Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России

Е. В. Полякова, Ю. Г. Кутинов, А. Л. Минеев, З. Б. Чистова

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. Н. П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, 163000, Россия
E-mail: lenpo26@yandex.ru*

Материалы различных космических съёмок с искусственных спутников Земли широко применяются в мировой практике при изучении состояния природной среды. Основным современным способом представления формы земной поверхности выступает цифровая модель рельефа (ЦМР). Глобальные цифровые модели рельефа — это ЦМР, охватывающие всю или почти всю территорию Земли. В настоящее время назрела потребность в создании ЦМР дна Северного Ледовитого океана (СЛО) и акваторий прилегающих морей. Обычно для батиметрии используются две цифровые модели: GEBCO и IBCAO в различных модификациях. Для оценки переноса вещества и формирования подводного рельефа необходимо создание единой ЦМР дна океана и прилегающей суши (водосборного бассейна СЛО). Для территории суши наиболее подходящими оказываются ЦМР ASTER GDEM v2 и ArcticDEM. Модель ArcticDEM отличается высокой точностью (2 м). Данные ArcticDEM покрывают всю территорию севернее 60° с. ш., но не охватывают полностью площадь водосборного бассейна СЛО. Как и в любых других глобальных ЦМР, в ней есть области, не покрытые данными модели. Наибольшие территории с отсутствием данных имеют: Санкт-Петербург и Ленинградская обл. (20,19 %), Республика Карелия (17,13 %), Вологодская (14,96 %), Архангельская (11,48 %) и Кировская (8,7 %) области. Подобные «пробелы» следует заполнять данными других моделей, такими как ASTER GDEM v2, высотными отметками геодезических знаков и данными из топографических карт с обязательным искусственным уменьшением размера ячейки до исходного разрешения ArcticDEM. Модели ASTER GDEM v2 и ArcticDEM применимы для разных задач: первая — для выделения региональных трендов развития рельефа и региональных морфоструктур; вторая — для локального анализа слабобасченных форм рельефа.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, ArcticDEM, ASTER GDEM, субъекты России

Одобрена к печати: 22.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127

Введение

Цель исследования заключается в анализе возможностей применения высокоточных цифровых моделей рельефа (ЦМР) для исследований арктических территорий России.

Задачи исследования: оценка покрытия северных территорий страны данными глобальных ЦМР ArcticDEM и ASTER GDEM v2; статистический анализ исходной ЦМР ArcticDEM для субъектов России, расположенных севернее 60° с. ш.

В настоящее время назрела потребность в создании ЦМР дна Северного Ледовитого океана (СЛО) и прилегающих территорий суши. Обычно используются две цифровые модели: GEBCO (*англ.* General Bathymetric Chart of the Oceans) и IBCAO (*англ.* International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean). Модели постоянно обновляются, возрастают их точность и пространственное разрешение. GEBCO насчитывает уже четыре версии (GEBCO_08 Grid, GEBCO_2014 Grid, GEBCO_2019 Grid и Gebco One Minute Grid) с постоянно нарастающей точностью. Наиболее точной представляется модель GEBCO_2019 — 15" (https://en.wikipedia.org/wiki/General_Bathymetric_Chart_of_the_Oceans#Data_sets_and_products). Актуальной ревизией модели IBCAO является версия IBCAO 3.0 2012 г. (сетка 500×500 м). Таким образом, обе модели имеют практически одинаковое пространственное разрешение.

Стандартно модели рельефа дна океана и прилегающих морей рассматриваются отдельно от моделей рельефа суши, что связано с весьма существенной разницей по точности и разрешающей способности моделей суши и дна океана (на порядок отличающихся друг от друга), а также со структурой данных. ЦМР суши имеют пиксельную организацию с минимумом интерполяции, ЦМР дна океана — гридированную с высокой степенью интерполяции данных. С геологической и геоморфологической точек зрения наиболее оптимальным было бы составление единых цифровых моделей рельефа, охватывающих не только акватории СЛО и прилегающих морей, но и континентальную сушу — как минимум в пределах Арктической геопредеcсии (водосборный бассейн СЛО) (рис. 1). Это позволит учесть перенос осадочного материала, в том числе и загрязняющих веществ, в морские акватории (Кутинов, 2005) и вдольбереговыми течениями.

