

УДК: 528.88, 556.513

DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-349-365

А.У. Чымыров¹, Д.Т. Чонтоев², Б.М. Жакеев³

**СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА НА ОСНОВЕ
ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
ПРИ УТОЧНЕНИИ ГРАНИЦ БАССЕЙНОВ РЕК
В КОТЛОВИНЕ ОЗЕРА ИССЫК-КУЛЬ**

АННОТАЦИЯ

Важность данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в различных научно-практических исследованиях, в том числе гидрологии, сегодня возрастает. Новые глобальные цифровые модели рельефа (ЦМР) на основе данных космической съёмки служат в качестве основных исходных материалов в гидрологических научных исследованиях из-за их открытости или низкой стоимости, возрастающей точности и улучшения пространственного разрешения. Целями данной работы являются исследование возможностей глобальных цифровых моделей рельефа на основе AW3D30, ASTER GDEM V003 и SRTMGML1 с 30 м пространственным разрешением в моделировании бассейнов рек и оз. Иссык-Куль в Кыргызстане и их сравнительный анализ. Топографические карты района исследований были использованы в качестве источников проверочных данных при анализе их пространственной точности. Было также изучено влияние высот опорных точек над уровнем моря на точность и достоверность моделей в условиях высокогорья. При определении площади бассейна озера были применены системы координат UTM, СК-42, Kurg-06 и равновеликая коническая проекция Альберса. Результаты исследования показали, что ЦМР на основе AW3D30 имеет более высокую точность по сравнению с другими моделями и может быть успешно использована в моделировании бассейнов рек в горных условиях. Площади водосборов рр. Джергалан и Тюп также были смоделированы и рассчитаны на основе AW3D30, ASTER GDEM V003 и SRTMGML1. Полученные данные по границам и площадям бассейнов рек Иссык-Кульской котловины указывает на необходимость дальнейшего их уточнения на основе современных данных ДЗЗ с учётом разностей используемых моделей геоида/квазигеоида и проверочных высот опорных точек, определённых с применением спутникового позиционирования и методов нивелирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЦМР, AW3D30, ASTER GDEM V003, SRTMGML1, бассейн

¹ Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры имени Н. Исанова, ул. Малдыбаева, д. 34 б, 720020, Бишкек, Кыргызская Республика; *e-mail*: chymyrov@gmail.com

² Национальная академия наук Кыргызской Республики, Институт водных проблем и гидроэнергетики, ул. Фрунзе, д. 533, 720033, Бишкек, Кыргызская Республика; *e-mail*: iwp@istc.kg

³ Национальная академия наук Кыргызской Республики, Институт водных проблем и гидроэнергетики, ул. Фрунзе, д. 533, 720033, Бишкек, Кыргызская Республика; *e-mail*: iwp@istc.kg

Akylbek U. Chymyrov¹, Dogdurbek T. Chontoev², Bakyt M. Zhakeev³

**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**

ABSTRACT

The importance of Remote Sensing (RS) in various scientific and practical studies, including hydrology, is increasing today. New Global Digital Elevation Models (DEM), based on satellite imagery, serve as the main resources in hydrological research due to their openness or low cost, increasing accuracy and improved spatial resolution. The main aims of this work are study the capabilities of Global DEMs based on AW3D30, ASTER GDEM V003 and SRTMGML1 with 30 m spatial resolution in modeling basins of rivers and Issyk-Kul Lake in Kyrgyzstan and their comparative analysis. Topographic maps of the study area were used as sources of verification data when analyzing their spatial accuracy. The influence of the reference point heights above sea level on the accuracy and reliability of the models in high mountainous conditions was also studied. UTM, SK-42, Kyrg-06 and the Albers Equal-Area Conic coordinate systems were used in calculations of the lake basin area. The results of the study showed that the AW3D30 DEM has higher accuracy compared to other models and can be successfully used in modeling river basins in mountainous areas. The catchment areas of the Dzhergalan and Tyup rivers were modeled and calculated based on AW3D30, ASTER GDEM V003 and SRTMGML1 DEMs. The research results on boundaries and areas of the river basins in the lake depression indicate the need for further refinement based on modern remote sensing data, taking into account the differences in the geoid/quasigeoid models used and the reference point heights determined using satellite-based positioning and leveling methods.

KEYWORDS: DEM, AW3D30, ASTER GDEM V003, SRTMGL1, basin

ВВЕДЕНИЕ

Информация о рельефе местности необходима при реализации различных проектов, а также при ортотрансформировании данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Важнейшими источниками такой информации являются цифровые модели местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР). ЦММ представляют собой точные данные о высоте земной поверхности, включая здания, растительность и др. высотные объекты, а ЦМР содержат информацию о высоте непосредственно поверхности земли. Глобальные ЦМР и ЦММ строятся в основном по данным стереоскопической оптической и интерферометрической радиолокационной космической съёмки.

Существует большое количество глобальных моделей рельефа на основе бесплатных или коммерческих данных дистанционного зондирования Земли, такие как GMTED2010, ASTER GDEM2, SRTM C-band, SRTM X-band, SPOT DEM, NextMap World 30, TanDEM-X Global DEM, World 3D Topographic Data, WorldDEM и др. В данном исследовании для моделирования и уточнения бассейнов рек были использованы ЦМР на основе спутниковых снимков, размещённые в открытом доступе, к которым относятся

¹ Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov, Maldybaev str., 34 b, 720020, Bishkek, Kyrgyz Republic; *e-mail*: chymyrov@gmail.com

² National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Institute of Water Problems and Hydropower, Frunze str., 533, 720033, Bishkek, Kyrgyz Republic; *e-mail*: iwp@istc.kg

³ National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Institute of Water Problems and Hydropower, Frunze str., 533, 720033, Bishkek, Kyrgyz Republic; *e-mail*: iwp@istc.kg

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) и ALOS (Advanced Land Observing Satellite).

Имеется ряд исследований по использованию и анализу различных ЦМР на основе данных космической съёмки. Изучение имеющихся сравнительных исследований разных цифровых моделей рельефа показали, что сопоставление данных различных исследований усложняется в связи с разными версиями сравниваемых ЦМР, разными видами проверочных данных, разными типами ландшафтов и землепользования, а также разностью методики оценки пространственной точности моделей. Некоторые исследования показали, что новая версия SRTM v3.0 может иметь сравнительно высокую горизонтальную и вертикальную точность, по сравнению с ЦМР на основе ASTER [Мальцев и др., 2018; Patel и др., 2016; Drisya, Kumar, 2016]. Исследования по сравнению ЦМР на основе AW3D30 с др. моделями показывают её относительно высокую горизонтальную и вертикальную точность в сопоставлении с моделями на основе данных SRTM и ASTER соответствующего пространственного разрешения [Jain et al., 2018; Козуб, 2018; Courty et al., 2019; Жусупов и др., 2019; Tavares da Costa et al., 2019].

В горных условиях спутниковые радарные снимки имеют свои недостатки, которые обусловлены неразмеченными пикселями (voids или NoData) и искажениями из-за влияния горных вершин на результаты наклонной съёмки со спутников, постоянной облачности и сильным влиянием наклона и экспозиции поверхности, ущелий, речной сети и дорог. Каждая спутниковая система имеет свои особенности, которые зависят от местоположения определённого района изучения и требуют тщательного исследования для каждого случая [Семакова, 2015; Fujita et al., 2008; Kolecka, Kozak, 2014; Yue et al., 2017].

