделать их плоскими и равными по высоте берегам (допустим, присвоив участкам с открытой водой значения высот, равные средним значениям высот береговой линии, фигурирующим в этой же модели).

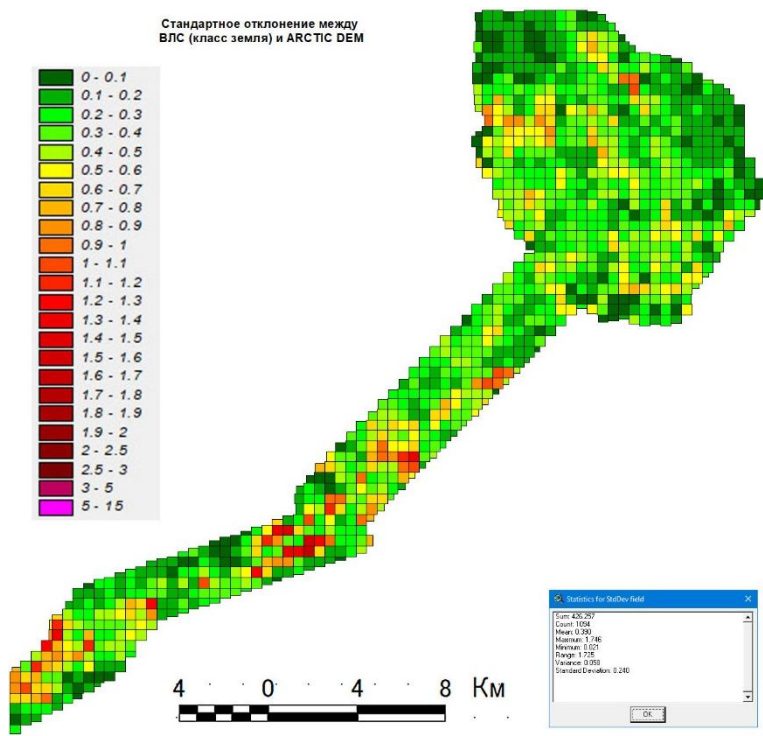


Рис. 9. Стандартное отклонение грида дельта ЦМП_{влс} – ArcticDEM
 Fig. 9. Standard deviation of the DSM_{als} delta grid – ArcticDEM