Рис. 1. Схема геоэкологического районирования Арктического сегмента земной коры по Ю. Г. Кутинову (2005): 1 — границы Арктического сегмента; 2 — границы Арктической геопредеcсии; 3 — граница Евроазиатской ветви Арктической окраинно-континентальной зоны; 4 — границы районов с разной степенью трансформации геологической среды (I — Европейский Север; II — Западная Сибирь; III — Восточная Сибирь и Дальний Восток; IV — шельф Арктических морей); 5 — зона межплитной сейсмичности; 6 — зона внутриплитной сейсмичности; 7 — область неустойчивого осадконакопления

Появление в последнее время достаточно точных моделей дна СЛО и арктических морей позволяет в качестве единой ЦМР использовать высокоточные модели суши, соблюдая однородность материалов. Таким образом, появляется возможность расчёта геоморфометрических параметров и, как следствие, районирования обширных северных территорий Российской Федерации на основе единой базы данных.

Поэтому на первом этапе необходимо проведение оценки качества высокоточных моделей суши и возможности их применения для анализа больших территорий. При этом отдельным вопросом становится разработка ЦМР для устьевых районов крупных северных рек, так как последние служат переходным вариантом между ЦМР суши и дна акваторий морей и от-

личаются высокой и непостоянной скоростью осадконакопления (наличие геохимического барьера или маргинального фильтра) (Опыт..., 2001).

Вопрос строения и динамики развития зоны перехода «суша — море» имеет не только научное, но и практическое значение. При проектировании системы транспортировки газа по подводным трубопроводам необходима корректная и детальная информация о физико-механических свойствах слабых (водонасыщенных) осадков, температуре фазовых переходов вмещающих грунтов и придонных вод, многолетнем температурном режиме среды, об уклонах донной поверхности (не только об углах, но и о кривизне и расчленённости рельефа).

При такой постановке проблемы важным вопросом выступает выбор высокоточных моделей рельефа суши и оценка их применимости для исследований северных территорий Российской Федерации.

Материалы и методика работ

В качестве анализируемых ЦМР нами были рассмотрены ASTER GDEM v2, v3 и ArcticDEM. Проведённый авторами ранее анализ (Кутинов и др., 2019) показал, что северные территории суши РФ покрыты следующими ЦМР: GTOPO30 (~900 м); ETOPO (~900 м); GMTED2010 (~900–250 м); ACE2 (~900–90 м); ASTER GDEM v2, v3 (~30 м); ArcticDEM (~2 м). Модели GTOPO30, GMTED2010, ACE2, ETOPO имеют не только более низкое разрешение, но и неоднородны по исходному материалу, что влечёт за собой меняющуюся от региона к региону исходную точность. Модели ASTER GDEM v2, v3 и ArcticDEM имеют лучшее пространственное разрешение. Наш опыт показывает, что, несмотря на заявления разработчиков, версии 2 и 3 ASTER GDEM не отличаются друг от друга по количеству пропусков и артефактов. То есть вполне корректно рассматривать пригодность моделей ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для регионального геоэкологического районирования северных территорий РФ.

ASTER (*англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) **GDEM** (*англ.* Global Digital Elevation Model) — глобальная цифровая модель рельефа, разработанная Министерством экономики, торговли и промышленности Японии (*англ.* Ministry of Economy, Trade, and Industry — METI) и Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства США (NASA, National Aeronautics and Space Administration — NASA). ЦМР ASTER GDEM существует в трёх версиях: v1 — разрешение 7,5"; v2 — 1"; v3 — то же разрешение, что и у v2, но, по утверждению разработчиков, данная версия «очищена» от артефактов (https://lpdaac.usgs.gov/documents/434/ASTGTm_User_Guide_V3.pdf).

