_ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ _ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОДОХРАНИЛИЩА ПРОЕКТИРУЕМОЙ ГЭС "КАМБАРАТА-1" НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

© 2022 г. А. У. Чымыров^{а, b,} *, Д. Т. Чонтоев^b, К. Е. Абдрахматов^c, Б. М. Жакеев^b

^аКыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика

^bИнститут водных проблем и гидроэнергетики, Национальная академия наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика

^сИнститут сейсмологии, Национальная академия наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика

**E-mail: chymyrov@gmail.com* Поступила в редакцию 03.11.2021 г.

Гидроэнергетика играет очень важную роль в социально-экономическом развитии Кыргызстана. Река Нарын формируется в высоких горах внутреннего Тянь-Шаня, протекает по территории Кыргызстана и Узбекистана и имеет одних из самых обширных бассейнов и большой гидроэнергетический потенциал в Центральной Азии. На реке был построен каскад гидроэлектростанций (ГЭС), которые обеспечивают потребности страны в электроэнергии. служат ежегодному и многолетнему регулированию водопользования в регионе. В настоящее время разрабатываются проекты новых ГЭС, в том числе самой большой ГЭС каскада "Камбарата-1" с проектной мощностью 1860 МВт, для увеличения выработки электроэнергии. Будущее водохранилище этой ГЭС требует всестороннего изучения и определения всех параметров для детальной оценки воздействия на окружающую среду, обеспечения надежности и экономической эффективности его строительства и эксплуатации. Ложе будущего водохранилища находится в труднодоступной горной местности, и компьютерное моделирование, расчет его объема и площади зеркала в данной работе выполняются на основе открытых глобальных цифровых моделей местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР) с использованием геоинформационных технологий. Был проведен сравнительный анализ возможностей открытых глобальных ЦММ AW3D30, ЦМР ASTER GDEM V003, GLO-30, SRTM Plus и NASADEM с 30 м пространственным разрешением для применения в гидрологическом моделировании. На основе выбранной ЦММ АW3D30 были определены объемы и площади зеркала водохранилища при разных уровнях воды. Полученные результаты указывают на возможности использования современных ЦММ и ЦМР на основе космических данных в проектировании и эксплуатации водохранилищ в горных условиях Кыргызстана.

Ключевые слова: цифровые модели местности, цифровые модели рельефа, AW3D30, ASTER GDEM V003, GLO-30, SRTM Plus, NASADEM, космические данные, водохранилище, ГЭС "Камбарата-1" **DOI:** 10.31857/S0205961422040030

введение

Кыргызстан расположен в пределах Тянь-Шанской и Памиро-Алайской горных систем с крупнейшими ледниками, и водные ресурсы являются одним из главных национальных богатств страны. В республике формируются стоки таких крупных рек, как Нарын, Чу, Талас, Сары-Джаз, Карадарья, и других, впадающих в бассейны Сырдарьи и Амударьи и играющих важнейшую роль в жизнедеятельности населения, сельскохозяйственном и промышленном развитии не только в стране, но и в ряде районов Узбекистана, Казахстана, Таджикистана и Китая. На территории страны находится бессточное озеро Иссык-Куль, входящее в число 30 крупнейших по площади озер мира и занимающее седьмое месте в списке самых глубоких озер.

Крупнейшая река Кыргызстана Нарын берет начало в высоких горах внутреннего Тянь-Шаня и питает жаркую засушливую Ферганскую долину. Длина реки 807 км, и площадь бассейна 59100 км², наибольший расход — 2880 м³/с. Гидроэнергетический потенциал реки оценивается в 36.5 млрд кВт · ч/год. Питание реки в верховьях ледниково-снеговое, в среднем течении снегово-ледниковое. Река протекает по территории Иссык-Кульской, Нарынской, Джалал-Абадской областей Кыргызстана и Наманганской области Узбекистана. При слиянии с рекой Карадарья на территории Узбекистана образуется река Сырдарья (Маматканов и др., 2006).

В советское время в Кыргызстане был построен Нарынский каскад гидроэлектростанций – Токтогульская, Курпсайская, Ташкумырская, Шамалдысайская, Учкурганская ГЭС, которые сегодня обеспечивают потребности Кыргызстана в электроэнергии. Проектный режим работы данного каскада связан с годовым и многолетним регулированием стока бассейна реки Нарын с ограничениями по выработке электроэнергии из-за потребностей ирригации нижележащих стран, но в настоящее время он в основном действует в энергетическом режиме (Мубаракшин, 2013; Намазова, 2016; Urmambetova, Chymyrov, 2017).

Объектом настоящего исследования является проектируемая ГЭС "Камбарата-1" с проектной мощностью 1860 МВт и среднегодовой выработкой 5.1 ГВт · ч электроэнергии, которая должна стать самой мощной ГЭС Нарынского каскада и всей страны. На участке строительства сооружений ГЭС "Камбарата-1" русло реки представляет собой узкую межгорную долину с крутыми высокими бортами. Плотина гидроэлектростанции проектной высотой 275 м при наполнении водохранилища должна обеспечить нормальный подпорный уровень воды (НПУ) 1198 м над уровнем моря (Düzdaban, 2021). Строительство новой гидроэлектростанций далее позволит перевести Токтогульское водохранилище с проектным объемом 19.5 млрд м³ на режим многолетнего регулирования для обеспечения продовольственной безопасности и социально-экономического развития стран Центральной Азии (Касымова, 2013; Мубаракшин, 2013).

До начала планируемого строительства этого стратегически важного объекта необходимо детально исследовать и выявить параметры, объемы и площади водохранилища. Первые проекты будущих гидроэлектростанций Нарынского каскада были разработаны в 1970-1980-х гг. и требуют более надежных и современных исследований (Намазова, 2016; Croix, Suvorkulova, 2015). Для решения задач проектирования обычно использовались топографические карты и планы разных масштабов, полученные в результате топографических работ, аэрофото – и космической съемки. Вышеназванные традиционные методы имеют некоторые особенности в обработке и анализе данных, недостатки в точности и оперативности получения данных и высокую стоимость работ. Район строительства и территория будущего водохранилища ГЭС "Камбарата-1" находится в труднодоступной горной местности, поэтому дальнейшие исследования и оценку воздействия строительства станции на окружающую среду можно оперативно и с высокой экономической эффективностью вести с использованием современных спутниковых снимков разных систем.