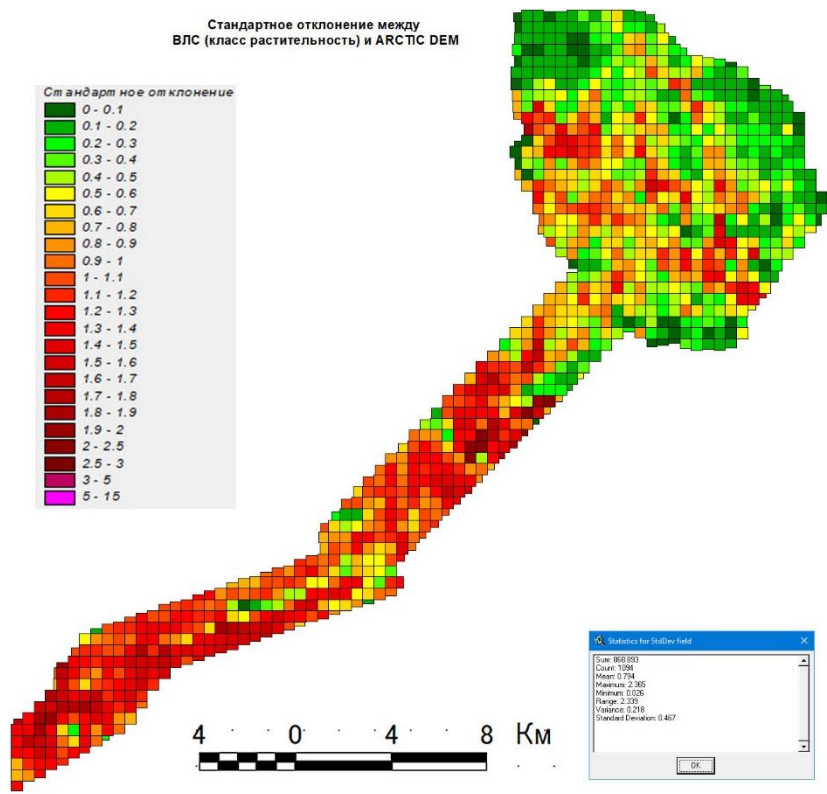


Рис. 10. Стандартное отклонение грида дельта ЦМП_{влс} – ArcticDEM
 Fig. 10. Standard deviation of the DSM_{als} delta grid – ArcticDEM

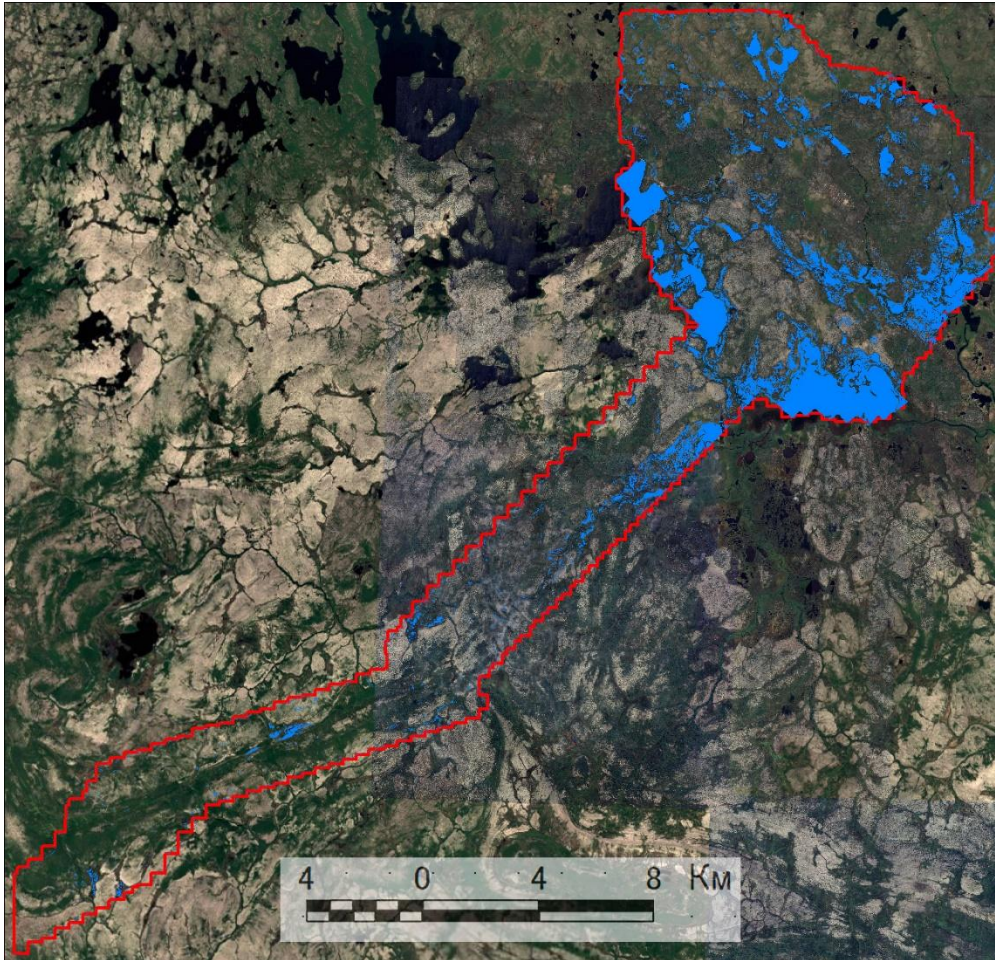


Рис. 11. Маска для грида отклонений, составленная по данным оцифровки контуров озер
 Fig. 11. Mask for the deviation grid, compiled from the data of digitized lake contours