Для создания ЦМР ASTER GDEM использовался архив данных радиометра ASTER, состоящий из 1,5 млн сцен. Модель ASTER GDEM охватывает поверхность земного шара между 83° с. ш. и 83° ю. ш. Подробная характеристика данной ЦМР и оценка её точности приведены в более ранних работах авторов (Кутинов и др., 2019; Минеев и др., 2018).

Проект **ArcticDEM** — это совместная инициатива Национального агентства геопространственной разведки (National Geospatial-Intelligence Agency — NGA) и Национального научного фонда (National Science Foundation — NSF) США по созданию высококачественной цифровой модели местности территории Арктики. Описание модели представлено согласно информации, полученной с сайта <https://www.pgc.umn.edu/guides/arcticdem/introduction-to-arcticdem>, перевод авторский.

В основе ArcticDEM лежат оптические стереоизображения, высокопроизводительные вычисления и свободное программное обеспечение. Разработка ArcticDEM ведётся в три этапа:

- 1) спутники DigitalGlobe WorldView-1, WorldView-2 и WorldView-3 собирают стереоскопические изображения Арктики;
- 2) из полученных изображений с помощью программного обеспечения Университета Огайо (*англ.* Ohio University) Surface Extraction и алгоритма SETSM (TIN-based Search-space Minimization) извлекаются цифровые модели в двухметровом разрешении;
- 3) все необходимые вычисления проводятся на суперкомпьютерах Blue Waters Национального научного фонда США.

Растровые файлы ArcticDEM доступны в двух видах (рис. 2):

- strip-файлы, полученные непосредственно после обработки изображений алгоритмом SETSM; файлы соответствуют участкам перекрытия стереопар, их размер зависит от положения спутника во время съёмки (см. рис. 2, слева);
- файлы мозаики, собранные из множества strip-файлов и обработанные так, чтобы снизить количество артефактов, связанных с наложением изображений друг на друга (см. рис. 2, справа).

Рис. 2. Глобальное покрытие ArcticDEM в виде strip-файлов (слева) и файлов мозаики (справа) и их увеличенные фрагменты

Данные альтиметрии IceSAT использовались для того, чтобы увеличить точность растровых файлов ArcticDEM: strip-файлы содержат только метаинформацию о смещениях, определённых с помощью альтиметрии, а в файлах мозаики эти смещения применены.

Высокопроизводительные вычисления и автоматизация разработки новых версий ArcticDEM позволяют создавать за короткое время большой объём данных, т.е. цифровые модели большого покрытия и высокого разрешения.

ArcticDEM выпускается поэтапно, текущая версия (версия 7) была выпущена 28.09.2018 (<https://www.pgc.umn.edu/guides/arcticdem/introduction-to-arcticdem/>).

В настоящей статье авторами проведена общая оценка покрытия северных территорий РФ ЦМР ArcticDEM и ASTER GDEM v2, а также статистический анализ исходной ЦМР ArcticDEM для территории России, расположенной севернее 60° с. ш. В качестве статистиче-

ских характеристик оценивались площади территорий субъектов РФ, покрытые ArcticDEM и с отсутствием данных (в квадратных километрах и процентном соотношении). Обработка исходных данных производилась в программной среде SAGA GIS (<http://www.saga-gis.org>).

Результаты работ и обсуждения

Данные ArcticDEM покрывают всю территорию Земли севернее 60° с. ш. В дополнение к этому в покрытие входят территории Гренландии, Аляски и Камчатского п-ова. Покрытие для территории РФ приведено на *рис. 3*. Полное покрытие исходными данными ArcticDEM арктической зоны земного шара в интерактивном режиме можно посмотреть на сайте ArcGIS Living Atlas of the World (<https://livingatlas2.arcgis.com/arcticdemexplorer/>).