Важнейшими современными источниками геопространственной информации сегодня являются открытые цифровые модели местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР). Они представляют собой информационно-математическую модель, которая объединяет в себе модель пространственно-координированных данных о местности и атрибутивные базы данных пространственных объектов данной местности. Цифровые модели местности строятся на точных данных о высоте поверхности земли, включая растительный покров и антропогенные объекты, в то время как цифровые модели рельефа представляют собой "чистую" трехмерную поверхности земли без растений, зданий и других объектов. Часто используемые в настоящее время и доступные глобальные ЦММ и ЦМР создаются, в основном, по данным стереоскопической и радарной космической съемки (Pakoksung, Takagi, 2016; Patel et al., 2016). К ним можно отнести GTOPO30, GMTED2010, SPOT DEM, NextMap World 30, World 3D Topographic Data, WorldDEM и другие модели. Для моделирования будущего водохранилища в настоящей работе были использованы открытые цифровые модели на основе данных спутниковых систем ALOS (Advanced Land Observing Satellite), ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), TanDEM-X и SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (Ашаткин и др., 2020; Kolecka, Kozak, 2014).

Основной целью данного исследования является компьютерное моделирование проектируемого водохранилища ГЭС "Камбарата-1" на основе открытых глобальных ЦММ и ЦМР с использованием геоинформационных систем (ГИС) для исследования его основных параметров. Цифровая модель водохранилища в дальнейшем позволит разработать точные и надежные гидрологические режимы для его безопасной и эффективной эксплуатации.

Возрастающая доступность более точных и качественных ЦММ и ЦМР обуславливает их более широкое применение в решении научных и практических задач в разных областях народного хозяйства. Но в то же время требуется тщательное изучение и сравнительный анализ различных цифровых моделей местности и рельефа на основе данных космический съемки. Изучение имеюшихся сравнительных исследований разных цифровых моделей рельефа показало, что сопоставлять данные различных исследований трудно в связи с разными видами сравниваемых моделей и источников данных, особенностями различных проверочных данных, влиянием типов ландшафта и землепользования, а также разностью методики оценки их пространственной точности. Ряд исследований показал, что ЦММ АW3D30, ЦМР ASTER и SRTM являются наиболее востребованными в научно-практических работах открытыми ЦММ и ЦМР со средним пространственным разрешением в одну угловую секунду или около 30 м на земной поверхности (Мальцев и др., 2018; Drisva, Kumar, 2016; Patel et al., 2016). Эти и другие исследования показывают относительно высокую пространственную точность и высокую эффективность разных ЦММ и ЦМР на разных территориях и регионах мира (Жусупов и др., 2019; Кобзева и др., 2011; Семакова, 2015; Fujita et al., 2008). Но в то же время имеется необходимость исследования пространственной точности и достоверности новых открыто доступных глобальных моделей рельефа для решения гидрологических задач в высокогорных условиях Кыргызстана (Чымыров и др., 2020).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ГЭС "Камбарата-1" проектируется для строительства в среднем течении реки Нарын с водохранилишем на участке от устья реки Кокирим на востоке до выклинивания водохранилища ГЭС "Камбарата-2" на западе. Русло на начальном отрезке ориентировано, а после впадения р. Кокомерен – субширотно. Наиболее крупными притоками на этой части являются реки Камбарата, Кокомерен, Кокирим и Толук. Все притоки кроме реки Кокомерен являются маловодными. Долина реки Нарын на рассматриваемом участке располагается между хребтами Молдотау и Ферганский на юге и Суусамыртау на севере. На участке строительства сооружений ГЭС "Камбарата-1" русло реки представляет собой узкую межгорную долину с крутыми высокими бортами. На участке намечаемого створа плотины оба борта долины крутые, участками отвесные. Русло реки, шириной в межень 40 и 60-90 м в паводок, здесь сложено валунами и крупной галькой. Среднемноголетний годовой объем стока воды на участке равен 12.48 млрд м³, расчетный максимальный расход через сооружения гидроузла с учетом трансформации паводка в водохранилище -2630 м³/с. Сейсмичность района – 9 баллов (Алыбаев, 2017; Абдрахматов и др., 2012).

Картографические материалы и данные разных систем дистанционного зондирования Земли были выбраны для сравнительного изучения в районе исследований, ограниченного по широте от 41°30′ с.ш. до 41°54′ с.ш. и по долготе от 73°00′ в.д. до 74°00′ в.д. Сопоставлять данные различных исследований довольно сложно из-за использования разных версий анализируемых ЦММ и ЦМР, разных видов проверочных данных, разных типов ландшафтов и землепользования тестируемых участков, а также разной методики оценки ошибок высот. В данной работе в качестве проверочных данных были использованы отметки в 413 точках, определенные на 4 топографических картах масштаба 1 : 100000 на район исследований, расположенный в высокогорном регионе Внутреннего Тянь-Шаня (рис. 1).

ЦМР ASTER GDEM V003 был создан по данным, полученным от сенсора ASTER, разработанного Национальным управлением Соединенных Штатов Америки по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA) совместно с Министерством экономики, торговли и промышленности Японии (METI). Сенсор установлен на борту спутника NASA Terra, запущенного 18 декабря 1999 г. Он охватывает широкую спектральную область с помощью 14 диапазонов от видимого до теплового инфракрасного, в высоком пространственном и радиометрическом разрешении. Стереоскопическая съемка ведется с помощью двух телескопов, снимающих в надир и назад в ближнем инфракрасном диапазоне вдоль полосы пролета, с разрешением около 15 м на земной поверхности. Первая версия ASTER GDEM была предоставлена в свободном доступе в 2009 г. Глобальная цифровая модель рельефа третьей версии – ASTER GDEM V003 находится в открытом доступе с 5 августа 2019 года (Чымыров и др., 2020; Courty et al., 2019). Цифровая поверхность Земли между 83° с.ш. и 83° ю.ш. доступны в виде файлов сцен формата GeoTIFF с размерами $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ и разрешением, равным 1 угловой секунде (примерно 30 м). Эта ЦМР проецирована на эллипсоид Мировой геодезической системы 1984 г. (WGS-84) и основана на гравитационной модели Земли 1996 г.

Глобальная цифровая модель местности ALOS World 3D-30m (AW3D30) с горизонтальным разрешением по широте и долготе в 1 угловую секунду находится в открытом доступе с мая 2015 г. AW3D30 разработана Японским центром технологий дистанционного зондирования (RESTEC), Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA) и корпорацией NTT DATA на основе данных, полученных с японского спутника ALOS с помощью установленной на нем оптикоэлектронной системы PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping). При создании этой ЦМР использованы более 3 млн космических снимков и благодаря оптической системе с тремя направлениями (прямое, обратное направление и надир) собраны высокоточные данные о самых различных типах местности, включая сложные горные участки поверхности с большой амплитудой высот. Все сенсоры осуществляющего съемку спутника хорошо откалиброваны, поэтому продукт имеет высокую точность геолокации без какой-либо коррекции с использованием опорных точек. Сцены цифровой модели местности AW3D30 в формате Geo-TIFF с размерами ячейки на местности 30 м нахо-



Рис. 1. Район исследований со сценами ЦМР, топографическими картами и опорными точками.

