

## Надёжность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований

А. Л. Минеев<sup>1</sup>, Е. В. Полякова<sup>1</sup>, Ю. Г. Кутинов<sup>1,2</sup>, З. Б. Чистова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаврова РАН, Архангельск, 163000, Россия  
E-mail: lepro26@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Центр космического мониторинга Арктики Северного (Арктического) федерального университета, Архангельск, 163002, Россия  
E-mail: kutinov@fciactic.ru*

Информация о форме поверхности Земли востребована при решении многих геоэкологических задач и традиционно представляется в виде карт (горизонталей, изогипс, изобат и т. п.). В настоящее время основным способом представления формы земной поверхности является цифровая модель рельефа (ЦМР). По мере развития компьютерных и аэрокосмических технологий цифровое моделирование рельефа оформилось в самостоятельную научную дисциплину — геоморфометрию, предметом которой является количественное моделирование и анализ рельефа земной поверхности, а также взаимосвязей между рельефом и другими естественными и антропогенными компонентами геосистем. Ранее авторами была построена цифровая модель рельефа на территорию Архангельской области на основе ASTER GDEM v.2, проведена её подготовка и коррекция в программной среде SAGA GIS. В данной статье приводится анализ пригодности построенной ЦМР для проведения на её основе геоэкологических исследований. Точность (надёжность) построенной ЦМР проверена сопоставлением с точками плановой съёмочной сети открытых векторных данных ГИС «Панорама»; ЦМР Беломорско-Кулойского плато, построенной с использованием топографических карт масштаба 1:200 000 в ПО ГИС GRASS; проведёнными полевыми замерами высот с помощью GPS-навигатора. Установлено, что лишь 2 % значений имеют расхождение свыше 20 м. Эти остаточные значения приходятся на территорию, где в исходном виде отсутствовали данные ASTER GDEM v.2. В целом построенная ЦМР является точной (надёжной) и пригодной для дальнейшего геоморфометрического анализа с целью получения геоэкологически значимой информации.

**Ключевые слова:** цифровая модель рельефа, ASTER GDEM v.2, Архангельская область, SAGA GIS

Одобрена к печати: 10.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67

### Введение

Рельеф является одним из основных факторов, определяющих ход и направленность процессов, протекающих в приповерхностном слое планеты (Huggett, Cheesman, 2002). Большинство эколого-геохимических процессов зависит от поступления в каждую точку пространства влаги и солнечной энергии, их распределение регулируется углами наклона и экспозицией склонов. Направление распространения загрязнений, пути миграции вещества, зоны его возможного накопления и смыва определяют типы морфоэлементов рельефа. Вместе с тем, будучи результатом взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов, рельеф выступает индикатором геологического строения территории (Кутинов, 2005; Уфимцев, 1984; Флоринский, 2010 и др.). В этой связи информация о рельефе широко применяется в науках о Земле, инженерных изысканиях, проектировании и строительстве.

Вплоть до 90-х гг. прошлого века основным источником количественной информации о рельефе являлись топографические карты, при анализе которых использовался методический аппарат морфометрии рельефа (Волков, 1950; Симонов, 1998; Ченцов, 1948; Mark, 1975; Strahler, 1956 и др.). В середине 1950-х гг. в фотограмметрии возникло новое направление — цифровое моделирование рельефа (ЦМР), первой областью применения которого стало строительство линейных сооружений (Коновалов, 1974) и проектирование дорог (Miller,

Leflamme, 1958). По мере развития компьютерных и аэрокосмических технологий цифровое моделирование рельефа оформилось в самостоятельную научную дисциплину — геоморфометрию, предметом которой является количественное моделирование и анализ рельефа земной поверхности, а также взаимосвязей между рельефом и другими естественными и антропогенными компонентами геосистем (Geomorphometry..., 2009). Усложнение задач научных и практических исследований, необходимость снижения уровня их субъективности определили переход от традиционных морфометрических методов к цифровому моделированию рельефа (Флоринский, 2010).

В работе (Dawod, Al-Ghamdi, 2017) отмечается, что надёжность любой ЦМР должна быть проверена сопоставлением с известными наземными контрольными точками с измеренными точными координатами и точными значениями высот.

