

ГИДРОЛОГИЯ ИЛИМДЕРИ
ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ
HYDROLOGICAL SCIENCES

Чонтоев Д.Т., Чымыров А.У., Жакеев Б.М, Асанакунова Г.

**ЫСЫК-КӨЛДҮН ОЙДУНУНДАГЫ ДАРЫЯЛАРДЫН БАССЕЙНДЕРИН РЕЛЬЕФТИН
САНАРИПТИК АW3D30 МОДЕЛИНИН НЕГИЗИНДЕ МОДЕЛДӨӨ**

Чонтоев Д.Т., Чымыров А.У., Жакеев Б.М, Асанакунова Г.

**ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАССЕЙНОВ РЕК В КОТЛОВИНЕ
ОЗЕРА ИССЫК-КУЛЬ НА ОСНОВЕ ЦМР АW3D30**

D.T. Chontoev, A.U. Chymyrov, B.M. Zhakeev, G. Asanakumova

**DIGITAL MODELING OF THE RIVER BASINS IN THE ISSYK-KUL LAKE
DEPRESSION ON THE BASE OF АW3D30 DEM**

УДК: 556.5+528.88

Бул илимий иш АW3D30 сценаларына негизделген Рельефтин Санариптик Моделинин (PCM) жардамы менен Ысык-Көлдүн ойдуңунда жайгашкан дарыялардын бассейндеринин чектерин жана аянттарын тактоо максатында модель түзүү боюнча аткарылган. Иш учурунда PCMдин вертикалдык жана горизонталдык тактыгын баалоо үчүн 1:100 000 масштабдагы топографиялык карталар да колдонулган. Гео-мейкиндиктик маалыматтарды иштеп чыгуу, алынган натыйжалардын сапатын моделдөө жана талдоо ArcGIS 10.4 программалык комплексинин гидрологиялык анализ жүргүзүү инструменттеринин жардамы менен ишке ашырылган. Изилдөөнүн жыйынтыктарынын негизинде АW3D30 РСМи Кыргыз Республикасынын тоолуу шарттарында мейкиндиктик тактыгы 30 метрден жогору болгон гидрологиялык изилдөөлөрдү жүргүзүүгө эң ылайыктуу ачык пайдалануудагы рельефтин санариптик модели катары сунуш кылынат.

Негизги сөздөр: дарыя, бассейн, дарыя бассейндери, суу чогулуучу аянт, моделдөө.

В данной работе выполнено моделирование бассейнов рек, расположенных в котловине озера Иссык-Куль, с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) на основе сцен АW3D30 с целью уточнения их границ и площадей. В работе также были использованы топографические карты масштаба 1:100 000 для оценки вертикальной и горизонтальной точности ЦМР. Обработка геопространственных данных, моделирование и анализ качества полученных результатов были реализованы с использованием инструментов гидрологического анализа проигранного комплекса ArcGIS 10.4. Результаты исследования показали, что ЦМР АW3D30 можно рекомендовать в качестве открытой цифровой модели рельефа с пространственным разрешением 30 м, наиболее подходящей для выполнения гидрологических исследований в горных условиях Кыргызской Республики соответствующей точности.

Ключевые слова: река, бассейн, бассейны рек, водосборная область, моделирование.

The modeling of river basins located in the basin of Lake Issyk-Kul, using the АW3D30 based Digital Elevation Model (DEM), was carried out in this work to clarify their boundaries and areas. The research also used topographic maps at a scale of 1:100,000 to assess the vertical and horizontal accuracy of the DEM. Geospatial data processing, modeling and analysis of the quality of the results obtained were realized using the hydrological analysis tools of the ArcGIS 10.4 software. The results of the study showed that АW3D30 DEM can be recommended as an open Digital

Elevation Model with 30 m spatial resolution, which is most suitable for performing hydrological studies in the mountainous conditions of the Kyrgyz Republic in such scale.

Key words: river, basin, river basins, catchment area, modeling.

Введение. Информация о местности имеет основополагающее значение для гидрологических исследований, и технологии дистанционного зондирования играют сегодня важную роль. Глобальные цифровые модели рельефа (GDEM) построены в основном на основе стереоскопических оптических и интерферометрических спутниковых изображений, полученных с помощью радаров, разработанных различными способами.

Существует ряд цифровых моделей рельефа (ЦМР), основанных на открытых и 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, Airbus 10m DEM и другие. Такое множество глобальных ЦМР предоставляют пользователям несколько вариантов выбора, что требует внимательного изучения и выбора наиболее подходящей цифровой модели рельефа в научных исследованиях и в решении прикладных задач. Самыми основными факторами при выборе ЦМР являются ее пространственная точность и доступность [1,4].