дятся в свободном доступе с 2016 г. Также доступна ее коммерческая версия с 5 м пространственным разрешением (Чымыров и др., 2020; Courty et al., 2019; Jain et al, 2018). Ее вертикальный датум основан на Глобальной гравитационной модели Земли 1996 г. (EGM96).

Открытая цифровая модель рельефа Copernicus DEM GLO-30 с пространственным разрешением 30 м разработана государственно-частным партнерством между Немецким центром аэрокосмических исследований (DLR) и компанией Airbus Defence and Space на основе коммерческой ЦМР WorldDEM. В свою очередь WorldDEM создан по данным глобальной интерферометрической съемки земной поверхности с использованием системы из двух радаров с синтетической апертурой (SAR) в спектральном канале X-диапазона – основного спутника TanDEM-X и второго аналогичного спутника TerraSAR-X (Rizzoli, 2017). Другая открыто доступная ЦМР Сорегпісиз DEM GLO-90 обеспечивает всемирное покрытие с пространственным разрешением 90 м. Коммерческая версия Сорегпісиз DEM EEA-10 имеет пространственное разрешение, равное 0.4 угловую секунду или около 10 м. Вертикальная система отсчета моделей измеряет высоту рельефа от поверхности Глобальной гравитационной модели Земли 2008 г. (EGM2008) (Marešová, 2021; Hawker, 2018; Purinton, Bookhagen, 2021).

Усовершенствованная односекундная третья версия модели ЦМР SRTM (SRTM Plus или SRT-MGL1 V003) в формате GeoTIFF доступна с января 2015 г. через веб-портал Геологической службы США (USGS) и другие источники. Данные для со-

· · · · ·		
Наименорания спутника, сенсора и молели		Разрешение,
пайменования спутника, сенсора и модели	Сцены епутникового енимка	угловая секунда/метр
Спутник Teppa (EOS AM-1), сенсор ASTER, модель	ASTGTMV003_N41E073_dem.tif	1/30
ASTER GDEM v003 Спутник ALOS, сенсор PRISM, модель ALOS World	ALPSMLC30_N041E073_DSM.tif	1/30
3D-30m (AW3D30) Спутник TanDEM-X, радар с синтезированной апер-	Copernicus_DSM_	1/30
турой, модель Copernicus DEM GLO-30 Многоразовый космический корабль Шаттл "Инде-	10_N41_00_E073_00_DEM.tif N41_E073_1ARC_V3.tif	1/30
вор", миссия SRTM, радары с синтезированной апер-		
турой SIR-C и X-SAR, модель SRTM Plus Улучшенный ЦМР SRTM с заполнениями пробелов	N41E073.hgt	1/30
на основе ЦМР ASTER GDEM и AW3D30, модель		
NASADEM		

Таблина 1	Использованные	чены глобальных нис	ровых молелей рельефа
таолица т.	использованные	сцопы плооальных цис	рровых моделей рельефа

здания глобальных моделей SRTM были получены в результате реализации Международного исследовательского проекта Национального управления Соединенных Штатов Америки (США) по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA), Национального агентства геопространственной разведки США (NGA), Итальянского космического агентства (ASI) и Немецкого центра аэрокосмических исследований (DLR). Измерения высоты большой части земной поверхности сенсорами SIR-C/X-SAR (Shuttle Imaging Radar — type C/X-band Synthetic Aperture Radar) проведены в трех каналах радиоволн (L, C и X) в феврале 2000 г. с борта многоразового космического корабля Шаттл "Индевор". С помощью сенсора X-SAR собраны данные высокого разрешения (1 угловая секунда или примерно 30 м на поверхности Земли), на основе которых создана модель SRTM-X DEM. Первые открытые версии SRTM (версия 1 от 2003 г. и версия 2 от 2005 г.) имели сетки с размером ячейки 3 угловые секунды или около 90 м на земной поверхности (Yue et al., 2017; Courty et al., 2019; Jain et al, 2018).

Цифровая модель рельефа NASADEM создана на основе интерферометрических данных миссии SRTM и связанных с ней продуктов. Усовершенствования в NASADEM были сделаны путем повторной обработки исходных данных необработанных сигналов SRTM с использованием усовершенствованных алгоритмов и включения данных, полученных в основном со спутника с высокоточным геофизическим лазерным альтиметром (GLAS), моделей ASTER GDEM, AW3D30 и по данным спутника измерения толщины льда, облаков и рельефа суши (ICESat). NASADEM опиралась на новейшие методы развертывания и вспомогательные данные, которые не были доступны во время первоначальной обработки данных SRTM (Vaka et al., 2019; Uuemaa et al., 2020). Оптимизированный метод минимизировал пробелы данных и расширил пространственное покрытие модели. Слои продукта данных NASA-

DEM_HGT включают ЦМР, количество сцен (NUM) и обновленный набор данных SRTM водного объекта (водная маска). Слой NUM указывает количество сцен, которые были обработаны для каждого пикселя с размером 1 угловую секунду, и источник данных. Изображение обзора с низким разрешением, показывающее высоту, также доступно для каждой гранулы NASADEM_HGT.

Четыре выбранные ЦМР, кроме Copernicus DEM (табл. 1), имеют высоты их поверхностей, вычисленные над гравитационной моделью Земли EGM96. Вертикальная система отсчета Copernicus DEM основана на Глобальной гравитационной модели Земли EGM2008.

Обработка пространственных данных была выполнена с использованием программных комплексов ArcGIS 10.4.1 и GRASS GIS 7.8.3 с созданием баз геоданных. В качестве основной была выбрана зональная система координат WGS_1984_UTM_-Zone_43 (EPSG:32643). Также были использованы геодезическая (Pulkovo_1942 – EPSG:4284) и зональная (Pulkovo_1942_GK_Zone_13 – EPSG:28413) системы координат 1942 года или CK-42, что обусловлено использованием топографических карт СССР масштаба 1 : 100000.

Все пять сцен ЦММ и ЦМР были отобраны на территорию будущего водохранилища и загружены с веб-порталов разработчиков. Далее они были нанесены на электронную карту и вырезаны для района исследований, ограниченного по широте от 41°30′ с.ш. до 41°54′ с.ш. и по долготе от 73°00′ в.д. до 74°00′ в.д. с использованием соответствующих инструментов ГИС.