С учётом многогранного характера управления водными ресурсами мира многие страны и регионы внедряют интегрированный подход в управление водными ресурсами на бассейновом уровне. Это способствует более эффективной реализации принципов интегрированного управления водными ресурсами в бассейнах рек, озёр и водоносных формаций¹ [Орифов, 2019; Савина, 2014].

Объектом настоящего исследования является Иссык-Кульская котловина в Кыргызстане, которая с севера и юга ограничена хребтами Кунгей и Тескей Ала-Тоо, имеет длину с востока на запад около 240 км, ширину 100 км. Центральную часть котловины занимает оз. Иссык-Куль. Озеро расположено на высоте 1608 м н.у.м., площадь озера — 6247 км², глубина — 668 м, длина — 177 км, ширина — 60 км. В бессточное озеро впадает до 80 больших и сравнительно небольших притоков; из них наибольшими являются рр. Джергалан и Тюп, впадающие с востока. Питание рек бассейна озера смешанное, с преобладанием талого стока — снегового и ледникового [Романовский и др., 2005; Маматканов и др., 2006].

Озеро окружено равниной, узкая береговая полоса покрыта песком, реже галечником, местами сложена сцементированным песчаником, на отдельных участках заболочена. Равнина простирается на 40–50 км восточнее озера по долинам рр. Тюп и Джергалан. На северном берегу её ширина от 1 до 10 км, на западном — 10–15 км. Длина хр. Кунгей Ала-Тоо — 280 км. Гребень хребта расположен на высоте 3800–4000 м н.у.м. Высшая точка — г. Чоктал (4771 м). Центральная часть хребта лежит выше снеговой линии, поэтому здесь встречаются небольшие снежники и ледники. Длина хр. Тескей Ала-Тоо — 350 км; его высокая часть расположена в верховьях рр. Ак-Суу и Кара-Кель, где сосредоточено много ледников. К югу от Тескей Ала-Тоо преобладают волнистые пространства в окружении хребтов, покрытых вечными снегами и ледниками [Маматканов и др., 2006].

¹ Водный Кодекс Кыргызской Республики (№ 8 от 12 января 2005 г.)

Самый крупный приток озера — р. Жыргалан со своими притоками формирует сток в восточной части северного склона хр. Тескей Ала-Тоо на водосборе площадью 2070 км² [Романовский и др., 2005]. Протекая по этому склону, который переходит в длинную пологую предгорно-приозёрную равнину, река впадает в одноимённый залив. Её крупные притоки Тургон, Ак-Суу, Бозучук, Жергез и Ак-Суу (Арашан) по своей водности сопоставимы с другими самостоятельными реками бассейна. Суммарный среднегодовой расход воды речной системы Джергалана составляет 21,4 м³/сек., принося при этом в озеро 17 % всего годового притока (0,67 км³/год).

Вторая по величине река Тюп, протекающая севернее Джергалана, также впадает в озеро на востоке котловины. Её верховья начинаются на склоне Тескей Ала-Тоо, но значительные её правые притоки — Шаты, Кёчю, Талды-Суу, Корумду, Табылгыты — формируются на южных склонах Кюнгей Ала-Тоо. Вклад реки в годовой приток в озеро оценивается в 9 % (0,35 км³/год).

Основной целью данного исследования является уточнение границ и площадей водосбора рр. Тюп, Джергалан и оз. Иссык-Куль с применением современных ЦМР. В настоящее время в научных исследованиях и в решении прикладных задач используется площадь бассейна оз. Иссык-Куль, равная 22080 км², р. Джергалан — 2070 км² и р. Тюп — 1180 км² [Романовский и др., 2005]. Имеющиеся границы и площади водосборных бассейнов были определены по результатам обработки аналоговых картографических материалов с использованием традиционных методов фотограмметрии и требуют уточнения. Данные дистанционного зондирования Земли и полученные на их основе современные ЦМР позволяют моделировать бассейны рек с целью их уточнения и расчёта площадей с использованием геоинформационных систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Важнейшими источниками пространственной информации в гидрологических исследованиях сегодня являются цифровые модели рельефа (ЦМР). Данные разных систем дистанционного зондирования Земли были выбраны в качестве основного источника для сравнительного изучения в районе исследований, ограниченного по широте от 41°24'45,3"с.ш. до 43°00'15,9"с.ш. и по долготе от 74°59'46,7"в.д. до 79°37'01,1"в.д. (рис. 1).

Основной характеристикой цифровых моделей рельефа на основе данных дистанционного зондирования Земли, определяющей точность моделирования морфометрических особенностей местности, является ошибка определения абсолютной высоты. Имеются много сравнительных исследований ошибок определения абсолютных высот разных цифровых моделей рельефа, но сопоставление данных различных исследований усложняется в связи с разными версиями сравниваемых ЦМР, разными видами проверочных данных, разными типами ландшафтов и землепользования, а также разностью методики оценки ошибок высот.

Цифровые модели рельефа (ЦМР) района исследований были смоделированы на основе мозаики сцен из снимков AW3D30 и новых версий ASTER и SRTM. Сопоставлять данные различных исследований довольно сложно из-за использования разных версий тестируемых ЦМР, разных видов проверочных данных, разных типов ландшафтов и растительности тестируемых участков, а также разной методики оценки ошибок высот. В данной работе в качестве проверочных данных были использованы отметки 2640 точек, определённые на 15 топографических картах масштаба 1: 100 000 на район исследований, расположенный в высокогорном регионе Центральной Азии.

Данные SRTM получены в результате Международного исследовательского проекта Национального управления Соединённых Штатов Америки по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA), Национального агентства геопространственной разведки США (NGA), Итальянского космического агентства (ASI)

и Германского центра авиации и космонавтики (DLR). Многоцветный космический корабль Shuttle «Endeavour» с сенсорами SIR-C/X-SAR (Shuttle Imaging Radar — type C / X-band Synthetic Aperture Radar) проводил измерения в трёх каналах микроволн (L, C и X) в феврале 2000 г. Сенсор X-SAR собрал данные высокого разрешения (1 угловая секунда или примерно 30 м на местности), которые позволили создать модель SRTM-X DEM на основе данных канала X. Их получение стало возможным с 2010 г. через FTP службы of DLR. Новая версия SRTM (Version 3.0 — SRTMGL1) в формате GeoTIFF доступна с января 2015 г. через веб-портал Геологической службы США (USGS) для геопространственных данных¹.