## Материалы и методика работ

Ранее авторами была построена цифровая модель рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM v.2 в программной среде SAGA GIS. ASTER GDEM v.2 является совместным продуктом METI (Япония) и NASA (США). Размер ячейки сетки —  $1 \times 1$  угл. с ( $\sim 30 \times 30$  м), абсолютная точность по высоте — 12–30 м (в зависимости от территории). В исходном виде содержит пустоты и артефакты, требует подготовки. Подготовка включала в себя ряд этапов: 1) извлечение и объединение данных; 2) обнаружение и замена аномальных значений высотных отметок и «пустот» (экстремальные выбросы обнаруживались методом абсолютного медианного отклонения, отсутствующие данные и «пустоты» заполнялись данными GMTED2010 с искусственным уменьшением размера ячейки до 1 угл. с); 3) устранение шероховатостей, шума и ошибок, возникающих при наложении снимков с использованием модуля DTM Filter; 4) заполнение бессточных впадин (гидрологическая коррекция) с применением метода (Wang, Liu, 2006). Подробно методика построения модели изложена в работе (Минеев и др., 2015а, б).

Для проверки точности (надёжности) построенной ЦМР Архангельской области было проведено сопоставление с точками плановой съёмочной сети открытых векторных данных ГИС «Панорама»; с цифровой моделью рельефа Беломорско-Кулойского плато, построенной с использованием топографических карт масштаба 1:200 000 в ПО ГИС GRASS (Гофаров и др., 2006); а также с проведёнными полевыми замерами высот с помощью GPS-навигатора (Garmin Oregon 450, точность позиционирования 3 м) на территории возвышенности (Шуй-горы) Ветреного кряжа.

Данные ГИС «Панорама» на Архангельскую область включают в себя около 770 векторных слоёв (каждый из которых соответствует номенклатурному листу топокарты), распространяются в формате SXF. Программное обеспечение (ПО) SAGA GIS не позволяет напрямую считывать данные формата SXF, поэтому для конвертации данных ГИС «Панорама» в формат SHAPE была применена ГИС QuantumGIS. В результате были получены векторные слои формата SHAPE, содержащие точечные объекты с координатами и значениями высот. В качестве геодезической основы в плановом отношении выступали пункты государственной геодезической сети (точность 0,1 мм), в высотном отношении — пункты государственной нивелирной сети (точность 0,8 мм). Полученные слои были импортированы и «сшиты» средствами ПО SAGA GIS. Всего было извлечено 69 048 точечных объектов, из которых 62 548 объектов располагается в пределах Архангельской области.

## Результаты работ и обсуждения

Под цифровой моделью какого-либо геометрического (географического) объекта понимается определённая форма представления исходных данных и способ их структурного описания, позволяющий «вычислять» (восстанавливать) объект путём интерполяции, аппроксимации или экстраполяции. Известно, что термин «цифровые модели» — это перевод с английского digital

model. В болгарской научной литературе, например, используется термин «численная модель рельефа», что удачно передаёт смысл, хотя и вызывает определённые ассоциации с некоторыми терминами прикладной математики: численный анализ, численные методы и т. д. Как бы то ни было, термин «цифровые модели» прочно утвердился в научном языке (Новаковский и др., 2003). Цифровые модели местности представляют собой точные данные о высоте земной поверхности, включая здания, растительность и другие высотные объекты (рис. 1). Цифровые модели рельефа содержат информацию о высоте непосредственно поверхности Земли, исключая все здания, растительность и т. д. (Расширение возможностей..., 2012).

В данном исследовании для удобства восприятия авторами используется понятие «цифровой модели рельефа». Это объясняется тем, что территория Архангельской области (площадь без островов 587 400 км<sup>2</sup>) покрыта практически сплошным растительным покровом (лесистость области составляет 77,7 %), характеризуется крайне низкой заселённостью и отсутствием высотных построек в городах и населённых пунктах. Средняя высота лесного покрова составляет 10–12 м, что соответствует точности исходной модели по высоте. Таким образом, в данном случае можно не вводить в расчёты поправки на влияние растительности и городские строения, не теряя качества полученной модели.

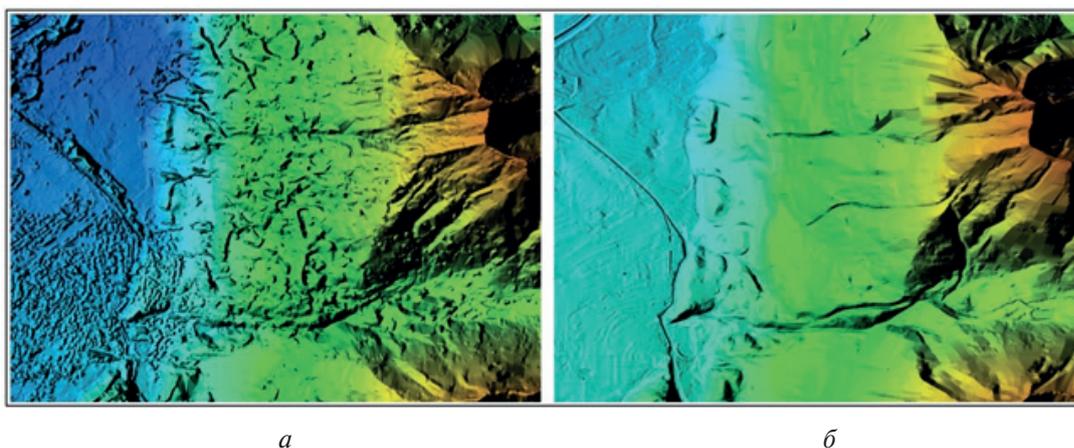


Рис. 1. Цифровые модели местности (а) и рельефа (б)