В данной работе в качестве проверочных данных были использованы высотные отметки 413 опорных точек, оцифрованных на топографических картах масштаба 1 : 100000. Вертикальная точность объектов на топографических картах значительно зависят от пересеченности рельефа местности, графической точности масштаба, точности трансформации координат и горизонтальной привязки отсканированной карты, а также достоверности самих отметок. Согласно проведенным ранее исследованиям вертикальная точность отметок опорных точек на картах соответствующего масштаба может отличаться от 3.9 м на равнинах (уклон от 0 до 20 град.) до 172 м в высокогорных районах с 21 м арифметической средней ошибкой. Такой большой разброс вертикальной точности отметок опорных точек не позволяет их использовать в качестве основного показателя качества ЦМР для высокогорных районов, но они позволяет проводить анализ горизонтального положения элементов гидрографии с точностью ±27 м (Бесимбаева и др., 2020; Petrović et al., 2017).

Имеются разные методы оценки точности цифровых моделей рельефа на основе данных дистанционного зондирования. В данной работе расчет точности моделей производился путем вычисления вертикальной средней квадратической ошибки – $RMSE_{\nu}$ (Root Mean Square Error) и арифметической средней абсолютных величин вертикальных ошибок высот сравниваемых поверхностей в опорных точках (Clevers et al., 2009):

$$RMSE_{v} = \sqrt{\sum_{i}^{n} (e_{vi})^{2} / n}, \qquad (1)$$

где вертикальная ошибка – $e_{vi} = v_{ri} - v_{mi}$,

 v_{ri} — относительная проверочная высота опорной *i*-ой точки над средним уровнем моря, определенная по топографической карте,

 v_{mi} — высота опорной *i*-ой точки над средним уровнем моря на поверхности ЦММ/ЦМР,

n – количество опорных точек.

Альтернативной величиной при определении качества вертикальной точности также может служить арифметическая средняя абсолютных величин вертикальных ошибок

$$\overline{e}_{v} = \sum_{i}^{n} |\overline{e}_{v}| / n.$$
(2)

Стандартное отклонение вертикальных ошибок определяется по формуле

$$S_{v} = \sqrt{\sum_{i}^{n} (e_{vi} - RMSE_{v})^{2} / (n-1)}.$$
 (3)

Принимая нормальное распределение вертикальных ошибок, доверительные интервалы заданной надежности могут выражаться в виде

$$RMSE_{v} \pm Z_{i}(S_{v}). \tag{4}$$

В этом случае формула для 95% доверительного интервала принимает вид

$$RMSE_{v} \pm 1.96(S_{v}). \tag{5}$$

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 4 2022

Если *RMSE*_v будет равно нулю, то возможная ошибка с 95% вероятностью будет равна $\pm 1.96(S_v)$, а при 90% доверительном интервале она будет равна $\pm 1.645(S_v)$. По результатам сравнительного анализа точности проводится выбор наиболее подходящей ЦММ/ЦМР для дальнейшего моделирования водохранилища ГЭС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Для оценки качества полученных цифровых моделей рельефа были определены высоты поверхностей всех пяти ЦММ и ЦМР в 413 опорных точках для их сравнения с отметками этих точек на топографических картах. Анализ вертикальной точности цифровых моделей показал, что относительная точность ЦММ на основе AW3D30 выше по сравнению с другими моделями, что подтверждается минимальной вертикальной средней квадратической ошибкой ее поверхности (табл. 2). Стандартное отклонение вертикальных ошибок опорных точек на поверхности ЦММ AW3D30 составляет 33.67 м, в этом случае для 95% доверительного интервала вертикальной средней квадратической ошибки точность по этой модели составляет 33.67 ± 19.73 м. Далее по порядку вертикальной точности идут ЦМР GLO-30, NASA-DEM, SRTM Plus и ASTER GDEM v003. Такие относительно большие вертикальные ошибки ЦММ и ЦМР с 30 м пространственным разрешением можно объяснить горизонтальной неточностью пространственной привязки топографических карт, отрицательным влиянием крутых склонов горных вершин, наличием глубоких ущелий, скалистых вершин с большими углами наклона и сложной экспозиции горных склонов (Чымыров и др., 2020; Козуб, 2018; Courty et al., 2019).

С целью исключения влияния низкой точности проверочных данных в виде высотных отметок 413 опорных точек, полученных на топографических картах, был выполнен сравнительный анализ качества четырех других ЦМР относительно поверхности AW3D30. Статистический анализ полученных параметров показал, что ЦМР GLO-30 имеет минимальные величины вертикальной средней квадратической и вертикальной арифметической средней ошибок. Далее по вертикальной точности идут NASADEM, SRTM Plus и AS-TER GDEM v003 (табл. 3).

В качестве цифровой модели рельефа на основе данных дистанционного зондирования Земли для дальнейшего моделирования и определения основных параметров водохранилища принимается ЦММ AW3D30.

Створ плотины будущего ГЭС "Камбарата-1" намечается на реке Нарын примерно в 15 км выше плотины ГЭС "Камбарата-2", находящейся

ЧЫМЫРОВ и др.

Наименования ЦММ/ЦМР	Вертикальная средняя квадратическая ошибка — <i>RMSE_v</i> , м	Вертикальная арифметическая средняя ошибка — $\overline{e_v},$ м
ASTER GDEM v003	37.88	30.58
AW3D30	33.67	25.75
GLO-30	34.25	26.64
SRTM Plus	35.29	28.14
NASADEM	34.82	28.08

Таблица 2. Статистические параметры погрешности сравниваемых ЦММ и ЦМР относительно поверхности на топографической карте

Таблица 3. Статистические параметры погрешности четырех ЦМР относительно поверхности AW3D30

Наименования ЦМР	Вертикальная средняя квадратическая ошибка — <i>RMSE</i> _v , м	Вертикальная арифметическая средняя ошибка — $\overline{e_v},$ м
ASTER GDEM v003	14.52	3.35
GLO-30	8.44	2.49
SRTM Plus	10.52	2.79
NASADEM	10.07	2.76

на стадии строительства (рис. 2). Грунтовая плотина ГЭС "Камбарата-2", смешанной конструкции – частично взрыво-набросная, частично насыпная из камня и галечника, была возведена посредством направленного взрыва откоса правого берега в 2009 г. Суммарный расход 3-х агрегатов ГЭС составит 840 м³/с, а их мощность – 360 МВт. В настоящее время в здании ГЭС "Камбарата-2" установлен и работает гидроагрегат № 1 мощностью 120 МВт. Отметка нормального подпорного уровня (НПУ) водохранилища составляет 955 м, при котором его зеркало доходит до створа плотины ГЭС "Камбарата-1" (Судольский, Алексеевская, 2019; Düzdaban, 2021). Выше створа плотины ГЭС "Камбарата-1" ширина долины реки Нарын по урезу воды расширяется от 30–60 м до 300–450 м по днищу и около 1500 м на уровне нормального подпорного уровня воды (НПУ). НПУ, при котором наиболее эффективно использование напора воды, находится на высоте 1198 м над уровнем моря, форсированный подпорный уровень (ФПУ) водохранилища доходит до 1200 м. Согласно первоначальному проекту планируется строительство каменно-набросной плотины высотой до 275 м из грунтовых материалов, тело которой или его основная часть могут быть возведены методом направленного взрыва породы или обрушения породы взрывом. В ходе строительства необходимо разработать



Рис. 2. Каскад Камбаратинских ГЭС на реке Нарын.