Рис. 3. Покрытие ArcticDEM территории России (проекция WGS_1984_EPSG_Russia_Polar_Stereographic): 1 — Мурманская обл.; 2 — Республика Карелия; 3 — Санкт-Петербург и Ленинградская обл.; 4 — Архангельская обл.; 5 — Вологодская обл.; 6 — Ненецкий автономный округ (АО); 7 — Республика Коми; 8 — Кировская обл.; 9 — Пермский край; 10 — Ямало-Ненецкий АО; 11 — Ханты-Мансийский АО; 12 — Свердловская обл.; 13 — Красноярский край; 14 — Томская обл.; 15 — Республика Саха (Якутия); 16 — Иркутская обл.; 17 — Чукотский АО; 18 — Магаданская обл.; 19 — Хабаровский край; 20 — Камчатский край

В целом можно отметить, что ЦМР ArcticDEM, в отличие от ASTER GDEM v2, не покрывает полностью площадь Арктической геодепрессии (водосборного бассейна СЛО) (см. *рис. 1*), особенно восточных территорий, её необходимо дополнять данными других моделей, в первую очередь ASTER GDEM v2, v3 или моделями, построенными на основе соответствующих по масштабу топографических карт. Такая процедура требует уравнивания моделей по пространственному разрешению и точности. Как правило, это приводит к снижению (весьма существенному) пространственного разрешения и точности обобщённой модели (Кутинов и др., 2019). Чем меньше процент покрытия, тем больше «огрубляется» исходная модель при создании общей базы данных. Поэтому наиболее предпочтительно использование ЦМР ArcticDEM для территорий с покрытием 100 % или близким к нему.

Второй проблемой становится наличие «пустот» (территорий, не покрытых данными) и ошибок в высотных отметках моделей (ячейки со значениями ниже нуля и превышающими максимальное значение высоты в регионе).

Из всех ЦМР наибольшей разрешающей способностью обладает ArcticDEM (в версии двухметровой точности). Однако она сформирована не в результате единой миссии, а «сшита» из разновременных панхроматических оптических снимков. Сопоставление ЦМР ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для территории Архангельской обл., например, показало значительное количество участков, не покрытых данными последней модели (рис. 4), что вполне закономерно при использовании оптических снимков в районах с высоким процентом облачности, характерных для северных территорий (Кутинов и др., 2019). Так, количество «пустот» в модели в модели ASTER GDEM v2 составляет 1,24 % от общей площади области, а в ArcticDEM Release 7 — 14,49 %, что на порядок больше.

Рис. 4. Сопоставление ЦМР ASTER GDEM v.2 (слева) и ArcticDEM (справа) и их увеличенные фрагменты; белым цветом показаны области отсутствия данных

Статистика исходных данных ArcticDEM для субъектов РФ, попадающих в покрытие модели ArcticDEM, приведена в таблице.

Наибольшие площади с отсутствием данных имеют Санкт-Петербург и Ленинградская обл. (20,19 %), Республика Карелия (17,13 %), Вологодская (14,96 %), Архангельская (11,48 %) и Кировская (8,7 %) области.

Таким образом, для этих территорий, безусловно, необходима корректировка данных ЦМР ArcticDEM для достижения «однородности» материала при региональном районировании.

В иностранной литературе имеется большое количество статей, предлагающих различные способы корректировки цифровых моделей рельефа (Arefi, Reinartz, 2011; Athmania, Achour, 2014; Changwei et al., 2013; Hvidegaard et al., 2012; Phama et al., 2018). Авторами настоящей работы также проводилась процедура подготовки и корректировки модели ASTER GDEM v2 на территорию Архангельской обл. для дальнейшего проведения геоэкологического районирования. Заполнение пустот возможно с помощью трёх типов исходных данных высотных отметок, которые авторы использовали при работе с ЦМР ASTER GDEM v2: 1 — использо-