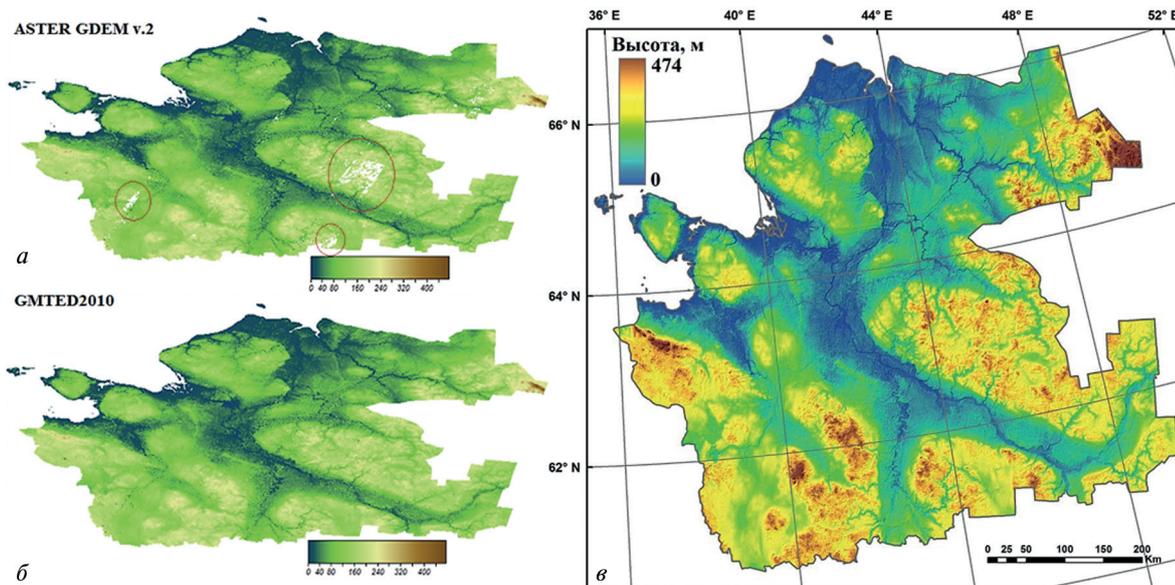


Рис. 2. Исходная модель ASTER GDEM v.2 с пустотами (а), модель GMTED2010 (б) и построенная ЦМР Архангельской области (в)

На *рис. 2* (см. с. 60) отображены исходная и построенная цифровые модели на территорию Архангельской области. На *рис. 3а* показано распределение точечных объектов, извлечённых из ГИС «Панорама» в пределах Архангельской области. На их основе произведён подсчёт разности значений высот между отметками с оцифрованных топокарт ГИС «Панорама» и данными цифровой модели рельефа Архангельской области (*рис. 3б, табл. 1*). Из *табл. 1* видно, что абсолютная разность большинства высотных отметок (74 %) не превышает 10 м, 24 % отметок укладываются в интервале от 11 до 20 м и лишь 2 % значений имеют расхождение свыше 20 м. Эти остаточные значения приходятся на территорию, где в исходном виде отсутствовали данные ASTER GDEM v.2 и пустоты заполнялись данными GMTED2010 (см. *рис. 2*).

Таблица 1. Абсолютные разности значений высот между данными с ГИС «Панорама» и ЦМР Архангельской области

Абсолютная разность по высоте, м	Количество высотных отметок	Доля, %
0–10	46541	74,4085
11–20	14615	23,3661
21–30	1226	1,9601
31–40	101	0,1615
41–50	33	0,0528
51–60	19	0,0304
61–70	6	0,0096
71–80	3	0,0048
100–130	4	0,0064
Среднее арифметическое разности	7,45 м	
Стандартное отклонение	5,62 м	
Максимальная разность	126,71 м (1 высотная отметка)	
Минимальная разность	0 м	