72



Рис. 3. Цифровая модель будущего водохранилища ГЭС "Камбарата-1".

около 30 млн м³ скального грунта. В зоне затопления будущего водохранилища отсутствуют дороги, населенные пункты и обрабатываемые сельскохозяйственные земли, что снижает объем экономического ущерба и удешевляет строительство ГЭС.

Поверхность ЦММ AW3D30 была обработана и векторизована с помощью инструментов пространственного анализа и конвертации данных, а также других средств ArcGIS 10.4.1 и GRASS GIS 7.8.3. Горизонтали были проведены через каждые 2 м по высоте рельефа для последующих расчетов объема водохранилища и площади его водного зеркала. Полученная цифровая модель водохранилища показана на рис. 3.

Выполнен предварительный анализ полученных параметров водохранилища на основе ЦММ. Объем водохранилища при НПУ (1198 м) достигнет до 5 млрд м³, а площадь водного зеркала составит 58.85 млн м² (табл. 4). При достижении проектного уровня мертвого объема (УМО) или горизонта сработки водохранилища остается более 0.6 млрд м³ воды. При этом предполагается, что полезный объем водохранилища составляет около 4 млрд м³. Ширина плотины по урезу воды при ФПУ на высоте 1200 м может превысить 687 м. На рис. 4 показаны поперечные профили водохранилища по створу плотины и в его средней части.

Созданная цифровая модель водохранилища проектируемой ГЭС "Камбарата-1" позволяет проводить пространственный анализ расположения ложа будущего водоема и определить его объема и площади зеркала воды при разных уровнях первичного заполнения и дальнейшей его эксплуатации. Эта трехмерная модель также может применяться при восстановлении отражательных свойств земной поверхности с учетом уклонов и экспозиции склонов горной местности при применении мультиспектральных спутниковых снимков. Она также может служить в качестве основы для гидрологического моделирования стоков и водосборов с соответствующей пространственной точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровую модель местности AW3D30, обладающую наиболее точной поверхностью среди пяти рассматриваемых ЦММ и ЦМР, предпочтительнее использовать для моделирования с пространственным разрешением в 1 угловую секунду или около 30 м и расчетов основных параметров водохранилищ в высокогорных условиях Кыр-

Примерная высота плотины, м	Уровень воды над уровнем моря, м	Объем, млрд. м ³	Площадь водного зеркала, млн. м ²
275	1200 (ФПУ)	5.145	59.905
273	1198 (НПУ)	5.027	58.850
265	1190	4.559	54.999
255	1180	4.027	50.378
245	1170	3.537	46.024
235	1160	3.091	41.893
225	1150	2.685	37.576
215	1140	2.321	33.669
205	1130	1.995	30.482
195	1120	1.699	27.685
185	1110	1.429	25.022
175	1100 (YMO)	1.188	22.589
165	1090	0.971	19.966
155	1080	0.778	17.479
145	1070	0.611	15.060
135	1060	0.467	12.991
125	1050	0.343	10.934
115	1040	0.241	8.937
105	1030	0.159	6.948
95	1020	0.095	5.287
85	1010	0.049	3.516
75	1000	0.020	1.895
65	990	0.004	0.265
55	980	0.002	0.173

Таблица 4. Объем и площадь водного зеркала водохранилища при разных уровнях воды

гызстана. Исследование показало, что несмотря на то, что AW3D30 является цифровой моделью местности, она имеет лучшую поверхность для дальнейшего моделирования водохранилища и проведения морфометрических исследований. Это можно объяснить не только тем, что все сенсоры осуществляющего съемку спутника ALOS хорошо откалиброваны и данные очищены от посторонних шумов и вибраций, но также и тем, что район исследований является безлесным и не имеет населенных пунктов с высокими зданиями, что также является одним из решающих показателей ЦММ.

Другие рассматриваемые ЦМР можно расположить в следующем порядке с учетом их вертикальной точности и пространственной привязки: GLO-30, NASADEM, SRTM Plus и ASTER GDEM v003. Но качество каждой ЦММ и ЦМР может отличаться в других районах исследований в зависимости от типа рельефа, наличия растительности и населенных пунктов, точности пространственной привязки спутниковых изображений, принятого вертикального датума и других факторов. Топографические карты на бумажной основе могут иметь неприемлемую точность в качестве источника проверочных данных из-за больших ошибок их пространственной привязки и деформаций. Измерение координат опорных точек на местности с помощью спутникового позиционирования становится основным источником получения проверочных данных.

Трехмерные цифровые модели местности или рельефа также могут применяться при восстановлении отражательных свойств земной поверхности с учетом уклонов и экспозиции склонов горной местности при применении мультиспектральных спутниковых снимков. Она также может служить в качестве основы для гидрологического моделирования стоков и водосборов с соответствующей пространственной точностью.

Созданная цифровая модель водохранилища проектируемого ГЭС "Камбарата-1" дает возможность проводить пространственный анализ существующего ложа будущего водоема и определять его объема и площади зеркала при разных



Рис. 4. Поперечные профили водохранилища (вид вверх по руслу реки): *a* – по створу плотины ГЭС; *δ* – по створу 1 на рис. 3.

уровнях первичного заполнения и эксплуатации. Полученные параметры водохранилища позволяют их применение для дальнейших расчетов и оценки его влияния на окружающую среду и выявления возможных геоэкологических рисков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абдрахматов К.Е., Джанузаков К.Д., Фролова А.Г., Погребной В.Н. Карта сейсмического районирования территории Кыргызской Республики. Бишкек. 2012. 51 с. Алыбаев Н.К. Составление водно-энергетического баланса и его прогнозирование // Проблемы автоматики и управления. 2017. № 1(32). С. 43–49.