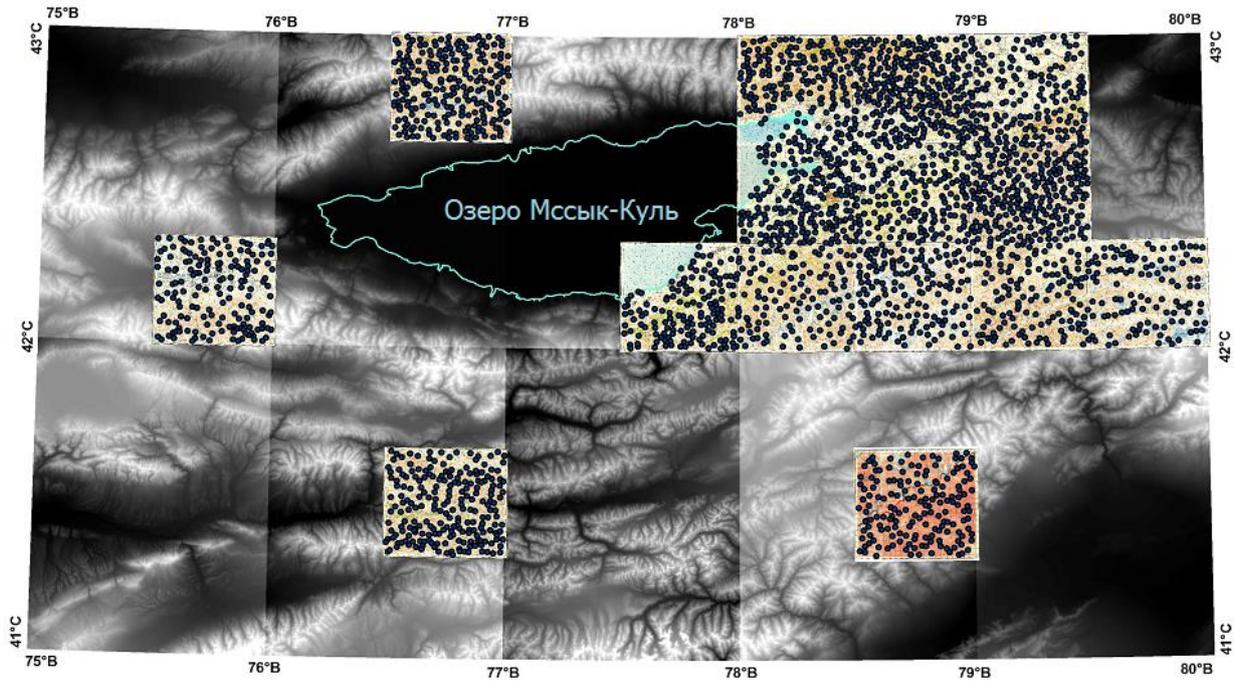


Рис. 1. Снимки ASTER для района исследований с топографическими картами и опорными точками
Fig. 1. ASTER scenes for the study area with topographic maps and reference points

Сенсор ASTER был разработан совместно Министерством экономики, торговли и промышленности Японии (METI) и NASA. Он запущен на борту спутника NASA Terra в декабре 1999 г. Сенсор имеет возможность стереоскопической съёмки вдоль полосы пролёта с помощью двух телескопов, снимающих в нади́р и назад в ближнем инфракрасном диапазоне с отношением база-высота (base-to-height ratio) — 0,6. Пространственное разрешение в плане — 15 м. Одна сцена ASTER в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне имеет размер 4100 на 4200 элементов, что соответствует 60x60 км на поверхности Земли. Первая версия ASTER GDEM была представлена в свободном доступе в 2009 г. Данные высот поверхности Земли между 83°с.ш. и 83°ю.ш. доступны в виде файлов сцен формата GeoTIFF с размерами 1° x 1° и разрешением, равным 1" (угл. сек., примерно 30 м). Глобальная цифровая модель рельефа 3-ей версии 3 ASTER (GDEM V003) и наборы данных водных объектов (ASTWBD) находятся в открытом доступе с 5 августа 2019 г.²

¹ Электронный ресурс: <https://search.earthdata.nasa.gov/search> (дата обращения 10.12.2019)

² Электронный ресурс: http://gdemdl.aster.jspacesystems.or.jp/index_en.html (дата обращения 10.12.2019)

В мае 2015 г. Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) выпустило открытую глобальную цифровую модель рельефа “ALOS World 3D-30m (AW3D30)” с горизонтальным разрешением по широте и долготе в 1” (примерно 30 м). AW3D30 разработана Японским центром технологий дистанционного зондирования (RESTEC) и корпорацией NTT DATA на основе данных, полученных с японского спутника исследования Земли ALOS (Advanced Land Observing Satellite) с помощью установленной на нём оптико-электронной системы (PRISM). В свободном доступе находится продукт AW3D30 в формате GeoTIFF с размерами ячейки на местности 30 м (в коммерческой версии размер ячейки составляет 5 м)¹.

Цифровые модели рельефа (ЦМР) района исследований были смоделированы на основе мозаики сцен из материалов ALOS, ASTER и SRTM (табл. 1). Все три ЦМР имеют высоты их поверхностей, вычисленные над гравитационной моделью Земли EGM96.

Табл. 1. *Использованные материалы дистанционного зондирования Земли*
Table 1. *Used Earth remote sensing products*

Наименования спутника, сенсора и модели	Сцены спутникового снимка	Разрешение, " /м
Спутник ALOS, сенсор PRISM, модель ALOS World 3D-30m (AW3D30)	N041E075_AVE_DSM.tif – N041E079_AVE_DSM.tif, N042E075_AVE_DSM.tif – N042E079_AVE_DSM.tif	1/30
Спутник Терра (EOS AM-1), сенсор ASTER, модель ASTER GDEM Version 3	ASTGTMV003_N41E075_dem.tif – ASTGTMV003_N41E079_dem.tif, ASTGTMV003_N42E075_dem.tif – ASTGTMV003_N42E079_dem.tif	1/30
Многоразовый космический корабль «Индевор», миссия SRTM, модель SRTMGL1	n41_e075_1arc_v3.tif – n41_e079_1arc_v3.tif, n42_e075_1arc_v3.tif – n42_e079_1arc_v3.tif	1/30

Обработка пространственных данных была выполнена с использованием программных комплексов ArcGIS 10.4 и ENVI 5.1 с созданием баз геоданных. В качестве основной была выбрана зональная система координат WGS_1984_UTM_Zone_44N (EPSG:32644). Также была использована зональная система координат Pulkovo_1942_GK_Zone_14 (СК-42, EPSG:28413) для сравнительного анализа площадей цифровых моделей бассейна оз. Иссык-Куль с историческими данными. Площадь бассейна озера рассчитана также с использованием равновеликой конической проекции Альберса (Asia_North_Albers_Equal_Area_Conic, EPSG:102025) с минимальными искажениями площадей объектов. Результаты работы оформляются в виде тематических карт в государственной зональной системе координат Kyrg-06_TM_Zone_4 (EPSG:7695), что требуется по национальному законодательству [Abdiev, Chumurov, 2013].

Перед гидрологическим моделированием необходимо анализировать каждую ЦМР с использованием инструмента «Локальные понижения» модуля «Гидрология» ArcGIS 10.4 для выявления ячеек с неопределённым направлением стока. Результаты анализа показали, что имеются локальные понижения на всех спутниковых снимках, что потребовало использования инструмента «Заполнение» этого же модуля для устранения этих недостатков растровых поверхностей. Далее направление стока с каждого пикселя изображения было определено с использованием инструмента анализа «Направление стока». Полученный слой имеет определённых кодов направления стока 1-2-4-8-16-32-64-128, что позволяет далее моделировать речную сеть и их бассейнов.

¹ Электронный ресурс: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm> (дата обращения 10.12.2019)

Моделирование границ бассейнов рек района исследований выполнено с использованием инструмента «Бассейн» и речной сети с использованием инструмента «Суммарный сток» модуля «Гидрология» и инструмента пространственного анализа «Калькулятор раstra» программного комплекса ArcGIS. При моделировании суммарного стока не были учтены грунтовые условия, ледниковое питание и пр. параметры для точного моделирования стока, но, тем не менее, такая модель позволяет оцифровать речную сеть с достаточно высокой точностью для дальнейшего пространственного анализа.