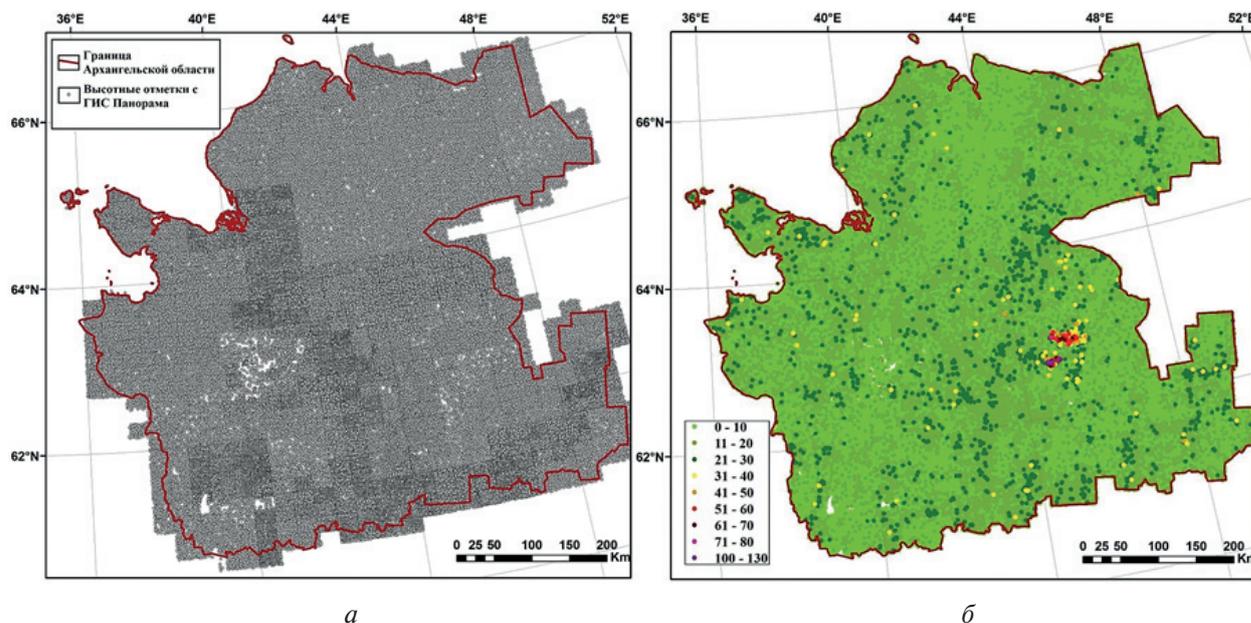


Рис. 3. Разности значений высоты между высотными отметками, извлечёнными из ГИС «Панорама» (а) и данными ЦМР Архангельской области (б)