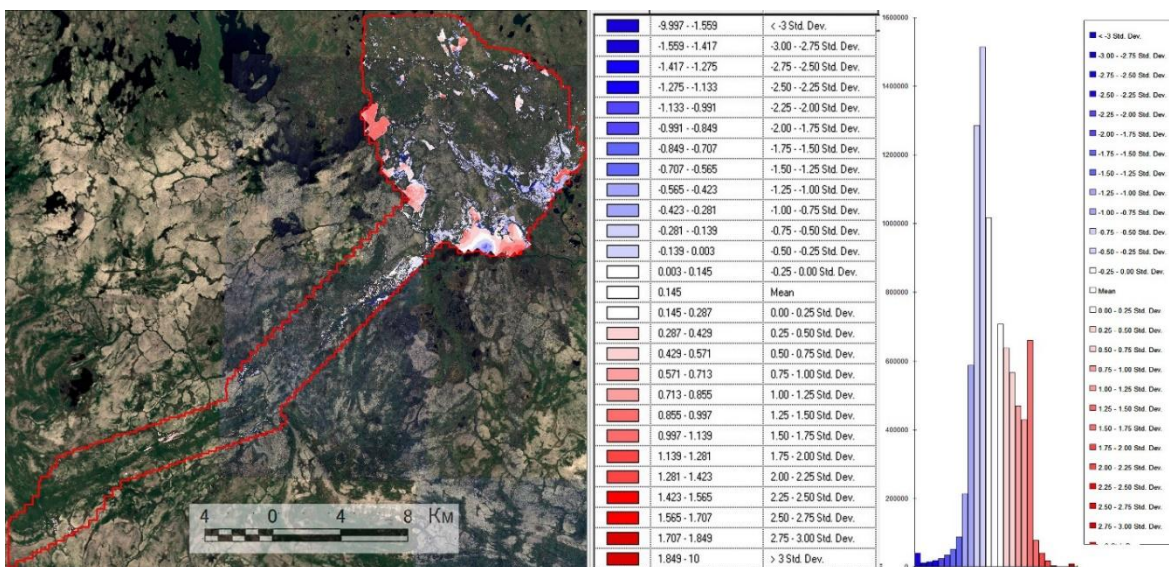


Рис. 12. Отклонения высот ArcticDEM от ЦМР_{всл} на водных объектах
 Fig. 12. Deviations of ArcticDEM heights from the DEM_{als} delta grid on water bodies

Этап 4. Оценка отклонений на суше

Для оценки отклонений на суше была построена модель расчлененности территории. Модель углов наклона строилась стандартным инструментарием ArcView. Модель расчлененности строилась с использованием фокального анализа [Bi, 2006]. Для скользящего окна с радиусом 5 м рассчитывался диапазон абсолютных высот, значение которого присваивалось центральной точке. Полученный грид был разделен на три класса:

- слаборасчлененные участки (разброс высот в радиусе 5 м менее 2 м по высоте);
- среднерасчлененные участки (разброс высот в радиусе 5 м 2–4 м по высоте);
- сильнорасчлененные участки (разброс высот в радиусе 5 м более 4 м по высоте).

Для каждого класса рассчитывалась статистика грида дельта ЦМР_{влс} – ArcticDEM.

Результаты представлены в табл. 2.