Оценка точности полученных цифровых моделей рельефа на основе данных дистанционного зондирования производилась в основном путём вычисления вертикальной средней квадратической ошибки — RMSE (Root Mean Square Error) и арифметической средней абсолютных величин вертикальных ошибок высот сравниваемых поверхностей в опорных точках [Congalton, Green, 2009]:

$$\text{RMSE}_v = \sqrt{\sum_i^n (e_{vi})^2 / n}, \quad (1)$$

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

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

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

n — количество опорных точек.

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

$$|\bar{e}_v| = \sum_i^n |\bar{e}_{vi}| / n. \quad (2)$$

Стандартное отклонение вертикальных ошибок определяется по формуле

$$S_v = \sqrt{\sum_i^n (e_{vi} - \text{RMSE}_v)^2 / (n - 1)}. \quad (3)$$

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

$$\text{RMSE}_v \pm Z_i(S_v). \quad (4)$$

В этом случае формула для 95 % доверительного интервала принимает вид

$$\text{RMSE}_v \pm 1,96(S_v). \quad (5)$$

Если RMSE_v будет равно нулю, то возможная ошибка с 95 %-ной вероятностью будет равна $\pm 1,96(S_v)$. При 90 %-ном доверительном интервале она будет равна $\pm 1,645(S_v)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные цифровые модели бассейнов рек, впадающих в оз. Иссык-Куль, говорят о том, что имеется очень большое количество бассейнов больших и малых рек, а также засыхающих русел, что требует дальнейшего их выделения и уточнения. Определение бассейнов рек котловины оз. Иссык-Куль выполнено с использованием инструментов анализа и операций наложения векторных слоёв бассейнов рек с

имеющимся векторным слоем озера. В результате слияния границ водосборов рек в котловине озера получены векторные слои с оцифрованными границами водосбора оз. Иссык-Куль для каждой цифровой модели рельефа. Надо отметить, что 3 участка границ водосбора требуют более детального анализа причин их значительного отличия (рис. 2).

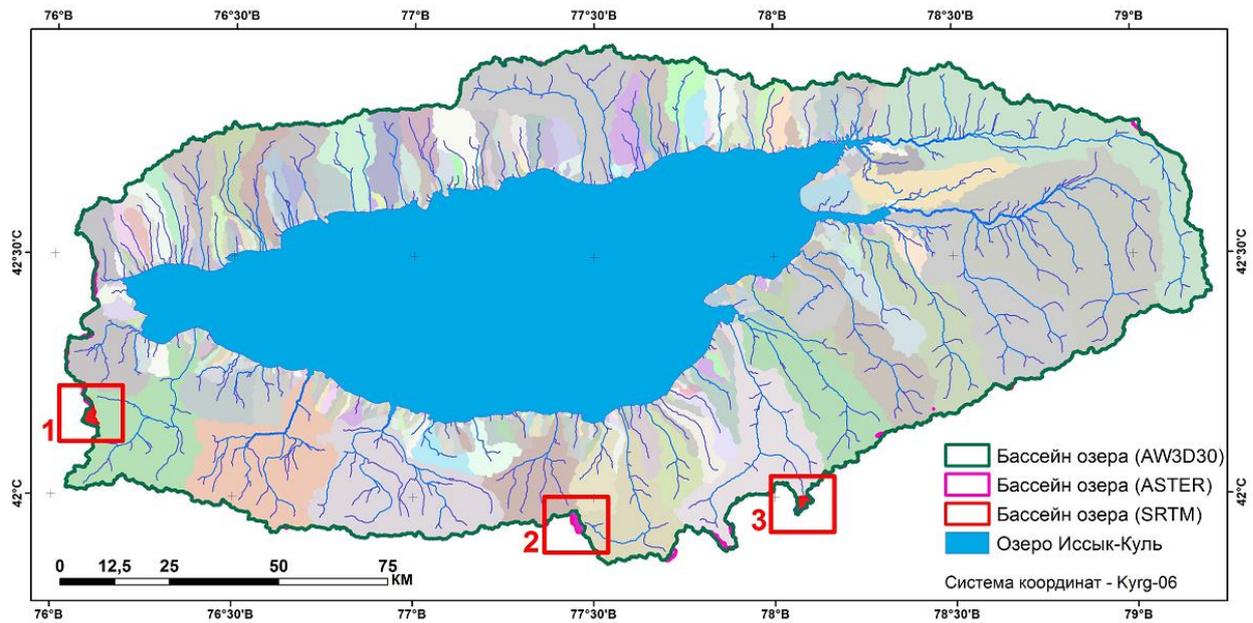


Рис. 2. Бассейны рек и озера Иссык-Куль
Fig. 2. River basins in the Issyk-Kul Lake depression

Табл. 2. Статистические параметры сравниваемых ЦМР
Table 2. Statistical values of the compared DEMs

Наименования ЦМР	Вертикальная средняя квадратическая ошибка — $RMSE_v$, м	Вертикальная арифметическая средняя ошибка — \bar{e}_v , м
AW3D30	51,83	34,14
ASTER GDEM V003	54,47	36,74
SRTMGL1	55,08	37,51

Для оценки качества полученных цифровых моделей рельефа были определены высоты сравниваемых поверхностей в 2640 опорных точках для их сравнения с отметками этих точек на топографических картах. Восходящие линии тренда на графиках показывают, что средняя точность использованных ЦМР ухудшается с возрастанием высоты точек над уровнем моря (рис. 3). Большой разброс высот некоторых опорных точек на разных ЦМР показывает, что крутые склоны, ущелья и сложная экспозиция склонов высокогорной местности почти одинаково влияют на точность данных спутниковых систем. Тем не менее относительная точность ЦМР на основе AW3D30 выше, что также подтверждается более низкой вертикальной средней квадратической ошибкой поверхности (табл. 2).

По статистическим показателям точности полученных цифровых моделей рельефа на основе данных дистанционного зондирования Земли можно отметить, что ЦМР AW3D30 имеет минимальную среднюю квадратическую ошибку, равную 51,83 м и стандартное отклонение вертикальных ошибок, равное 49 м для всех 2640 опорных точек. На рис. 3 можно заметить, что высоты некоторых опорных точек, вычисленных на поверхностях всех 3-х ЦМР, имеют экстремально большие ошибки (100–300 м). Это можно объяснить отрицательным влиянием крутых склонов горных вершин, наличием глубоких ущелий и большими углами наклона и экспозиции горных склонов относительно направления спутниковой съёмки.

Для более детального анализа полученной большой величины средней квадратической ошибки измерений все 2640 опорные точки были сгруппированы по их абсолютным высотам над средним уровнем моря (табл. 3). Из них 360 точек (14 %) находятся на высоте 1608–2000 м, 685 точек (26 %) — на высоте 2001–3000 м, 950 точек (36 %) — на высоте 3001–4000 м, 589 точек (22 %) — на высоте 4001–5000 м и 56 точек (2 %) — выше 5001 м над средним уровнем Балтийского моря (система высот БСВ-1977).