вание значений геодезических знаков; 2 — использование данных ГИС «Панорама» (топокарты масштаба 1:50 000); 3 — использование ЦМР с меньшим пространственным разрешением. Проведённое нами сопоставление исходных данных ГИС «Панорама», ЦМР ASTER GDEM v2 и количества геодезических знаков на территорию Архангельской обл. показало следующее: территория области покрыта 91 сценой ЦМР ASTER GDEM v.2, размер одной сцены — 4100×4200 элементов, всего — более 459 млн точек, плотность точек — 133/км²; ГИС «Панорама» содержит около 70 000 точек, плотность — 0,17/км²; количество геодезических знаков — около 3500 точек, плотность точек — 0,008/км². В любом из перечисленных вариантов необходимо проведение процедуры искусственного уменьшения размера ячейки до исходного разрешения ArcticDEM. Это, несомненно, скажется на однородности модели, причём не в лучшую сторону, так как пространственное разрешение модели коррелирует с точностью высотных отметок. Применённая авторами подобная процедура с ЦМР ASTER GDEM v2 показала, что максимальные ошибки по высоте приурочены к участкам, заполненным данными из другой модели (GMTED2010 с искусственно уменьшенным размером ячейки до 1"), и превышают ошибки по модели ASTER GDEM v2 в два раза (Кутинов и др., 2019).

Статистика исходных данных ArcticDEM для субъектов РФ

№ на рис. 3	Субъект РФ	Площадь субъекта, км ²	Покрытие		Отсутствие данных	
			%	км ²	%	км ²
20	Камчатский край	464 275	100	464 275	0,31	1 439
17	Чукотский АО	721 481		721 481	0,54	3 896
10	Ямало-Ненецкий АО	769 250		769 250	1,81	13 923
6	Ненецкий АО	176 810		176 810	4,84	8 558
1	Мурманская обл.	144 902		144 902	6,35	9 201
7	Республика Коми	416 774		416 774	7,72	32 175
4	Архангельская обл.	589 913		589 913	11,48	67 722
2	Республика Карелия	180 520		180 520	17,13	30 923
18	Магаданская обл.	462 464	93,03	430 230	0,53	2 280
11	Ханты-Мансийский АО	534 801	86,87	464 582	1,57	7 294
15	Республика Саха	3 083 523	86,50	2 667 247	0,56	14 937
13	Красноярский край	2 366 797	77,81	1 841 605	0,97	17 864
3	Санкт-Петербург и Ленинградская обл.	85 347	37,71	32 184	20,19	6 498
5	Вологодская обл.	144 527	37,61	54 357	14,96	8 132
9	Пермский край	160 236	30,75	49 273	3,97	1 956
12	Свердловская обл.	194 307	18,37	35 694	1,64	585
16	Иркутская обл.	774 846	11,82	91 587	0,46	421
14	Томская обл.	314 391	11,61	36 501	0,29	106
19	Хабаровский край	787 633	11,27	88 766	0,23	204
8	Кировская обл.	120 374	10,53	12 675	8,70	1 103

С учётом больших площадей регионов при проведении региональных исследований оптимальным становится использование цифровых моделей как минимум уровня DTED-1 или DTED-2, как приводится в работе (Никольский, 2008). Использование ЦМР уровня HRTI-3 и HRTI-4 неизбежно влечёт возникновение «избыточной» информации (так, например, DTED-2 на площадь Архангельской обл. насчитывает около 15 млн точек, 3-й уровень ЦМР — более 1 млрд точек), затрудняя выделение региональных трендов. До последнего времени ЦМР уровня HRTI-3 и HRTI-4 были платными. Появление ЦМР ArcticDEM изменило эту ситуацию.

При переходе от крупного масштаба к более мелкому мы сталкиваемся с необходимостью проведения процедуры генерализации, которая преследует две цели: 1) соблюдение геометрической точности изображения; 2) сохранение содержательного соответствия. Эти цели находятся в противоречии друг к другу, поскольку геометрическая точность часто нарушается для соблюдения содержательного соответствия (Берлянт, 1986). Вследствие противоречивых свойств генерализации приёмы анализа, которые требуют высокой картографической точности, эффективны только для тех карт (в том числе и экологического содержания), у которых генерализация минимальна. Но это требование значительно затрудняет или делает невозможным выделение глобальных и региональных трендов. Сопоставление карт разного масштаба (и степени генерализации, соответственно) показало существенное расхождение (до 50 %) в определении площадей контуров и их формы, особенно при эрозионном типе рельефа (Берлянт, 1986), представляющем первоочередной интерес при геоэкологических исследованиях. При этом, как правило, уменьшается размер эрозионных долин и увеличивается площадь плоских водоразделов (Кочуркин, Кутинов, 2000). В случае слаборасчленённого характера рельефа северных равнинных территорий и точности высотного определения ЦМР ряд локальных эрозионных форм, в первую очередь линейных, вообще не найдёт своего отражения. Проведённый нами анализ приёмов генерализации на примере ЦМР ASTER GDEM v2 площади Архангельской обл. методами осреднения «окнами» или скользящим отрезком показал, что при этом уменьшаются пропорционально размеру «окна» или отрезка высотные значения (Кутинов и др., 2019). Это особенно важно для регионов со слаборасчленённым рельефом, так как искажает значения получаемых на основе ЦМР геоморфометрических параметров, заведомо уменьшая их потенциальную предрасположенность к развитию эрозионных процессов.