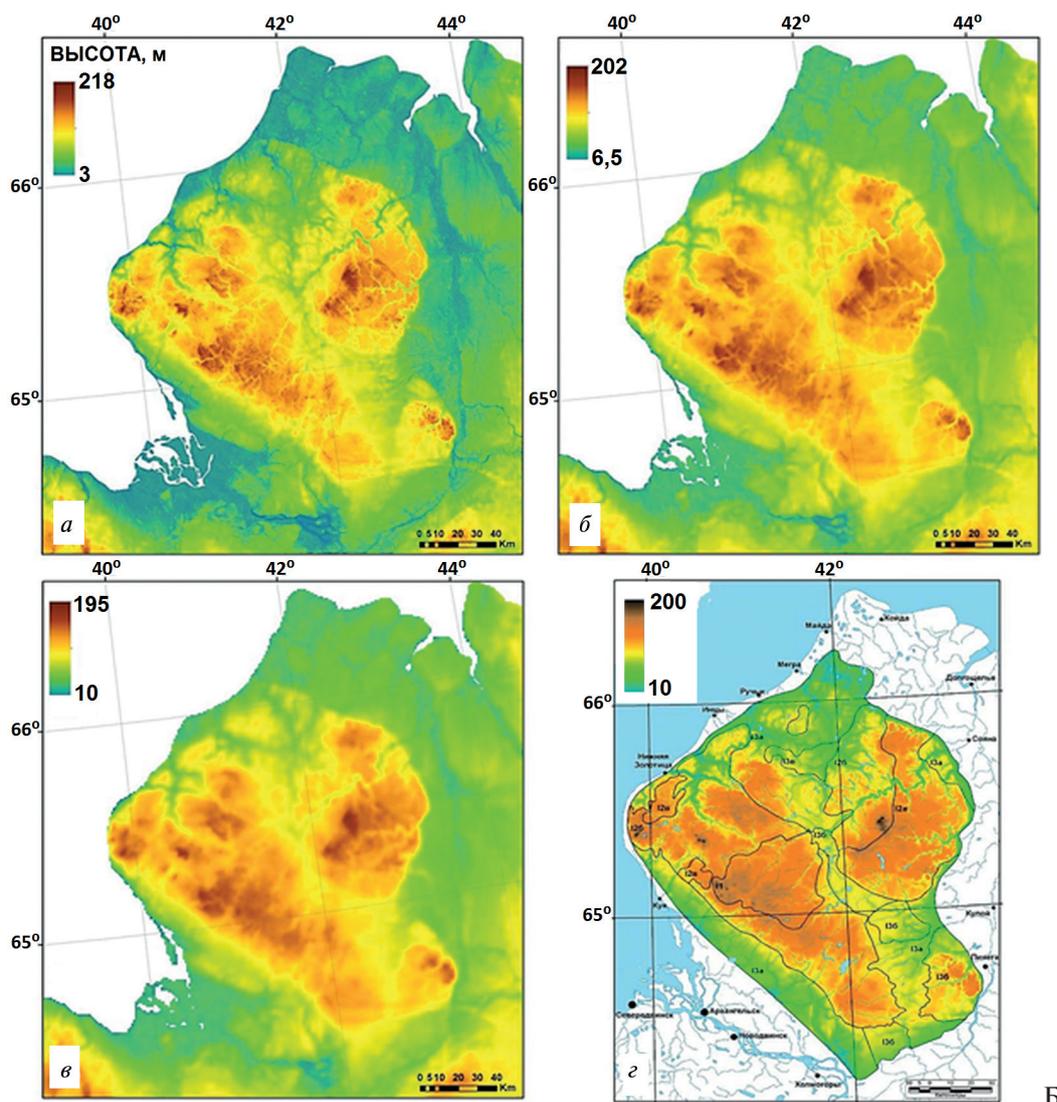


Рис. 4. Сопоставление построенной ЦМР с моделью рельефа Беломорско-Кулойского плато по работе (Минеев и др., 2015а): а — 30×30 м (исходная модель); б — 480×480 м; в — 960×960 м; г — модель рельефа БКП (20×20 м)

Далее проводилось сопоставление полученной модели с ЦМР Беломорско-Кулойского плато, построенной с использованием топографических карт масштаба 1:200 000 в ПО GRASS GIS и применением интерполирования сплайн-функцией (Гофаров и др., 2006). Вначале была выполнена процедура сглаживания контуров различными окнами фильтрации — 480×480 м (15 угл. с, ~500×500 м), 960×960 м (30 угл. с, ~1000×1000 м), поскольку исходная модель (30×30 м) характеризуется доминированием локальной составляющей, что затрудняет её сопоставление с другими моделями (рис. 4).

Сопоставление моделей показало, что, несмотря на снижение значений высот с увеличением окна осреднения, подготовленная ЦМР является более точной, чем модель, созданная на основе топокарт. Это связано с тем, что для устранения артефактов в модели Беломорско-Кулойского плато была проведена процедура сглаживания сплайн-функцией (Гофаров и др., 2006), в то время как трансформации окнами являются более «щадящей» процедурой, сохраняя детальные особенности рельефа.

На последнем этапе верификации построенной модели были проведены полевые замеры высот с помощью GPS-навигатора на территории возвышенности (Шуйгоры) Ветреного кряжа. Результаты приведены на рис. 5 (в качестве «подложки» использовался снимок Landsat-8 от 19.08.2017) и в табл. 2.