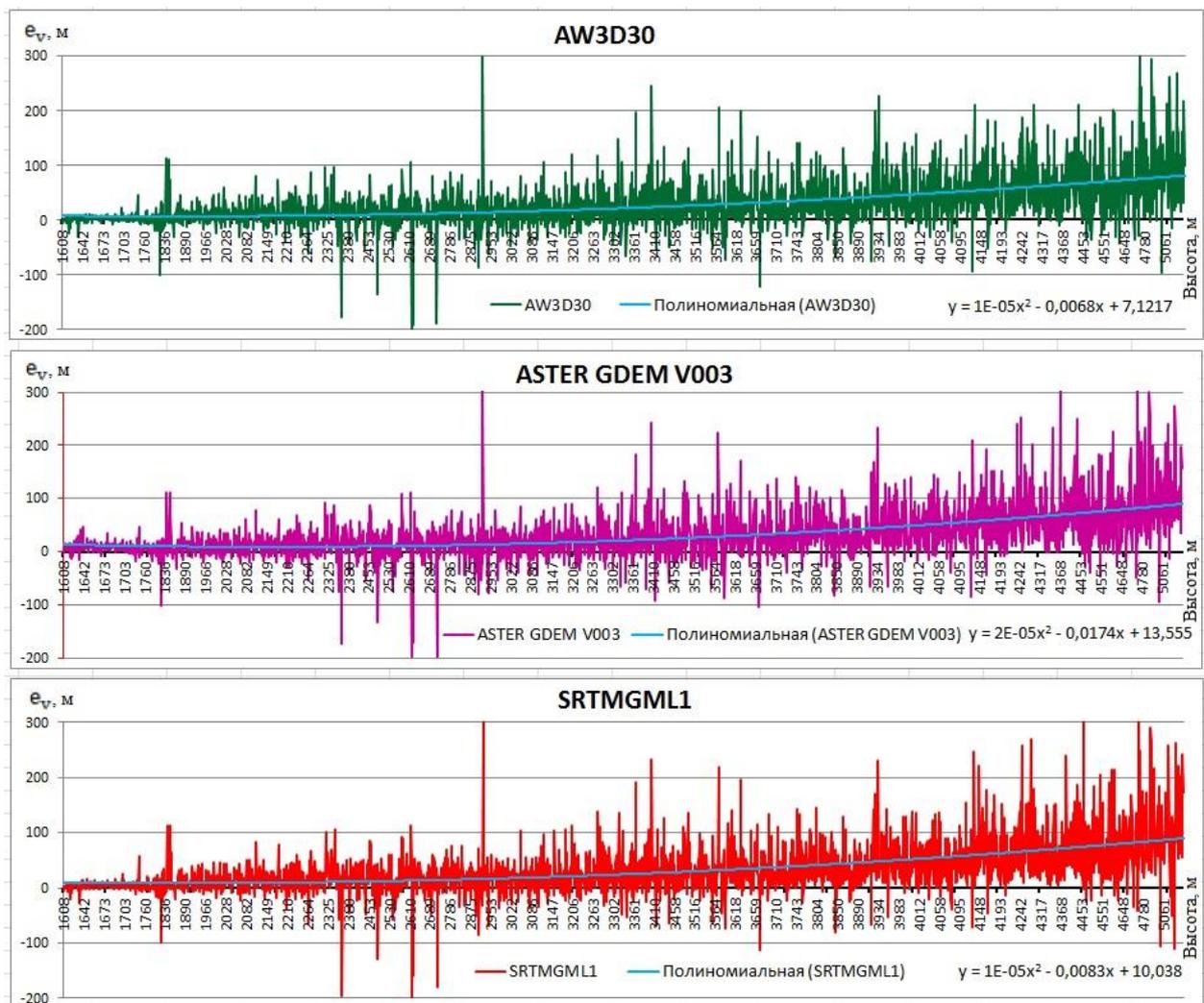


Рис. 3. Графики отклонений величин вертикальных ошибок высот сравниваемых поверхностей в опорных точках
 Fig. 3. Graphs of deviations of vertical height errors of the compared surfaces at the reference points

Табл. 3. Изменение величин $RMSE_v$ и \bar{e}_v по высотам опорных точек
 Table 3. Variations of $RMSE_v$ and \bar{e}_v values by the reference points' elevation

Наименования цифровой модели рельефа	Вертикальная средняя квадратическая ошибка — $RMSE_v$, м					Вертикальная арифметическая средняя ошибка — \bar{e}_v , м				
	1608–2000	2001–3000	3001–4000	4001–5000	5001–6205	1608–2000	2001–3000	3001–4000	4001–5000	5001–6205
AW3D30	10,6	32,7	42,3	77,9	116,7	7,5	21,1	32,6	62,1	99,1
ASTER GDEM V003	12,6	33,0	46,4	83,4	122,2	11,7	22,0	34,3	66,6	107,0
SRTMGL1	11,3	33,4	47,2	84,1	124,7	8,7	23,0	35,5	68,3	112,0

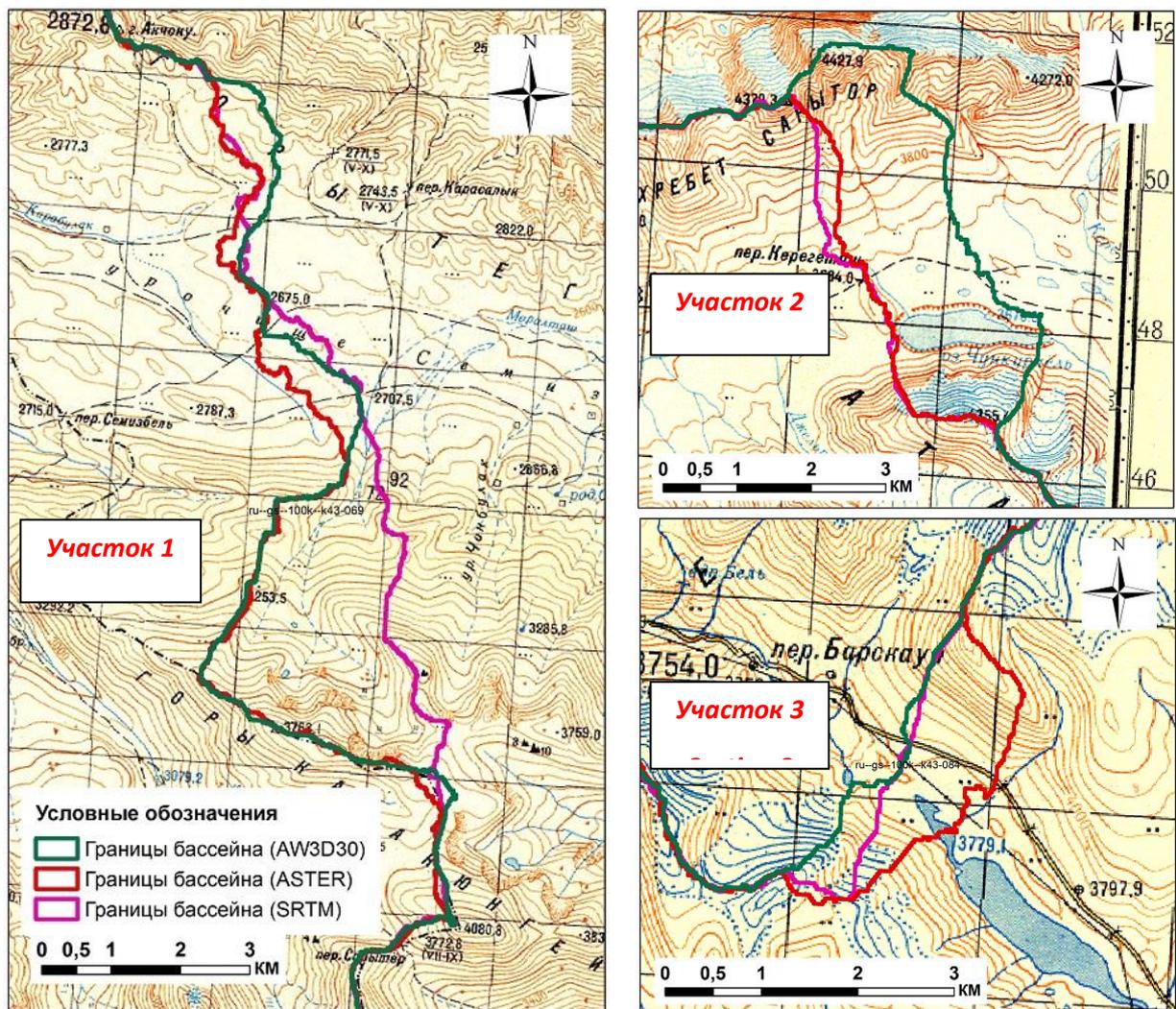


Рис. 4. Участки границы бассейна озера на основе данных ДЗЗ и топографических карт масштаба 1: 100 000