Поэтому ЦМР ArcticDEM более пригодна для детального анализа морфоструктур рельефа, выделенных по более «грубым» ЦМР с использованием таких геоморфометрических параметров, как индекс расчленённости рельефа, углы наклона, индекс баланса геомасс и др. Анализ по этой модели глобальных и региональных трендов представляется маловероятным. В принципе, возможно применение ArcticDEM с пространственным разрешением 32 м.

Следует отметить, что обе модели (ASTER GDEM v2 и ArcticDEM) мало пригодны для анализа структур устьев северных рек, так как последние характеризуются высокой динамикой изменения контуров и форм рельефа. Решением этой проблемы может быть применение фотограмметрии высокоточных космических снимков.

Для проведения дальнейших исследований арктических территорий РФ модель ArcticDEM следует подвергнуть процедуре корректировки. Этапы подготовки модели могут быть аналогичными тем, которые были применены авторами ранее для подготовки ЦМР Архангельской обл. на основе ASTER GDEM v2. Подробно методика подготовки модели изложена в работах (Минеев и др., 2015а, б).

Выводы

Для создания единой ЦМР дна Северного Ледовитого океана и прилегающих территорий суши наиболее пригодны модели Gebco One Minute Grid и IBCAO 3.0 (дно СЛО), ASTER GDEM v2 и ArcticDEM (водосборный бассейн СЛО). Однако, учитывая точности моделей суши и дна океана, создание единой высокоточной модели Арктической геодепрессии на настоящий момент невозможно. Оптимальным решением проблемы представляется расчёт геоморфометрических параметров отдельно для суши и дна океана и дальнейшее их рассмотрение совместно.

Для арктических и приарктических территорий Российской Федерации среди имеющихся на сегодняшний день свободно распространяемых ЦМР по пространственному разрешению самой точной является ArcticDEM, но поскольку она сформирована не в результате единой миссии, а «сшита» из разновременных панхроматических оптических снимков, облака, туман, тени и другие атмосферные явления могут препятствовать извлечению информации о рельефе. Это и определяет значительное число территорий с отсутствием данных. Наибольшее количество таких участков характерно для Северо-Запада РФ. Для этих террито-

рий необходимо заполнять подобные «пробелы» данными других моделей, таких как ASTER GDEM v2 или моделей, построенных на основе соответствующих по масштабу топографических карт, и данными геодезических знаков. Но в любом случае необходимо проводить процедуру искусственного уменьшения размера ячейки до исходного разрешения, соответствующего ArcticDEM. Однако сохранить однородность модели при этом не удастся. Для исследования арктических и приарктических территорий суши необходимо использовать обе модели: ASTER GDEM v2 — в основном при выделении региональных трендов и для выполнения среднемасштабного районирования; ЦМР ArcticDEM — для более детального анализа морфоструктур рельефа, выделенных по более «грубым» ЦМР.

Исследование выполнено в ходе выполнения государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук, государственная регистрация № AAAA-A18-118012390305-7; а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-05-60024 «Анализ состояния природной среды равнинных территорий Арктической зоны РФ с использованием геоинформационных технологий и цифрового моделирования рельефа».