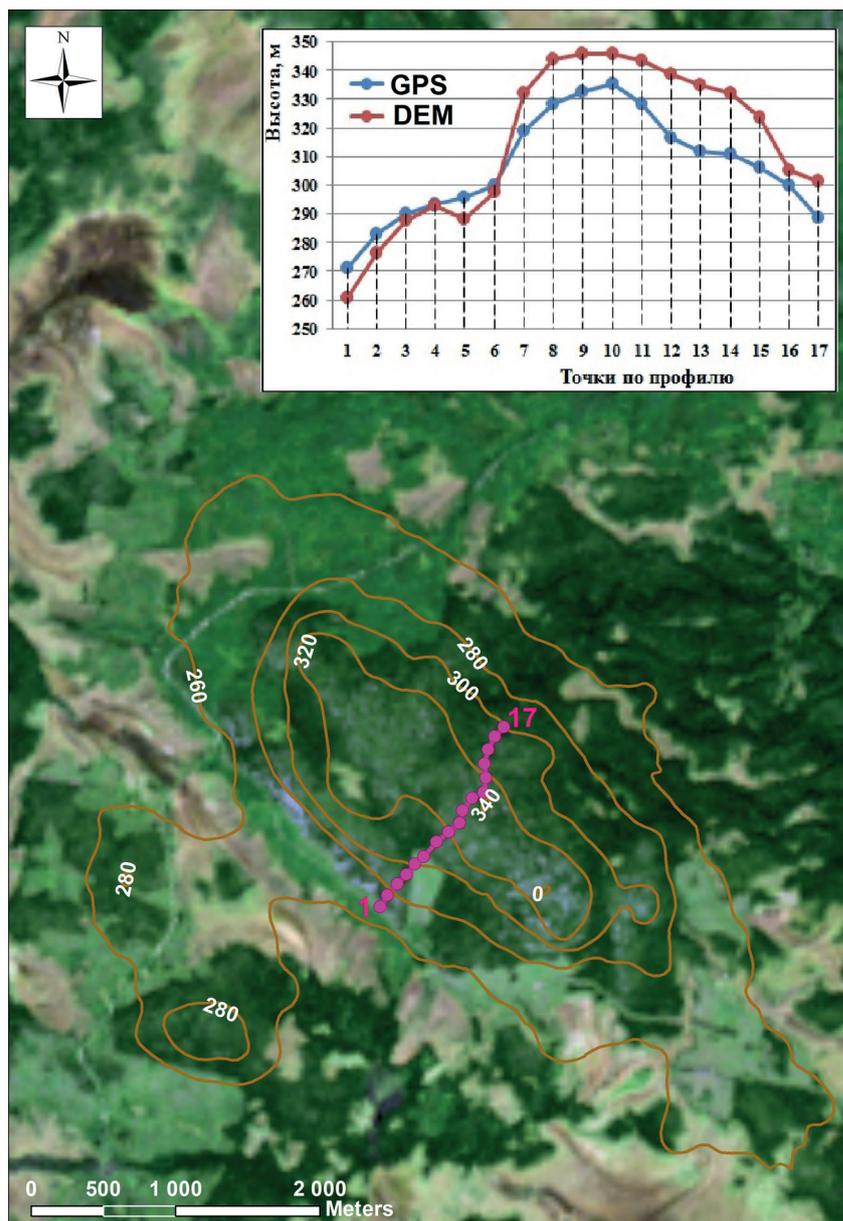


Рис. 5. Полевые замеры и разница высот (график) по GPS-навигатору и построенной ЦМР

Таблица 2. Данные GPS-замеров и значений высот на построенной ЦМР

Точки по профилю	Значения высот, м		Абсолютная разница значений, м
	GPS	DEM	
1	271,23	260,57	10,66
2	282,77	276,25	6,52
3	289,97	287,64	2,33
4	293,34	293,07	0,27
5	295,74	288,17	7,57
6	300,07	297,75	2,32
7	318,81	332,22	13,41
8	328,43	344,17	15,74
9	332,75	345,95	13,20

Точки по профилю	Значения высот, м		Абсолютная разница значений, м
	GPS	DEM	
10	335,64	346,00	10,36
11	328,43	343,49	15,06
12	316,41	338,64	22,23
13	311,60	335,18	23,58
14	310,64	331,94	21,30
15	306,32	323,65	17,33
16	300,07	305,19	5,12
17	288,53	301,34	12,81
Минимальное значение абсолютной разницы			<b>0,27</b>
Максимальное значение абсолютной разницы			<b>23,58</b>
Среднее значение абсолютной разницы			<b>11,75</b>

## Выводы

В результате можно сделать следующие выводы:

1. При сопоставлении высот построенной модели с точками плановой съёмочной сети открытых векторных данных ГИС «Панорама» выявлено, что лишь 2 % значений имеют расхождение свыше 20 м. Это остаточные значения, приходящиеся на территорию, где в исходном виде отсутствовали данные ASTER GDEM v.2, а пустоты заполнялись данными GMTED2010, имеющей гораздо более низкое разрешение.
2. Сопоставление с ЦМР Беломорско-Кулойского плато, созданной с использованием топокарт, показало, что построенная модель обладает большей точностью, поскольку метод трансформации окнами является более «щадящей» процедурой, нежели применение сглаживания сплайн-функцией.
3. Сравнение высот по GPS-навигатору также показало, что разницы в значениях укладываются в диапазон от 0 до 20 м, что соотносится с пространственным разрешением исходной модели (~30 м) и точностью по высоте (12–30 м).

Таким образом, можно утверждать, что построенная ЦМР Архангельской области является точной (надёжной) и может выступать в качестве универсальной основы для проведения геоэкологических исследований в силу доступности исходного материала, объективности и территориального охвата. Для труднодоступных северных территорий цифровое моделирование является одним из определяющих способов проведения анализа состояния геологической среды.

Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА РАН (№ гос. регистрации АААА-А18-118012390305-7).

## Литература

1. Волков Н. М. Принципы и методы картометрии. М.: Изд-во АН СССР, 1950. 327 с.
2. Гофаров М. Ю., Болотов И. Н., Кутинов Ю. Г. Ландшафты Беломорско-Кулойского плато: Тектоника, подстилающие породы, рельеф и растительный покров. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 158 с.
3. Коновалов Н. Е. Цифровое моделирование топографических условий местности для проектирования линейных сооружений // Тр. ГипродорНИИ. 1974. Вып. 8. С. 21–33.
4. Кутинов Ю. Г. Экогеодинамика Арктического сегмента земной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 388 с.

5. Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. (2015а) Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // *Пространство и Время*. 2015. № 3(21). С. 278–291. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271provgt\_st3-21.2015.83.
6. Минеев А.Л., Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. (2015б) Методические аспекты создания цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM V.2 // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 2. URL: [www.science-education.ru/129-21949](http://www.science-education.ru/129-21949).
7. Новаковский Б.А., Прасолов С.В., Прасолова А.И. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей. М.: Науч. мир, 2003. 64 с.
8. Расширение возможностей национального картографирования на основе усовершенствованных серий Advanced Elevation компании DigitalGlobe / пер. с англ. Д. О. Мордовиной и Е. Н. Горбачевой // *Геоматика*. 2012. № 4. С. 37–39.
9. Симонов Ю.Г. Морфометрический анализ рельефа. Смоленск: Изд-во Смоленского гуманитарного ун-та, 1998. 271 с.
10. Уфимцев Г.Ф. Тектонический анализ рельефа (на примере Востока СССР). Новосибирск: Наука, 1984. 183 с.
11. Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа: дис. ... д-ра техн. наук. Пушино, 2010. 267 с.
12. Ченцов В.Н. Морфометрические показатели на геоморфологической карте мелкого масштаба // *Тр. Ин-та географии*, 1948. Вып. 39. С. 291–306.
13. Dawod G., Al-Ghamdi K. Reliability of Recent Global Digital Elevation Models for Geomatics Applications in Egypt and Saudi Arabia // *J. Geographic Information System*. 2017. V. 9. P. 685–698. URL: <https://doi.org/10.4236/jgis.2017.96043>.
14. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications* / eds. Hengl T., Reuter H.I. Amsterdam: Elsevier, 2009. 796 p.
15. Huggett R.J., Cheesman J. *Topography and the Environment*. Harlow: Pearson Education, 2002. 274 p.
16. Mark D.M. Geomorphometric parameters: a review and evaluation // *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*. 1975. V. 57(3–4). P. 165–177.
17. Miller C.L., Leflamme R.A. The digital terrain model — theory and application // *Photogrammetric Engineering*. 1958. V. 24(3). P. 433–442.
18. Strahler A.N. Quantitative slope analysis // *Geological Society of America Bull.* 1956. V. 67(5). P. 571–596.
19. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // *Intern. J. Geographical Information Science*. 2006. V. 20(2). P. 193–213. URL: <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>.

## The reliability of a digital elevation model of the Arkhangelsk Region for geocological research

A. L. Mineev<sup>1</sup>, E. V. Polyakova<sup>1</sup>, Yu. G. Kutinov<sup>1,2</sup>, Z. B. Chistova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Federal Center for Integrated Arctic Research RAS, Arkhangelsk 163000, Russia  
E-mail: lenpo26@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Space Monitoring Center of the Arctic NARFU, Arkhangelsk 163002, Russia  
E-mail: kutinov@fciarctic.ru*

Information on the shape of the Earth's surface is in demand when solving many geocological problems and is traditionally represented in the form of maps (contour lines, isohypses, isobaths, etc.). At present, the main way to represent the shape of the earth's surface is the digital elevation model (DEM). With the development of computer and aerospace technologies, digital modeling of the relief has become an independent scientific discipline — geomorphometry, the subject of which is quantitative modeling and analysis of the relief of the earth's surface, as well as the interrelations between the relief and other natural and anthropogenic components of geosystems. Earlier the authors have constructed a digital model of the relief on the territory of the Arkhangelsk region on the basis of ASTER

GDEM v.2, its preparation and correction in the SAGA GIS software environment. This article analyzes the suitability of the constructed DEM for carrying out geocological studies based on it. The accuracy (reliability) of the constructed DEM is verified by comparison with the points of the planned survey network of open vector GIS data Panorama; DEM of the Belomorsko-Kuloyskoe plateau constructed with the use of topographic maps of scale 1:200 000 in GIS GRASS software; by field measurements of heights carried out with the use of a GPS-navigator. It has been established that only 2 % of the values have a discrepancy of more than 20 m. These residual values fall on the territory where ASTER GDEM v.2 has been absent in the original form. In general, the DEM constructed is accurate (reliable) and suitable for further geomorphometric analysis aiming to obtain geocologically significant information.