Проведено множество исследований по использованию и анализу различных ЦМР. Изучение имеющихся сравнительных исследований разных цифровых моделей рельефа показали, что сопоставлять данные 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 [1-4].

В горных условиях спутниковые данные имеют искажений из-за влияния горных вершин на результаты наклонной съемки со спутников, постоянной облачности и сильным влиянием наклона и экспозиции

поверхности, речной сети и дорог. Каждая спутниковая система имеет свои особенности, которые зависят от местоположения определенного района изучения и требуют тщательного исследования для каждого случая. Особый интерес представляет исследование, в котором сравнительный анализ результатов моделирования на основе разных открытых данных спутниковых систем показал, что ЦМР на основе открытой глобальной цифровой модели рельефа ALOS World 3D-30m (AW3D30) с горизонтальным разрешением по широте и долготе в 1" (примерно 30 м). AW3D30 является наиболее подходящей открытой моделью для гидрологических исследований и уточнения площадей и границ бассейнов рек и озёр в условиях высокогорья [5]. Данное исследование по анализу ЦМР на основе AW3D30 показывает её относительно высокую горизонтальную и вертикальную точность в сопоставлении с моделями на основе открытых данных SRTM (SRTMGL1, третья версия 3.0) и ASTER (GDEM 003) соответствующего 30 метрового пространственного разрешения.

В настоящем исследовании для получения цифровой поверхности рельефа используется глобальная ЦМР AW3D30. Она 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) [6]. Выбор этой цифровой модели рельефа был основан результатами ряда исследований, показавших относительно высокую пространственную

точность ЦМР на основе модели AW3D30 в сопоставлении с другими открытыми глобальными цифровыми моделями рельефа с 30 м разрешением [7-10].

Основной целью данного исследования является уточнение границ и площадей бассейнов рек, расположенных в котловине озера Иссык-Куль, с использованием цифровой модели рельефа на основе AW3D30. Используемые в настоящее время границы и площади бассейнов и водосборов рек были разработаны на основе аналоговых картографических материалов и традиционных методов фотограмметрии и картографии. Уточнение и сравнительный анализ точности границ и площадей бассейнов горных рек на основе открытых данных дистанционного зондирования Земли позволяют смоделировать бассейнов и водосборов рек с применением современных геоинформационных систем.

Методология исследования. Объектами настоящего исследования являются реки, находящиеся в Иссык-Кульской котловине в Кыргызской Республике. Это котловина ограничена с севера и юга горными хребтами Кунгей, Тескей Ала-Тоо и имеет длину с востока на запад 240 км, ширину около 100 км и ее центральную часть занимает озеро Иссык-Куль. Оно расположено на высоте 1608 м над уровнем моря, площадь озера составляет 6200 кв.км, глубина доходит до 668 м., длина с запада на восток составляет 180 км, ширина с юга на север - 64 км. В озеро впадает до 80 больших и сравнительно небольших притоков, из них наибольшими являются реки Тюп и Джергалан, впадающие с востока. Питание рек бассейна озера смешанное, с преобладанием талого стока – снегового и ледникового (рис. 1) [11-12].