Литература

1. Берлянт А. М. Образ пространства: карта и информация. М.: Мысль, 1986. 240 с.
2. Кочкуркин Н. В., Кутинов Ю. Г. О возможности применения аэрофотосъемки в экологических целях на территории Архангельской области. Факты и соображения // Север: экология: сб. науч. тр. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 351–363.
3. Кутинов Ю. Г. Экогеодинамика Арктического сегмента земной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 388 с.
4. Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Полякова Е. В., Чистова З. Б. Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и её подготовка для геологического районирования (на примере Архангельской области). Пенза: Социосфера, 2019. 176 с.
5. Минеев А. Л., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Полякова Е. В. (2015a) Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // Пространство и Время. 2015. № 3(21). С. 278–291. URL: https://space-time.ru/space-time/article/view/2226-7271prov_st3-21.2015.83.
6. Минеев А. Л., Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. (2015b) Методические аспекты создания цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM V. 2 // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. URL: <http://science-education.ru/129-21949>.
7. Минеев А. Л., Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. Надёжность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 58–67. URL: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67>.
8. Никольский Д. Б. Современные тенденции в радиолокационном дистанционном зондировании Земли // Геоматика. 2008. № 1. С. 7–10.
9. Опыт системных исследований в Арктике. М.: Науч. мир, 2001. 644 с.
10. Arefi H., Reinartz P. Accuracy enhancement of ASTER global digital elevation models using ICESat data // Remote Sensing. 2011. V. 3(7). P. 1323–1343. URL: <https://doi.org/10.3390/rs3071323>.
11. Athmania D., Achour H. External Validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI-SRTM v4.1 Free Access Digital Elevation Models (DEMs) in Tunisia and Algeria // Remote Sensing. 2014. V. 6(5). P. 4600–4620. URL: <https://doi.org/10.3390/rs6054600>.
12. Changwei J., Shortridge A., Lin S., Wu J. Comparison and validation of SRTM and ASTER GDEM for a subtropical landscape in Southeastern China // Intern. J. Digital Earth. 2013. P. 969–992. URL: <https://doi.org/10.1080/17538947.2013.807307>.
13. Hvidegaard S. M., Soerensen L. S., Forsberg R. ASTER GDEM validation using LiDAR data over coastal regions of Greenland // Remote Sensing Letters. 2012. V. 3(1). P. 85–91. URL: <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.527389>.
14. Phama H. T., Marshall L., Johnson F., Sharma A. A method for combining SRTM DEM and ASTER GDEM2 to improve topography estimation in regions without reference data // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 210(1). P. 229–241. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.026>.

Analysis of the applicability of the ASTER GDEM v2 and ArcticDEM digital elevation models in research on Russia's Arctic territories

E. V. Polyakova, Yu. G. Kutinov, A. L. Mineev, Z. B. Chistova

Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research RAS, Arkhangelsk 163000, Russia

E-mail: lenpo26@yandex.ru

Materials from various satellite imagery from artificial Earth satellites are widely used in world practice when studying the state of the environment. The main and modern way of representing the shape of the Earth's surface is a digital elevation model (DEM). Global DEMs cover the entire or almost the entire territory of the Earth. Currently, there is a need to create a DEM of the bottom of the Arctic Ocean and adjacent seas. Typically, 2 digital models are used for bathymetry: GEBCO and IBCAO in various versions. To assess the transfer of matter and the formation of underwater relief, it is necessary to create a single DEM of the ocean floor and adjacent land (watershed of the Arctic Ocean). For land areas, ASTER GDEM v2 and ArcticDEM are the most suitable DEMs. ArcticDEM is highly accurate (2 m). ArcticDEM data cover the entire area north of 60° N, but do not completely cover the catchment area of the Arctic Ocean. As with any other global DEM, it has areas of missing data. The largest territories with missing data are: Saint Petersburg and the Leningrad Region (20.19 %), the Republic of Karelia (17.13 %), Vologda (14.96 %), Arkhangelsk (11.48 %) and Kirov (8.7 %) Regions. Such gaps should be filled using: data of other models, such as ASTER GDEM v2; elevations of geodetic signs and data from topographic maps with mandatory artificial reduction of the cell size to the original ArcticDEM resolution. ASTER GDEM v2 and ArcticDEM are applicable to different tasks: the former to highlight regional trends in the development of topography and regional morphostructures; the latter to local analysis of slightly indented forms of relief.