Ашаткин И.А., Мальцев К.А., Гайнутдинова Г.Ф., Усманов Б.М., Гафуров А.М., Ганиева А.Ф., Мальцева Т.С., Гиззатуллина Э.Р. Анализ морфометрии рельефа по глобальным ЦМР в пределах южной части европейской территории России // Записки Горного института. 2020. Т. 162, кн. 4. С. 612–628.

https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.4.612-628

Бесимбаева О.Г., Ярцева В.Ф., Хмырова Е.Н., Синяк Р.В. Анализ возникновения погрешностей при создании и обновлении цифровых топографических карт // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2020. № 2(30). С. 62–71.

Жусупов Н.А., Ха Т.В., Дахал Т.П., Ашыралиев Т.А., Бактыбек уулу М. Оценка точности открытых глобальных цифровых моделей рельефа // Вестник КРСУ. 2019. Т. 19. № 8. С. 135–139.

Касымова В.М. Состояние и перспективы сотрудничества Российской Федерации и Кыргызской Республики в сфере энергетики по обеспечению энергетической безопасности в Центральной Азии // Реформа. 2013. № 2(58). С. 47–53.

Кобзева Е.А. Использование фотограмметрических методов создания 3D моделей при проектировании водохранилищ // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2011. Т. 4. С. 3–6.

Козуб Ю.И. Повышение точности цифровой модели рельефа для целей ландшафтного картографирования на территорию Республики Дагестан // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2018. Т. 12. № 3. С. 96–102.

https://doi.org/10.31161/1995-0675-2018-12-3-96-102

Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М. Цифровые модели рельефа и их использование в расчетах темпов смыва почв на пахотных землях // Ученые записки Казанского Университета. Серия естественные науки. 2018. Т. 160, кн. 3. С. 514—530.

Маматканов Д.М., Бажанова Л.В., Романовский В.В. Водные ресурсы Кыргызстана на современном этапе. Бишкек: Илим, 2006. 276 с.

Мубаракшин Б.Н. Гидроэнергетика Киргизии в контексте решения водно-энергетических проблем Центральной Азии // Вестник МГИМО-Университета. 2013. № 1(28). C. 113–117. https://doi.org/10.24833/2071-8160-2013-1-28-113-117

Намазова Э.О. Анализ перспектив действующих проектов в энергетической отрасли Кыргызской Республики // Научный альманах. 2016. № 4-1(18). С. 165–167. https://doi.org/10.17117/na.2016.04.01.165

Семакова Э.Р. Предварительные результаты построения цифровой модели рельефа для некоторых районов Центрального и Западного Тянь-Шаня // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. № 4(1). С. 99-103.

Судольский Г.А., Алексеевская М.В. Гидравлические исследования по обоснованию конструкции берегового водосброса Камбаратинской ГЭС-2// Известия ВНИ-ИГ им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 292. С. 3-12.

Чымыров А.У., Чонтоев Д.Т., Жакеев Б.М. Создание цифровых моделей рельефа на основе открытых данных дистанционного зондирования Земли при уточнении границ бассейнов рек в котловине озера Иссык-Куль // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2020. Т. 26, ч. 2. C. 349-365.

https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-2-26-349-365

Clevers J.G.P.W., Congalton R.G., Green K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data-Principles and Practices (Second edition) // International J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2009. V. 11. P. 448-449. https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.07.002

Courty L.G., Soriano Monzalvo J.C., Pedrozo-Acuña A. Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for flood modelling purposes // J. Flood Risk Management. 2019. V. 12 (Suppl. 1): e12550.

https://doi.org/10.1111/jfr3.12550

Drisva J., Kumar D.S. Comparison of digitally delineated stream networks from different spaceborne digital elevation models: A case study based on two watersheds in South India // Arabian J. Geosciences. 2016. V. 9:710. P. 1-11. https://doi.org/10.1007/s12517-016-2726-x

Düzdaban E. Water issue in Central Asia: Challenges and opportunities // Eurasian Research J. 2021. V. 3. № 1. P. 45-62.

Fujita K., Suzuki R., Nuimura T., Sakai A. Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacial lakes in the Lunana region, Bhutan Himalaya // J. Glaciology. V. 54. Iss. 185. 2008. P. 220-228.

https://doi.org/10.3189/002214308784886162

Jain A.O., Thaker T., Chaurasia A., Patel P., Singh A.K. Vertical accuracy evaluation of SRTM-GL1, GDEM-V2, AW3D30 and CartoDEM-V3.1 of 30-m resolution with dual frequency GNSS for lower Tapi Basin India // Geocarto International. 2018. V. 33. P. 1237-1256.

https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1343392

Kolecka N., Kozak J. Assessment of the Accuracy of SRTM C – and X-Band High Mountain Elevation Data: a Case Study of the Polish Tatra Mountains // Pure Appl. Geophys. 2014. V. 171. P. 897-912.

https://doi.org/10.1007/s00024-013-0695-5

Marešová J., Gdulová K., Pracná P., Moravec D., Gábor L., Prošek J., Barták V., Moudrý V. Applicability of Data Acquisition Characteristics to the Identification of Local Artefacts in Global Digital Elevation Models: Comparison of the Copernicus and TanDEM-X DEMs // Remote Sens. 2021. V. 13:3931.

https://doi.org/10.3390/rs13193931

Pakoksung K., Takagi M. Digital elevation models on accuracy validation and bias correction in vertical // Model. Earth Syst. Environ. 2016. V. 2. Iss. 1:11. https://doi.org/10.1007/s40808-015-0069-3

Patel A., Kativar K.S., Prasad V. Performances evaluation of different open source DEM using differential global positioning system (DGPS) // Egypt. J. Remote. Sens. Space Sci. 2016. V. 19. Iss. 1. P. 7–16.

https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.004

Petrović V., Borisov M., Zlatanovic D., Igniatović L. Vertical accuracy of data on the topographic maps and their application in mining // Engineering and Mining J. 2017. https://doi.org/10.5937/mmeb1704039P

Purinton B., Bookhagen B. Beyond Vertical Point Accuracy: Assessing Inter-pixel Consistency in 30 m Global DEMs for the Arid Central Andes // Frontiers in Earth Science. 2021. V. 9. P. 901.

https://doi.org/10.3389/feart.2021.758606

Rizzoli P., Martone M., Gonzalez C., Wecklich Ch., Borla Tridon D., Bräutigam B, Bachmann M., Schulze D., Fritz T. Huber M., Wessel B., Krieger G., Zink M. Moreira A. Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 132. 2017. P. 119–139. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008