Fig. 4. Sections of the lake basin boundaries based on RS data and topographic maps on a scale of 1: 100 000

ЦМР AW3D30 имеет наименьшие величины $RMSE_v$ и \bar{e}_v на всех высотных интервалах опорных точек. В относительно равнинных условиях на высоте 1608–2000 м над средним уровнем моря все три вида ЦМР имеют показатели вертикальных ошибок в

пределах их заявленных точностей. Относительные высокие средние квадратические ошибки ЦМР возникают также из-за значительной разницы использованных цифровых моделей геоида и квазигеоида на территории Кыргызстана [Chymurov, Bekturov, 2019].

При визуальном сравнении цифровых моделей с рельефом и ситуацией на имеющихся топографических картах можно заметить, что горизонтальная точность границ водосборов рек в условиях сильно пересечённых горных условий может отличаться на километры. Это различие заметно на рис. 4, где разными цветами на топографических картах показаны участки с наиболее отличающимися границами бассейна озера, определённые на основе спутниковых данных. Участок 1 находится на пересечённой горной местности, и граница бассейна на основе снимка SRTM пересекает речку в отличие от других ЦМР. На участке 2 граница бассейна на основе данных AW3D30 пересекает поверхность ледникового озера из-за сложного горного рельефа. А на участке 3 граница бассейна на основе снимка ASTER также проходит на поверхности водоёма.

Из-за его большого размера площадь бассейна оз. Иссык-Куль значительно искажается на картах и требует учёта влияния разных картографических проекций [Yildirim, Kaya, 2008; Виноградов, 2013]. Для уменьшения искажения площади водосбора и учёта разности исходных проекций пространственных данных она была рассчитана с использованием 4-х основных картографических проекций (табл. 4).

Табл. 4. Площадь бассейна оз. Иссык-Куль на разных картографических проекциях
Table 4. Area of the Issyk-Kul Lake basin in different cartographic projections

Обозначения картографических проекций	Площадь бассейна озера по разным ЦМР, км ²		
	AW3D30	ASTER GDEM V003	SRTMGL1
WGS_1984_UTM_Zone_44N	21951,90	21954,07	21942,55
Pulkovo_1942_GK_Zone_14	21970,22	21972,39	21960,86
Kyrg-06_TM_Zone_4	21925,45	21927,61	21916,12
Asia_North_Albers_Equal_Area_Conic	21923,13	21925,29	21913,79

Все картографические проекции моделируют поверхность Земли на горизонтальную плоскость с искажениями. В данном случае равновеликая коническая проекция Альберса даёт площадь бассейна оз. Иссык-Куль с минимальными искажениями. Это же площадь на основе ЦМР AW3D30 и ASTER GDEM V003 отличается на 2–3 км² при всех картографических проекциях. Площадь бассейна на ЦМР SRTMGL1 имеет разницу от 9–10 км² во всех проекциях по сравнению с поверхностью AW3D30.

Площадь бассейна озера в Единой государственной трёхградусной зональной системе координат Kyrg-06 немного (2,3 км²) больше от её площади, рассчитанной в равновеликой проекции, но в то же время она значительно отличается от площади бассейна в проекциях UTM (26,4 кв. км) и СК-42 (44,8 км²). В дальнейших исследованиях и в решении прикладных задачах рекомендуется применять площадей бассейнов рек и озёр на территории Кыргызстана в системе координат Kyrg-06.

При уточнении границы бассейна озера на основе данных AW3D30 все недостоверные участки границы далее были исправлены на основе очертаний бассейна, определённых по другим ЦМР и по топографическим картам. Площади бассейна озера Иссык-Куль, определённые на всех ЦМР на разных картографических проекциях, значительно отличаются от её величины, используемой в настоящее время в статистических и научно-исследовательских материалах, которая равна 22080 км² [Маматканов и др., 2006].