Keywords: digital elevation model, ArcticDEM, ASTER GDEM, Russia's subjects

Accepted: 22.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127

References

1. Berlyant A. M., *Obraz prostranstva: karta i informatsiya* (Image of space: map and information), Moscow: Mysl', 1986, 240 p.
2. Kochkurkin N. V., Kutinov Yu. G., O vozmozhnosti primeneniya aerofotos"emki v ekologicheskikh tselyakh na territorii Arkhangel'skoi oblasti. Fakty i soobrazheniya (On the possibility of using aerial photography for environmental purposes in the Arkhangelsk region. Facts and considerations), In: *Sever: ekologiya*, Ekaterinburg, UrO RAN, 2000, pp. 351–363.
3. Kutinov Yu. G., *Ekogodinamika Arkticheskogo segmenta zemnoi kory* (Ecogeodynamics of the Arctic segment of the earth's crust), Ekaterinburg, UrO RAN, 2005, 388 p.
4. Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Polyakova E. V., Chistova Z. B., *Vybor bazovoi tsifrovoi modeli rel'efa (TsMR) ravninnykh territorii Severa Evrazii i ee podgotovka dlya geologicheskogo raionirovaniya (na primere Arkhangel'skoi oblasti)* (The choice of the basic digital elevation model (DEM) of the plain territories of the North of Eurasia and its preparation for geological zoning (on the example of the Arkhangelsk region)), Penza: Sotsiosfera, 2019, 176 p.
5. Mineev A. L., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Polyakova E. V. (2015a), Podgotovka tsifrovoi 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, available at: 2226-7271prov_rst3-21.2015.83.
6. Mineev A. L., Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B. (2015b), Metodicheskie aspekty sozdaniya tsifrovoi 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, available at: <http://science-education.ru/129-21949>.
7. Mineev A. L., Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Nadezhnost' tsifrovoi modeli rel'efa Arkhangel'skoi oblasti dlya provedeniya geoekologicheskikh issledovaniy (The reliability of a digital elevation model of the Arkhangelsk region for geoecological research), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 58–67, available at: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67>.

8. Nikolskii D. B., *Sovremennye tendentsii v radiolokatsionnom distantsionnom zondirovanii Zemli* (Current trends in radar remote sensing of the Earth), *Geomatika*, 2008, No. 1, pp. 7–10.
9. *Opyt sistemnykh issledovaniy v Arktike* (Experience of systems research in the Arctic), Moscow: Nauchnyi mir, 2001, 644 p.
10. Arefi H., Reinartz P., Accuracy enhancement of ASTER global digital elevation models using ICESat data, *Remote Sensing*, 2011, Vol. 3, No. 7, pp. 1323–1343, available at: <https://doi.org/10.3390/rs3071323>.
11. Athmania D., Achour H., External Validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI-SRTM v4.1 Free Access Digital Elevation Models (DEMs) in Tunisia and Algeria, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, No. 5, pp. 4600–4620, available at: <https://doi.org/10.3390/rs6054600>.
12. Changwei J., Shortridge A., Lin S., Wu J., Comparison and validation of SRTM and ASTER GDEM for a subtropical landscape in Southeastern China, *Intern. J. Digital Earth*, 2013, pp. 969–992, available at: <https://doi.org/10.1080/17538947.2013.807307>.
13. Hvidegaard S. M., Soerensen L. S., Forsberg R., ASTER GDEM validation using LiDAR data over coastal regions of Greenland, *Remote Sensing Letters*, 2012, Vol. 3, No. 1, pp. 85–91, available at: <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.527389>.
14. Phama H. T., Marshall L., Johnson F., Sharma A., A method for combining SRTM DEM and ASTER GDEM2 to improve topography estimation in regions without reference data, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 210, No. 1, pp. 229–241, available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.026>.