Нетрудно видеть, что с нарастанием расчлененности территории величина среднего и стандартного отклонения нарастают (первая величина — в 3 р., вторая — в 1,6 р.). Отметим, что в соответствии с предъявляемыми в отечественной картографии точностными требованиями, предельные погрешности итоговых данных должны укладываться в допуск в 90 % случаев, что соответствует не одному, а двум стандартным отклонениям. Из табл. 2 следует, что на слаборасчлененных участках (в т. ч. водных объектах) величина отклонений на уровне двух стандартных составляет 1,18 м по высоте (в каждую сторону). Учитывая, что на плоских слаборасчлененных участках отклонения в 90 % случаев не должны превышать 1/3 сечения рельефа, можно заключить, что по подобным данным приемлемо строить топографические картматериалы с шагом горизонталей не менее 3,5 м.

Согласно СНиП 11-02-96 «Инженерные изыскания в строительстве» для топопланов м-ба 1:5 000 в основном применяется сечение рельефа 2 м, а для 1:10 000 — 5 м. Как следует из табл. 2, ни в одном из вариантов расчлененности рельефа не выполняется требование достаточной точности для проведения горизонталей через 2 м и, следовательно, данные ArcticDEM не могут быть использованы для создания топопланов м-ба 1:5 000. В то же время, данные ArcticDEM удовлетворяют требованиям СНиП 11-02-96 в части топопланов м-ба 1:10 000 с сечением рельефа 5 м.

ВЫВОДЫ

ЦМР ArcticDEM обеспечивает возможность создания топографических планов м-ба 1:10 000 с сечением 5 м в условиях тундровых и лесотундровых слабовсхолмленных ландшафтов с развитыми локальными формами рельефа вне зависимости от уровня расчлененности. Требованиям по точности для м-ба 1:5 000 с сечением 2 м данная ЦМР не удовлетворяет.

Значения отклонений высот в пределах довольно крупной территории (260 км²) с различными ландшафтами находятся в пределах 1,2 м (2 стандартных отклонения).

ЦМР ArcticDEM имеет систематическую сдвигку (в данном случае, в среднем на 23 см выше ЦМР_{влс} (которая имеет на порядок большую точность)). Данная сдвигка может быть определена для других районов работ с использованием контрольных точек или более точных данных на ограниченных репрезентативных участках и учтена. Данный подход позволяет значительно повысить точность данных.

Точность ЦМР ArcticDEM значимо зависит от расчлененности рельефа, и может существенно (на десятки процентов) ухудшаться в сильно расчлененных ландшафтах. Вероятно, в горных ландшафтах погрешность ЦМР ArcticDEM может выйти за пределы допусков по точности топопланов м-ба 1:10 000.

ЦМР ArcticDEM имеет хорошую фильтрацию растительности в условиях растительных сообществ тундры и лесотундры и не является цифровой моделью видимой поверхности.

Табл. 2. Распределение территорий по степени расчлененности рельефа
 Table 2. Distribution of territories according to the degree of relief dissection

	Площадь, га	Доля от площади участка, %	Средняя разность высот, м (ЦМР _{вкс} – ArcticDEM)	1 сигма, м	2 сигма, м	Допустимый шаг горизонталей (погрешность в 1/3 сечения рельефа не более 2 сигма), м	Соответствие масштабу карты/плана (шаг горизонталей)
Слаборасчлененные и плоские участки (перепад высот в радиусе 10 м от каждой точки менее 2 м)	23 671	93,1	–0,2	0,59	1,18	3,5	1:10 000 (5 м)
Среднерасчлененные участки (перепад высот в радиусе 10 м от каждой точки 2–4 м)	1 605	6,3	–0,59	0,78	1,56	4,7	1:10 000 (5 м)
Сильнорасчлененные участки (перепад высот в радиусе 10 м от каждой точки более 4 м)	143	0,6	–0,61	1,01	2,02	6,1	1:10 000 (5 м)

Оценка заявлений производителей ArcticDEM в части погрешностей по высоте должна рассматриваться как вероятные значения 1 сигма (1 стандартное отклонение), но для практического картографирования нужно рассматривать не 1, а 2 сигмы. Заявленные производителем погрешности относятся к следующим уровням:

- на открытой местности: ~0,5–2 м (зависит от типа поверхности);
- в горных районах: до 3–5 м (из-за теней и сложного рельефа);
- на ледниках: ~1–3 м (из-за изменяющейся поверхности).