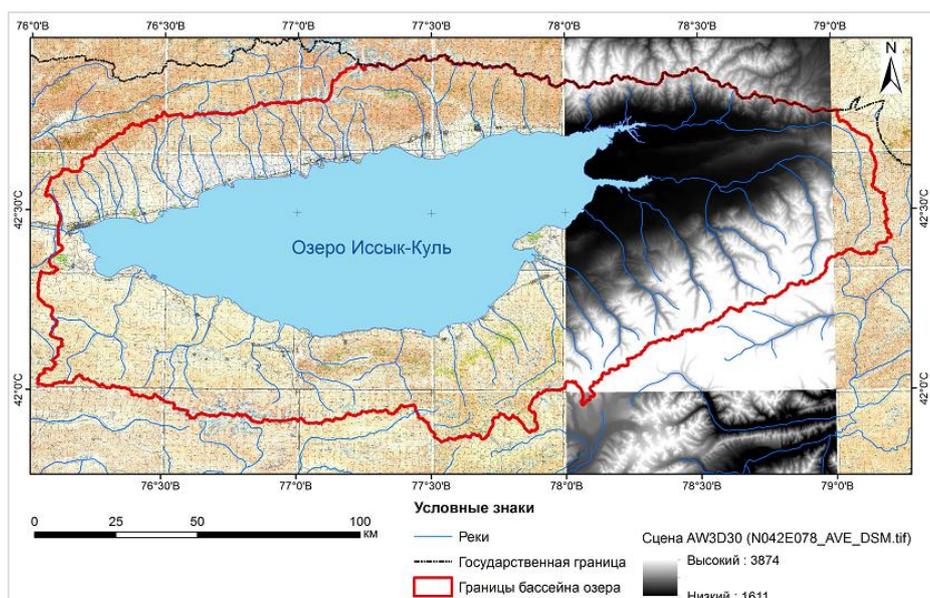


Рис. 1. Район исследований с двумя сценами AW3D30, речной сетью, топографическими картами, водной поверхностью и границами бассейна озера Иссык-Куль.

Десять сцен AW3D30 (табл. 1), разработанные на основе снимков японского спутника исследования Земли ALOS с оптико-электронной системой PRISM были выбраны и использованы в качестве источника цифровой модели рельефа для района исследований, ограниченного по широте от 41°24'45,3"С до 43°00'15,9"С и по долготе от 74°59'46,7"В до 79°37'01,1"В (рис. 1).

При использовании данных дистанционного зондирования Земли особую важную роль играет контроль качества географической привязки снимков. Для оценки горизонтальной точности моделированных речной сети и бассейнов в данной работе были применены топографические карты масштаба 1: 100 000. Графическая точность горизонтального положения этих карт составляет до 10 м, что позволяет их использование в качестве источника проверочных данных для AW3D30 [5].

Создание цифровой модели рельефа района исследований на основе мозаики сцен AW3D30 выполнено с использованием программного комплекса ArcGIS 10.4 с созданием базы геоданных. При обработке данных и моделировании в качестве основной была выбрана зональная система координат WGS_1984_UTM_Zone_44N (EPSG:32644). Площадь

бассейна озера рассчитана с использованием государственной зональной системы координат Kurg-06_TM_Zone_4 (EPSG:7695), что требуется по национальному законодательству [13].

Водная поверхность озера Иссык-Куль была получена в результате обработки мультиспектральных снимков, снятых 23 июля 2020 года со спутника Sentinel-2A (табл. 2). Был использован Нормализованный разностный водный индекс (NDWI) для создания цифровой модели водной поверхности озера с использованием формулы: $NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$, где Green – отражение в зеленой области спектра (3 канал), NIR – отражение в ближней инфракрасной области (8 канал) [14, 15].

После составления первичной ЦМР был проведен анализ качества всех пикселей модели с использованием инструмента «Локальные понижения» модуля «Гидрология» ArcGIS 10.4 для выявления ячеек с неопределённым направлением стока или без данных по высоте. Для устранения локальных понижений был использован инструмент «Заполнение» модуля «Гидрология» с последующим определением направления стока с каждого пикселя через коды направления стока 1-2-4-8-16-32-64-128.

Таблица 1

Использованные сцены AW3D30 с горизонтальным пространственным разрешением в 1 угловую секунду (30 м) и снимки со спутника Sentinel-2A

Наименования спутника, сенсора и модели ЦМР	Сцены спутникового снимка
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
Спутник Sentinel-2A, сенсор MSI (MultiSpectral Instrument), дата съемки 23 августа 2020 г., продукт первого уровня обработки	L1C_T43TGH_A032220_20210823T054640, L1C_T43TEH_A032220_20210823T054640, L1C_T44TKM_A032220_20210823T054640, L1C_T43TEG_A032220_20210823T054640, L1C_T43TFG_A032220_20210823T054640, L1C_T43TFH_A032220_20210823T054640

Границы бассейнов рек в котловине озера Иссык-Куль определены с использованием инструментов «Бассейн» и «Водосборная область», а речная сеть моделирована с использованием инструмента «Суммарный сток» модуля «Гидрология» и укрупнена калькулятором раstra программного комплекса ArcGIS. Необходимо отметить, что в данной работе не были учтены грунтовые условия, ледниковое питание и прочие параметры для точного моделирования стока, но тем не менее они незначительно влияют на определение границ водосбора рек. При расчете расхода рек и других гидрологических параметров требуется учитывать сложного комплекса показателей грунтовых условий, видов и объемов питания рек, климатических условий и т.д.