Urmambetova T., Chymvrov A. Geoenvironmental Impact Studies for Hydro-Energy Projects: Naryn River in Kyrgyzstan // Studia Universitatis Babes-Bolyai Geographia. 2017. V. 62. Iss. 1. P. 59-66.

https://doi.org/10.24193/subbgeogr.2017.1.04

Uuemaa E., Ahi S., Montibeller B., Muru M., Kmoch A. Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM) // Remote Sens. 2020. V. 12:3482. https://doi.org/10.3390/rs12213482

Vaka D.S., Kumar V., Rao Y.S., Deo R. Comparison of Various DEMs for Height Accuracy Assessment Over Different Terrains of India // IGARSS 2019 - 2019, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. July 28-August 2, 2019, Yokohama, Japan. P. 1998-2001. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898492

Yue L., Shen H., Zhang L., Zheng X., Zhang F., Yuan Q. High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations // IS-PRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. V. 123. P. 20-34.

https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.002

Modeling and Study of Parameters of the Under-Construction Kambarata-1 HPP Reservoir on Base of Satellite Data

A. U. Chymyrov¹, D. T. Chontoev², K. E. Abdrakhmatov³, and B. M. Zhakeev²

¹Kyrgyz state university of construction, transport and architecture (KSUCTA) named after N.Isanov, Bishkek, Kyrgyz Republic
²Institute of water problems and hydropower, National academy of sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic
³Institute of seismology, National academy of sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic

Hydropower plays a very important role in the socio-economic development of Kyrgyzstan. The Naryn River forms in the high mountains of the Inner Tien Shan, flows through the territory of Kyrgyzstan and Uzbekistan and has one of the most extensive basins and great hydropower potential in Central Asia. A cascade of Hydroelectric Power Plants (HPP) has been built on the river to satisfy the country's needs for energy, to provide annual and long-term regulation of water use in the region. Currently, projects are being developed for new HPPs, including the Kambarata-1 Hydroelectric Power Plant - the largest HPP in the cascade with designed capacity of 1.860 MW, to increase electricity generation in the country. The future reservoir site of this HPP requires a comprehensive study and determination of all parameters for a detailed assessment of the impact on the environment, ensuring the reliability and economic efficiency of its construction and operation. The future reservoir bed is located in a remote mountainous area and digital modeling, the calculation of its volume and water surface area are carried out in this work on base of the open global Digital Surface (DSM) and Elevation Models (DEM) using geoinformation technologies. A comparative analysis of the performances of the open global AW3D30 DSM, ASTER GDEM V003, GLO-30, SRTM Plus and NASADEM with 30 m spatial resolution for use in hydrological modeling was carried out. Based on the selected AW3D30 DSM, the volumes and water surface area of the reservoir were determined at different water levels. The results obtained indicate the possibility of using modern DSM and DEM, based on remote sensing data, in the design and operation of reservoirs in the mountainous conditions of Kyrgyzstan.

Keywords: digital surface model, digital elevation model, AW3D30, ASTER GDEM V003, GLO-30, SRTM Plus, NASADEM, satellite data, reservoir, Kambarata-1 HPP

REFERENCES

Abdrakhmatov K.E., Dzhanuzakov K.D., Frolova A.G., Pogrebnoj V.N. Karta sejsmicheskogo rajonirovanija territorii Kyrgyzskoj Respubliki [The seismic zoning map of the Kyrgyz Republic]. Bishkek. 2012. 51 p. (in Russian).

Alybaev N.K. Sostavlenie vodno-energeticheskogo balansa i ego prognozirovanie [Drawing up water and energy balance and its forecasting] // Problemy avtomatiki i upravlenija. 2017. № 1(32). P. 43–49. (in Russian).

Ashatkin I.A., Maltsev K.A., Gainutdinova G.F., Usmanov B.M., Gafurov A.M., Ganieva A.F., Maltseva T.S., Gizzatullina E.R. Analiz morfometrii rel'efa po global'nym CMR v predelah juzhnoj chasti evropejskoj territorii Rossii [Analysis of relief morphometry by global DEM in the southern part of the European territory of Russia] // Zapiski Gornogo instituta. 2020. V. 162. № 4. P. 612–628.

https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.4.612-628 (in Russian).

Besimbaeva O.G., Jartseva V.F., Khmyrova E.N., Sinjak R.V. Analiz vozniknovenija pogreshnostej pri sozdanii i obnovlenii cifrovyh topograficheskih kart [Analysis of the occurrence of errors in the creation and updating of digital topographic maps] // Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tehnologij). 2020. № 2(30). P. 62–71. (in Russian).

Chymyrov A.U., Chontoev D.T., Zhakeev B.M. Cozdanie cifrovyh modelej rel'efa na osnove otkrytyh dannyh distancionnogo zondirovanija Zemli pri utochnenii granic bassejnov rek v kotlovine ozera Issyk-Kul' [Creation of the digital relief models based on open remote sensing data for improvement the borders of river basins in the Issyk-Kul lake cavity] // InterKarto. InterGIS. 2020. V. 26, ch. 2. P. 349– 365.

https://doi.org/10.35595/2414-9179-2020-2-26-349-365 (in Russian).

Clevers J.G.P.W., Congalton R.G., Green K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data – Principles and Practices (Second edition) // International J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2009. V. 11. P. 448–449. https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.07.002

Courty L.G., Soriano Monzalvo J.C., Pedrozo-Acuña A. Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for flood modelling purposes // J. Flood Risk Management. 2019. V. 12 (Suppl. 1): e12550. DOI 10.1111/jfr3.12550

Drisya J., Kumar D.S. Comparison of digitally delineated stream networks from different spaceborne digital elevation models: A case study based on two watersheds in South India // Arabian J. Geosciences. 2016. V. 9:710. P. 1–11.

https://doi.org/0.1007/s12517-016-2726-x

Düzdaban E. Water issue in Central Asia: Challenges and opportunities // Eurasian Research J. 2021. V. 3. № 1. P. 45–62.

Fujita K., Suzuki R., Nuimura T., Sakai A. Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacial lakes in the Lunana region, Bhutan Himalaya // J. Glaciology. V. 54. Iss. 185. 2008. P. 220–228.

https://doi.org/10.3189/002214308784886162

Jain A.O., Thaker T., Chaurasia A., Patel P., Singh A.K. Vertical accuracy evaluation of SRTM-GL1, GDEM-V2, AW3D30 and CartoDEM-V3.1 of 30-m resolution with dual frequency GNSS for lower Tapi Basin India // Geocarto International. 2018. V. 33. P. 1237–1256.

https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1343392

Kasymova V.M. Sostojanie i perspektivy sotrudnichestva Rossijskoj Federacii i Kyrgyzskoj Respubliki v sfere jenergetiki po obespecheniju jenergeticheskoj bezopasnosti v Central'noj Azii [Status and prospects of cooperation between the Russian Federation and the Kyrgyz Republic in the field of energy to ensure energy security in Central Asia] // Reforma. 2013. № 2(58). P. 47–53. (in Russian).