И, наконец, водоемы в ArcticDEM содержат значительные отклонения высот в пределах одного водного зеркала.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова по теме «Изучение динамики социоприродных систем с использованием геоинформационного картографирования и цифровых технологий» (№ 121051100163-3).

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out within the framework of the state assignment of Lomonosov Moscow State University on the topic “Studying the dynamics of socio-natural systems using geoinformation mapping and digital technologies” (No. 121051100163-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Капралов Е. Г., Кошкарев А. В., Тихунов В. С. Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. 480 с.

Руководство по аэрофотосъемочным работам. Министерство гражданской авиации, М.: 1986. 176 с.

Bi H. Digital Terrain Analysis Based on DEM. *Frontiers of Forestry in China*, 2006. V. 1. P. 54–58.

Chandler H. Terrain Measurement Using Automated Digital Photogrammetry. *Engineering Geology Special Publications*, 2001. V. 18. P. 13–18. DOI: 10.1144/GSL.ENG.2001.018.01.0.

Chen Q. Airborne Lidar Data Processing and Information Extraction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007. V. 73. No. 2. P. 109–112.

Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L. A Method for Optimizing Height Threshold When Computing Airborne Laser Scanning Metrics. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2017. V. 83. No. 5. P. 343–350. DOI: 10.14358/PERS.83.5.343.

Lohr U. Digital Elevation Models by Laser Scanning: Principle and Applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

Morin P., Porter C., Cloutier M., Howat I., Noh M.-J., Willis M., Bates B., Williamson C., Peterman K. ArcticDEM; A Publically Available, High Resolution Elevation Model of the Arctic. EPSC2016-8396, 2016.

Mukul M., Mukul M., Srivastava V., Jade S. Uncertainties in the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. *Scientific Reports*, 2017. V. 7. P. 41672. DOI: 10.1038/srep41672.

Porter C. et al. ArcticDEM — Strips, Version 4.1. Harvard Dataverse, 2022. DOI: 10.7910/DV/N/C98DVS.

REFERENCES

- Aerial Photography Guide. Moscow: Ministry of Civil Aviation, 1986. 176 p. (in Russian).
- Bi H.* Digital Terrain Analysis Based on DEM. *Frontiers of Forestry in China*, 2006. V. 1. P. 54–58.
- Chandler H.* Terrain Measurement Using Automated Digital Photogrammetry. *Engineering Geology Special Publications*, 2001. V. 18. P. 13–18. DOI: 10.1144/GSL.ENG.2001.018.01.0.
- Chen Q.* Airborne Lidar Data Processing and Information Extraction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007. V. 73. No. 2. P. 109–112.
- Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L.* A Method for Optimizing Height Threshold When Computing Airborne Laser Scanning Metrics. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2017. V. 83. No. 5. P. 343–350. DOI: 10.14358/PERS.83.5.343.
- Kapralov E. G., Koshkariov A. V., Tikunov V. S.* Fundamentals of Geoinformatics. Moscow: Academia, 2004. 480 p. (in Russian).
- Lohr U.* Digital Elevation Models by Laser Scanning: Principle and Applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.
- Morin P., Porter C., Cloutier M., Howat I., Noh M.-J., Willis M., Bates B., Williamson C., Peterman K.* ArcticDEM; A Publically Available, High Resolution Elevation Model of the Arctic. EPSC2016-8396, 2016.
- Mukul M., Mukul M., Srivastava V., Jade S.* Uncertainties in the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. *Scientific Reports*, 2017. V. 7. P. 41672. DOI: 10.1038/srep41672.
- Porter C. et al.* ArcticDEM — Strips, Version 4.1. Harvard Dataverse, 2022. DOI: 10.7910/DV N/C98DVS.
-