**Keywords:** digital elevation model, ASTER GDEM v.2, Arkhangelsk region, SAGA GIS

Accepted: 10.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67

## References

1. Volkov N. M., *Printsipy i metody kartometrii* (Principles and methods of cartometry), Moscow: Izd. AN SSSR, 1950, 327 p.
2. Gofarov M. Yu., Bolotov I. N., Kutinov Yu. G., *Landshafty Belomorsko-Kuloiskogo plato: Tektonika, podstilyushchie porody, rel'ef i rastitel'nyi pokrov* (Landscapes of the Belomorsko-Kuloiskogo plateau: Tectonics, bedrock, topography and vegetation cover), Ekaterinburg: UrO RAN, 2006, 158 p.
3. Konovalov N. E., Tsifrovoe modelirovanie topograficheskikh uslovii mestnosti dlya proektirovaniya lineinykh sooruzhenii (Digital modeling of topographic conditions of the terrain for the design of linear structures), *Tr. GiprodorNII*, 1974, Vol. 8, pp. 21–33.
4. Kutinov Yu. G. *Ekogeodinamika Arkticheskogo segmenta zemnoi kory* (Ecogeodynamics of the Arctic Segment of the Earth's Crust), Ekaterinburg: UrO RAN, 2005, 388 p.
5. Mineev A. L., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Polyakova E. V., Podgotovka tsifrovoy modeli rel'efa dlya issledovaniya ekzogennykh protsessov severnykh territorii Rossiiskoi Federatsii (Preparation of a digital elevation model for the study of exogenous processes in the northern territories of the Russian Federation), *Prostranstvo i Vremya*, 2015, No. 3(21), pp. 278–291, fixed network address 2226-7271provr\_st3-21.2015.83.
6. Mineev A. L., Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Metodicheskie aspekty sozdaniya tsifrovoy modeli rel'efa Arkhangel'skoi oblasti na osnove ASTER GDEM V.2 (Methodical aspects of creating a digital elevation model of the Arkhangelsk region based on ASTER GDEM V.2), *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, No. 2, URL: [www.science-education.ru/129-21949](http://www.science-education.ru/129-21949).
7. Novakovskii B. A., Prasolov S. V., Prasolova A. I., *Tsifrovye modeli rel'efa real'nykh i abstraktnykh geopolei* (Digital elevation models of real and abstract geofields), Moscow: Nauchnyi mir, 2003, 64 p.
8. Rasshirenie vozmozhnostei natsional'nogo kartografirovaniya na osnove usovershenstvovannykh serii Advanced Elevation kompanii DigitalGlobe (Expanding national mapping capabilities through Digital Elevation Advanced Elevation), Russian translation by D. O. Mordovina, E. N. Gorbacheva, *Geomatika*, 2012, No. 4, pp. 37–39.
9. Simonov Yu. G., *Morfometricheskii analiz rel'efa* (Morphometric analysis of the relief), Smolensk: Izd. Smolenskogo gumanitarnogo universiteta, 1998, 271 p.
10. Ufimtsev G. F., *Tektonicheskii analiz rel'efa (na primere Vostoka SSSR)* (Tectonic analysis of the relief (on the example of the East of the USSR)), Novosibirsk: Nauka, 1984, 183 p.
11. Florinskii I. V., *Teoriya i prilozheniya matematiko-kartograficheskogo modelirovaniya rel'efa: Diss. dokt. tekhn. nauk* (Theory and applications of mathematical and cartographic modeling of relief: Dr. techn. sci. thesis), Pushchino, 2010, 267 p.
12. Chentsov V. N., Morfometricheskie pokazateli na geomorfologicheskoi karte melkogo masshtaba (Morphometric indicators on a small-scale geomorphological map), *Trudy Instituta geografii*, 1948, Vol. 39, pp. 291–306
13. Dawod G., Al-Ghamdi K., Reliability of Recent Global Digital Elevation Models for Geomatics Applications in Egypt and Saudi Arabia, *J. Geographic Information System*, 2017, Vol. 9, pp. 685–698, URL: <https://doi.org/10.4236/jgis.2017.96043>.
14. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*, Hengl T., Reuter H. I. (Eds.), Amsterdam: Elsevier, 2009, 796 p.

15. Huggett R. J., Cheesman J., *Topography and the Environment*, Harlow: Pearson Education, 2002, 274 p.
16. Mark D. M., Geomorphometric parameters: a review and evaluation, *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 1975, Vol. 57(3–4), pp. 165–177.
17. Miller C. L., Leflamme R. A., The digital terrain model — theory and application, *Photogramm. Eng.*, 1958, Vol. 24(3), pp. 433–442.
18. Strahler A. N., Quantitative slope analysis, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1956, Vol. 67(5), pp. 571–596.
19. Wang L., Liu H., An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling, *Intern. J. Geographical Information Science*, 2006, Vol. 20(2), pp. 193–213, URL: <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>.