Kobzeva E.A. Ispol'zovanie fotogrammetricheskih metodov sozdanija 3D modelej pri proektirovanii vodohranilishh [The use of photogrammetric methods for creating 3D models in the design of reservoirs] // Interjekspo Geo-Sibir'. 2011. V. 4. P. 3–6. (in Russian).

Kolecka N., Kozak J. Assessment of the Accuracy of SRTM C – and X-Band High Mountain Elevation Data: a Case Study of the Polish Tatra Mountains // Pure Appl. Geophys. 2014. V. 171. P. 897–912.

https://doi.org/10.1007/s00024-013-0695-5

Kozub J.I. Povyshenie tochnosti cifrovoj modeli rel'efa dlja celej landshaftnogo kartografirovanija na territoriju Respubliki Dagestan [Improving the accuracy of the digital elevation model for the purposes of landscape mapping on the territory of the Republic of Dagestan] // Izvestija Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki. 2018. V. 12. No 3. P. 96–102.

https://doi.org/10.31161/1995-0675-2018-12-3-96-102 (in Russian).

Maltsev K.A., Golosov V.N., Gafurov A.M. Cifrovye modeli rel'efa i ih ispol'zovanie v raschjotah tempov smyva pochv na pahotnyh zemljah [Digital elevation models and their use in calculating soil washout rates on arable land] // Uchenye zapiski Kazanskogo Universiteta. Serija estestvennye nauki. 2018. V. 160, kn. 3. P. 514–530. (in Russian).

Mamatkanov D.M., Bazhanova L.V., Romanovskij V.V. Vodnye resursy Kyrgyzstana na sovremennom jetape [Water resources of Kyrgyzstan at the present stage]. Bishkek: Ilim. 2006. 276 p. (in Russian).

Marešová J., Gdulová K., Pracná P., Moravec D., Gábor L., Prošek J., Barták V., Moudrý V. Applicability of Data Acquisition Characteristics to the Identification of Local Artefacts in Global Digital Elevation Models: Comparison of the Copernicus and TanDEM-X DEMs // Remote Sens. 2021. V. 13:3931.

https://doi.org/10.3390/rs13193931

Mubarakshin B.N. Gidrojenergetika Kirgizii v kontekste reshenija vodno-jenergeticheskih problem Central'noj Azii [Hydropower Sector of Kyrgyzstan in the Context of Solving the Water–Energy Problems in the Central Asia] // Vestnik MGIMO-Universiteta. 2013. № 1(28). P. 113–117. https://doi.org/10.24833/2071-8160-2013-1-28-113-117 (in Russian).

Namazova Je.O. Analiz perspektiv dejstvujushhih proektov v jenergeticheskoj otrasli Kyrgyzskoj Respubliki [Analysis of the prospects of existing projects in the energy sector of the Kyrgyz Republic] // Nauchnyj al'manah. 2016. № 4-1(18). P. 165–167.

https://doi.org/10.17117/na.2016.04.01.165 (in Russian).

Pakoksung K., Takagi M. Digital elevation models on accuracy validation and bias correction in vertical // Model. Earth Syst. Environ. 2016. V. 2. Iss. 1:11. https://doi.org/10.1007/s40808-015-0069-3 *Patel A., Katiyar K.S., Prasad V.* Performances evaluation of different open source DEM using differential global positioning system (DGPS) // Egypt. J. Remote. Sens. Space Sci. 2016. V. 19. Iss. 1. P. 7–16.

https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.004

Petrović V., Borisov M., Zlatanovic D., Ignjatović L. Vertical accuracy of data on the topographic maps and their application in mining // Engineering and Mining J. 2017. https://doi.org/10.5937/mmeb1704039P

Purinton B., Bookhagen B. Beyond Vertical Point Accuracy: Assessing Inter-pixel Consistency in 30 m Global DEMs for the Arid Central Andes // Frontiers in Earth Science. 2021. V. 9. P. 901.

https://doi.org/10.3389/feart.2021.758606

Rizzoli P., Martone M., Gonzalez C., Wecklich Ch., Borla Tridon D., Bräutigam B, Bachmann M., Schulze D., Fritz T. Huber M., Wessel B., Krieger G., Zink M. Moreira A. Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 132. 2017. P. 119–139. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008

Semakova Je.R. Predvaritel'nye rezul'taty postroenija cifrovoj modeli rel'efa dlja nekotoryh rajonov Central'nogo i Zapadnogo Tjan'-Shanja [Preliminary results of creating a digital elevation model for some areas of the Central and Western Tien Shan] // Interjekspo Geo-Sibir'. 2015. N^{o} 4(1). P. 99–103. (in Russian).

Sudol'skij G.A., Alekseevskaja M.V. Gidravlicheskie issledovanija po obosnovaniju konstrukcii beregovogo vodosbrosa Kambaratinskoj GJeS-2 [Hydraulic studies to substantiate the design of the coastal spillway of the Kambarata HPP-2] // Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva. 2019. V. 292. P. 3–12. (in Russian).

Urmambetova T., Chymyrov A. Geoenvironmental Impact Studies for Hydro-Energy Projects: Naryn River in Kyrgyzstan // Studia Universitatis Babeş-Bolyai Geographia. 2017. V. 62. Iss. 1. P. 59–66.

https://doi.org/10.24193/subbgeogr.2017.1.04

Uuemaa E., Ahi S., Montibeller B., Muru M., Kmoch A. Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM) // Remote Sens. 2020. V. 12:3482. https://doi.org/10.3390/rs12213482

Vaka D.S., Kumar V., Rao Y.S., Deo R. Comparison of Various DEMs for Height Accuracy Assessment Over Different Terrains of India // IGARSS 2019 – 2019, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. July 28–August 2, 2019, Yokohama, Japan. P. 1998–2001. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898492

Yue L., Shen H., Zhang L., Zheng X., Zhang F., Yuan Q. High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations // IS-PRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. V. 123. P. 20–34.

https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.002

Zhusupov N.A., Ha T.V., Dahal T.P., Ashyraliev T.A., Baktybek uulu M. Ocenka tochnosti otkrytyh global'nyh cifrovyh modelej rel'efa [Quality assessment of openly accessible global DEMs] // Vestnik KRSU. 2019. V. 19. № 8. P. 135– 139. (in Russian).