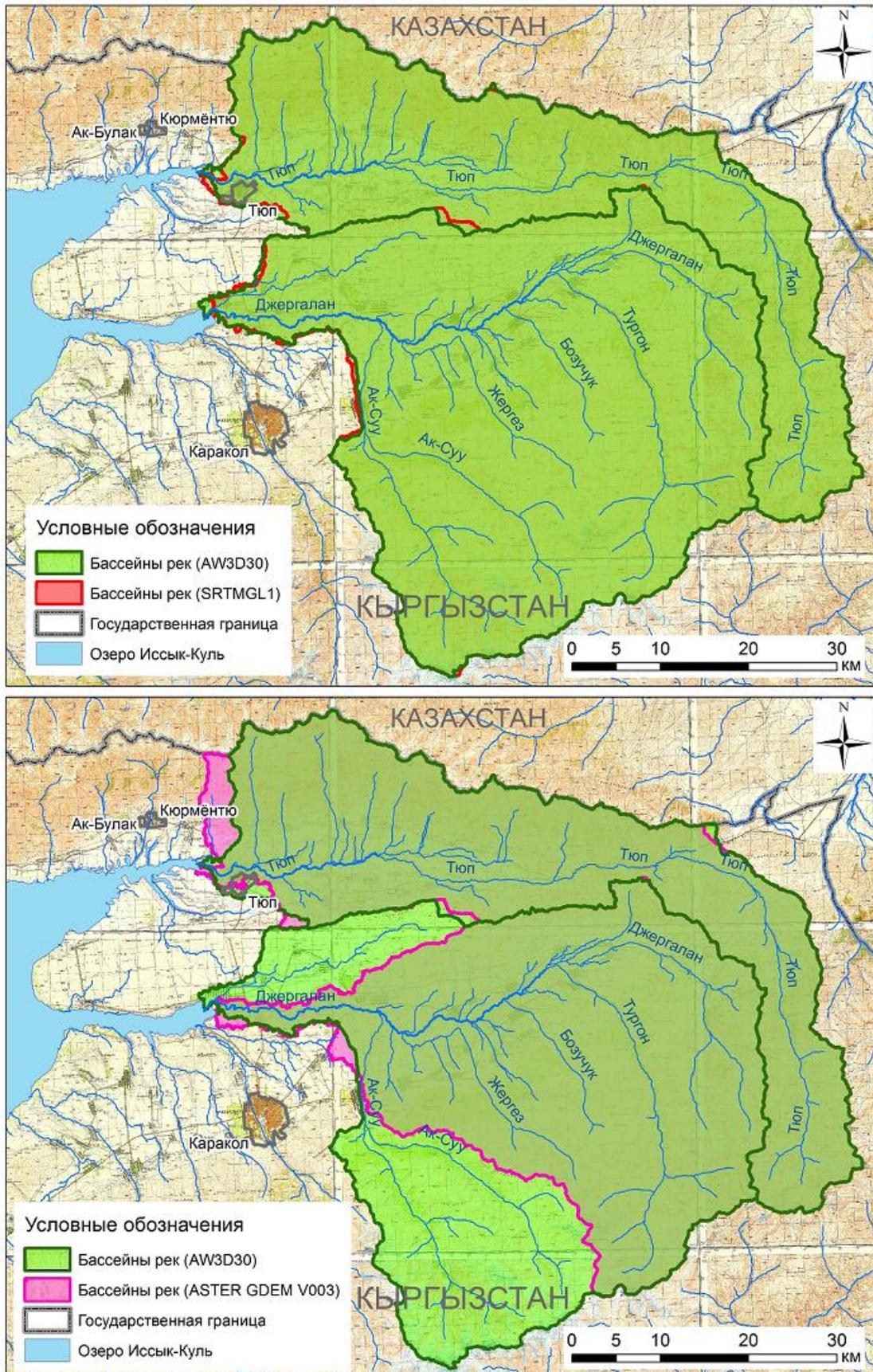


Рис. 5. Границы бассейнов рек Джергалан и Тюп по разным ЦМР
Fig. 5. Boundaries of the Dzhergalan and Tyup river basins on the different DEM

Площадь бассейна озера, определённая по ЦМР AW3D30 в системе координат 1942 г. (Pulkovo_1942_GK_Zone_14), на 180 км² (0,5 %) меньше от официально используемой её величины и в некоторых местах старые и новые границы бассейна отличаются до 16 км на горизонтальной плоскости. После визуального анализа и сравнения границ бассейна с рельефом местности по топографическим картам было внесено исправление в границы бассейна на основе ЦМР AW3D30 на участке 2 (рис. 4) по ЦМР SRTMGML1 и, следовательно, площадь бассейна увеличена на 8,1 км² в государственной системе координат Кург-06 и составляет 21934 км².

Результаты проведённых исследований показали, что все три модели имеют относительно одинаковые показатели точности в горизонтальной плоскости. В вертикальной плоскости в равнинных условиях они обеспечивают их заявленные точности. В сильно пересечённых условиях горных регионов они имеют большие ошибки в вертикальном направлении из-за крутых склонов, ущелий и сложной экспозиции горной местности, влияющих на качество наклонной съёмки со спутников.

Границы бассейнов рек Тюп и Джергалан также были смоделированы на основе данных AW3D30, ASTER GDEM V003 и SRTMGML1. На каждой модели были определены точки устьев двух рек и далее были рассчитаны соответствующие границы и площади водосбора каждой реки (рис. 5). Устье реки Тюп находится северо-восточнее с. Тюп и имеет географические координаты 42°44'45,5"с.ш. и 78°18'24,2"в.д. для ЦМР AW3D30. Устье реки Джергалан для этой модели с координатами 42°35'30,356"с.ш. и 78°18'51,965"в.д. находится западнее створа автодорожного моста через реку.

Сравнение величины рассчитанных площадей бассейнов рек показали, что ЦМР на основе данных AW3D30 и SRTMGML1 имеют сравнительно меньшую разницу (табл. 5). Например, площадь бассейна реки Джергалан на ЦМР SRTMGML1 составляет 2147,06 км², что на 7,38 км² (0,3 %) больше, чем площадь бассейна реки на ЦМР AW3D30. В то же время площадь бассейна реки Джергалан на ЦМР ASTER GDEM V003 (1467,03 км²) на 672,65 км² (31,4 %) меньше, чем площадь бассейна реки, определённая на ЦМР AW3D30.

Табл. 5. Площади бассейнов рек в картографической проекции Кург-06
Table 5. Watershed areas of rivers in the cartographic projection Kurg-06

Наименование рек	Площади бассейнов рек по разным ЦМР, км ²		
	AW3D30	ASTER GDEM V003	SRTMGML1
р. Джергалан	2139,68	1467,03	2147,06
р. Тюп	1206,61	1229,48	1198,04

Визуальная проверка точности векторизованных границ водосбора и линий водотоков каждой реки по трём цифровым моделям, по рельефу местности и речной сети на топографических картах также показали, что ЦМР AW3D30 является лучшей среди сравниваемых моделей. Данные SRTMGML1 точнее дают границ бассейнов и линий водотока рек по сравнению с ЦМР на основе ASTER GDEM V003.

Уточнённая площадь водосбора реки Джергалан по данным AW3D30 составляет 2140 км², что на 70 км² больше от используемой в настоящее время площади, равной 2070 км² (+3,4 %). Площадь водосбора реки Тюп составляет 1207 км², что больше на 27 км² от его официально принятой площади, равной 1180 км² (+1,1 %).

В данной исследовательской работе не были учтены различия поверхностей разных исходных эллипсоидов и моделей геоида, а также влияние растительности на точность цифровых моделей. В дальнейших исследованиях требуется определить высот опорных

точек на основе единой модели геоида для более точного анализа цифровых моделей рельефа на основе данных разных систем дистанционного зондирования Земли.

ВЫВОДЫ

Проведённое исследование показывает, что современные технологии дистанционного зондирования Земли и геоинформационные системы позволяют определять границ бассейнов рек и озёр с точностью до десятков метров. Это даёт огромную возможность научно-практическим исследованиям в области гидрологии, в управлении водными ресурсами и изучении окружающей среды.

В результате сравнительного анализа результатов моделирования на основе разных открытых данных спутниковых систем сегодня можно отметить, что ЦМР на основе AW3D30 является наиболее подходящей для гидрологических исследований и уточнения площадей и границ бассейнов рек и озёр в условиях высокогорья на территории Кыргызстана. После внесённых исправлений и уточнения площадь бассейны озера на основе открытых данных AW3D30 составляет 21 934 км², и она может быть использована в дальнейшей научно-практической деятельности взамен используемой сегодня площади бассейна, равной 22 080 км². Уточнённые границы и площади водосборов рр. Джергалан и Тюп по данным AW3D30 составляют 2140 км² и 1207 км² соответственно, что также отличается от используемых данных в настоящее время.

Результаты исследовательской работы позволяют делать вывод о необходимости уточнения границ и бассейнов рек на территории Кыргызстана на основе данных дистанционного зондирования Земли. Требуется комплекс исследований, основанных на применении открытых и коммерческих данных различных систем дистанционного зондирования Земли для официального изменения границ и площадей речных бассейнов. Для дальнейших исследований рекомендуется уточнение площади и границ бассейна оз. Иссык-Куль на основе данных ДЗЗ с учётом разницы используемых гравитационных моделей Земли и влияния растительности. Использование большого количества опорных точек с высотными отметками, определёнными с применением Глобальных навигационных спутниковых систем, в дальнейшем повысит точность и надёжность цифровых моделей рельефа на основе открытых данных ДЗЗ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность NASA и METI за использованные данные SRTMGL1 и ASTER GDEM, а также команду исследовательского проекта ALOS JAXA за данные AW3D30 и оказанную консультационную поддержку.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank NASA and METI for the used SRTMGL1 and ASTER GDEM, as well as JAXA ALOS Project Team for AW3D30 imagery and provided support.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов А.В.* Вычисление площадей территорий на разных эллипсоидах. Геодезия и картография, 2013. № 3. С. 11–15.
2. *Жусупов Н.А., Ха Т.В., Дахал Т.П., Ашыралиев Т.А., Бактыбек У.М.* Оценка точности открытых глобальных цифровых моделей рельефа. Вестник Кыргызско-Российского Славянского Университета, 2019. Т. 19. № 8. С. 135–139.
3. *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. DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-3-96-102.

4. Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М. Цифровые модели рельефа и их использование в расчётах темпов смыва почв на пахотных землях. Учёные записки Казанского Университета. Серия естественные науки, 2018. Т. 160. Кн. 3. С. 514–530.
5. Маматканов Д.М., Бажанова Л.В., Романовский В.В. Водные ресурсы Кыргызстана на современном этапе. Бишкек: Илим, 2006. 276 с.
6. Орифов Р. Возможности интегрированного управления водными ресурсами в Республике Таджикистан. Вестник технологического университета Таджикистана, 2019. № 2 (37). С. 127–132.
7. Романовский В.В., Кузьмиченок В.А., Маматканов Д.М., Подрезов А.О. Все об озере Иссык-Куль. Бишкек: Издательство Кыргызско-Российского Славянского Университета, 2005. 406 с.
8. Савина А.М. Межгосударственное сотрудничество по управлению трансграничными водными ресурсами. Вестник Оренбургского государственного университета, 2014. № 4 (165). С. 117–121.
9. Семакова Э.Р. Предварительные результаты построения цифровой модели рельефа для некоторых районов Центрального и Западного Тянь-Шаня. Интерэкспо Гео-Сибирь. Материалы Международной научной конференции, 2015. № 4 (1). С. 99–103.
10. Abdiev A., Chymurov A. The Kyrgyz national reference system “Kyrg-06” and GNSS control centre “KyrPOS”. Proceedings of the Central Asia GIS Conference GISCA’13 “Connected regions: societies, economies and environments”, May 2–3, 2013, Almaty, Kazakhstan. Almaty, 2013. P. 85–90.
11. Chymurov A., Bekturov A. Evaluation of the modern Earth Gravitational Models over territory of the Kyrgyz Republic. International Journal of Geoinformatics, 2019. V. 15. No 4. P. 77–83.
12. Congalton R.G., Green K. Assessing the accuracy of remotely sensed data — Principles and practices. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. 183 p.
13. 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. Journal of Flood Risk Management, 2019. V. 12. Iss. S1. DOI: 10.1111/jfr3.12550.
14. 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 Journal of Geosciences, 2016. No 9 (710). DOI: 10.1007/s12517-016-2726-x.
15. 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. Journal of Glaciology, 2008. V. 54. Iss. 185. P. 220–228.
16. 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. Iss. 11. P. 1237–1256. DOI: 10.1080/10106049.2017.1343392.
17. 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 and Applied Geophysics, 2014. No 171 (6). P. 897–912. DOI: 10.1007/s00024-013-0695-5.
18. Patel A., Katiyar K.S., Prasad V. Performances evaluation of different open source DEM using differential global positioning system (DGPS). The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 2016. No 19 (1). P. 7–16.
19. Tavares da Costa R., Mazzoli P., Bagli S. Limitations posed by free DEMs in watershed studies: the case of River Tanaro in Italy. Frontiers of Earth Science, 2019. V. 7 (141). DOI: 10.3389/feart.2019.00141.
20. Yildirim F., Kaya A. Selecting map projections in minimizing area distortions in GIS applications. Sensors, 2008. V. 8 (12). P. 7809–7817.

21. 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. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017. V. 123. January. P. 20–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.002>.

REFERENCES

1. *Abdiev A., Chymyrov A.* The Kyrgyz national reference system “KyrG-06” and GNSS control centre “KyrPOS”. Proceedings of the Central Asia GIS Conference GISCA’13 “Connected regions: societies, economies and environments”, May 2–3, 2013, Almaty, Kazakhstan. Almaty, 2013. P. 85–90.
2. *Chymyrov A., Bekturov A.* Evaluation of the modern Earth Gravitational Models over territory of the Kyrgyz Republic. *International Journal of Geoinformatics*, 2019. V. 15. No 4. P. 77–83.
3. *Congalton R.G., Green K.* Assessing the accuracy of remotely sensed data — Principles and practices. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. 183 p.
4. *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. *Journal of Flood Risk Management*, 2019. V. 12. Iss. S1. DOI: 10.1111/jfr3.12550.
5. *Drisy 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 Journal of Geosciences*, 2016. No 9 (710). DOI: 10.1007/s12517-016-2726-x.
6. *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. *Journal of Glaciology*, 2008. V. 54. Iss. 185. P. 220–228.
7. *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. Iss. 11. P. 1237–1256. DOI: 10.1080/10106049.2017.1343392.
8. *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 and Applied Geophysics*, 2014. No 171 (6). P. 897–912. DOI: 10.1007/s00024-013-0695-5.
9. *Kozub Yu.I.* The Digital elevation model improving for the landscape mapping of the Republic of Dagestan. *Bulletin of Dagestan State Pedagogical University. Natural and Exact Sciences*, 2018. V. 12. No 3. P. 96–102. DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-3-96-102 (in Russian).
10. *Maltsev K.A., Golosov V.N., Gafurov A.M.* Digital elevation models and their use for assessing soil erosion rates on arable lands. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki (Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)*, 2018. V. 160. No 3. P. 514–530 (in Russian).
11. *Mamatkanov D.M., Bazhanova L.V., Romanovsky V.V.* Water resources of Kyrgyzstan at the current stage. Bishkek: Ilim, 2006. 276 p. (in Russian).
12. *Orifov R.* Possibilities of integrated water resources management in the Republic of Tajikistan. *Herald of the Technological University of Tajikistan*, 2019. No 2 (37). P. 127–132 (in Russian).
13. *Patel A., Katiyar K.S., Prasad V.* Performances evaluation of different open source DEM using differential global positioning system (DGPS). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2016. No 19 (1). P. 7–16.
14. *Romanovsky V.V., Kuzmichenok V.A., Mamatkanov D.M., Podrezov A.O.* Everything about Issyk-Kul Lake. Bishkek: Publishing House of the Kyrgyz-Russian Slavic University, 2005. 406 p. (in Russian).
15. *Savina A.M.* International cooperation on the transboundary water resource management. *Vestnik (Herald) of the Orenburg State University*, 2014. No 4 (165). P. 117–121 (in Russian).

16. *Semakova E.R.* Preliminary results of digital elevation modeling for some regions of the Central and Western Tian-Shan. Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of the International Scientific Conference, 2015. V. 5. P. 99–103 (in Russian).
 17. *Tavares da Costa R., Mazzoli P., Bagli S.* Limitations posed by free DEMs in watershed studies: the case of River Tanaro in Italy. *Frontiers of Earth Science*, 2019. V. 7 (141). DOI: 10.3389/feart.2019.00141.
 18. *Vinogradov A.V.* Calculation of areas at different ellipsoids. *Geodesy and Cartography*, 2013. No 3. P. 11–15 (in Russian).
 19. *Yildirim F., Kaya A.* Selecting map projections in minimizing area distortions in GIS applications. *Sensors*, 2008. V. 8 (12). P. 7809–7817.
 20. *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. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017. V. 123. January. P. 20–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.11.002>.
 21. *Zhusupov N.A., Ha T.V., Dahal T.P., Ashyraliev T.A., Baktybek U.M.* Quality assessment of free accessible Global DEMs. *Vestnik KRSU (Herald of the Kyrgyz-Russian Slavic University)*, 2019. V. 19. No 8. P. 135–139 (in Russian).
-