Результаты и их обсуждение. Границы бассейнов рек котлована озера Иссык-Куль определены на основе открытой глобальной цифровой модели рельефа ALOS World 3D-30m (AW3D30) с горизонтальным 30 метровым разрешением по широте и долготе (рис. 2). Пространственная точность цифровой модели была уточнена с использованием топографических карт с исправлением небольшого недостоверного участка границы на основе очертания верховья бассейна притока Керегеташ реки Барскаун. Необходимость такого дополнительного уточнения границ и площадей бассейнов рек по другим видам ЦМР и топографическим картам также отмечено в других исследованиях [5,16].

Речная сеть района исследований была смоделирована на основе ЦМР AW3D30. Для дальнейшего исследования и анализа были выбраны 105 речных бассейнов с площадью более 15 кв. км. Расположение

устьев рек было определено с использованием картографического сервиса Google Планета Земля, имеющей пространственную точность равной 1,5-5 м [17-19], что удовлетворяет требованиям по точности масштаба.

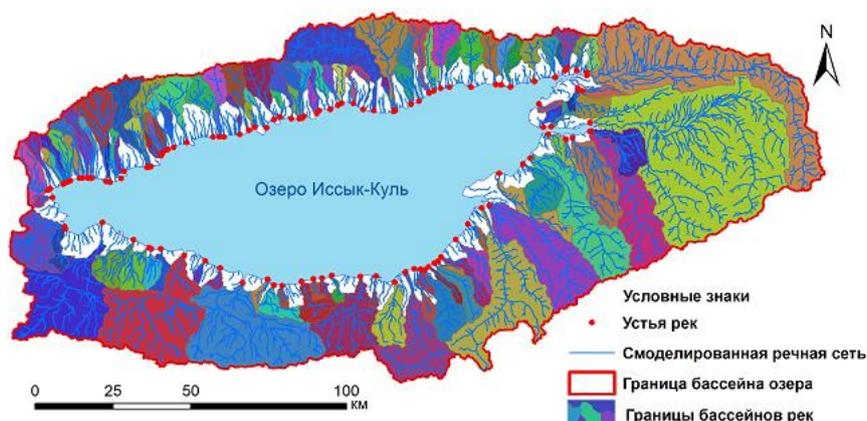


Рис. 2. Смоделированная сеть и границы бассейнов рек котловины озера Иссык-Куль на основе ЦМР AW3D30.

По результатам цифрового моделирования и проверки качества полученных моделей бассейнов 105 выбранных рек было выполнено их векторизация. 22 реки в котловине озера с площадями бассейнов более 100 кв. км приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ площадей бассейнов 22 рек на основе ЦМР AW3D30 и официально используемых показателей

№ п/п	Название реки	Площадь бассейна реки в кв. км	
		на основе ЦМР AW3D30	по данным [20]*
1.	Джыргалан	2141	2070
2.	Тюп	1209	1180
3.	Тон	782	742
4.	Ак-Терек	706	722
5.	Джууку	629	590
6.	Улахол	572	593
7.	Джеты-Огуз	479	387
8.	Каракол	395	394
9.	Барскаун	353	352
10.	Чон-Аксу	337	337
11.	Чон-Кызылсу	334	340
12.	Тосор	310	304
13.	Ирдык	242	100
14.	Ак-Су	223	216
15.	Кичине-Кызылсу	187	139
16.	Торайгыр	159	175
17.	Тамга	148	162
18.	Чон-Джаргылчак	145	137
19.	Дюресу	139	128
20.	Чок-Тал	113	132
21.	Чолпон-Ата	110	125
22.	Сютгубулак	101	45 [21]*

*Площади бассейнов некоторых рек определены выше пунктов гидрологических наблюдений, которые могут находиться на некотором расстоянии от устьев рек, в виде водосборных областей.

Необходимо отметить, что использование операции построения бассейнов рек во многих программных комплексах ГИС, в том числе в ArcGIS 10.x, позволяет определять границ водоразделов в рамках окна анализа. При использовании аналитического инструмента «Бассейн» моделируется и анализируется растровый слой с направлением стока на предмет нахождения связанных ячеек, обычно принадлежащих самым большим водосборным областям рек в районе изучения. Водосборные площади притоков и других рек можно моделировать и рассчитать с использованием инструмента «Водосборная область» путем размещения точек устьев в пунктах гидрологических наблюдений, водозаборов или в местах слияния речных потоков в один, в том числе слияния притоков с главной рекой. В этом случае площадь водосбора определяется выше выбранных точек устьев и далее можно получить границ бассейнов не только крупных, но и малых рек и притоков.

Заключение. Границы бассейнов рек проходят по водоразделам, распределяющим сток по склонам, и они достаточно быстро и качественно определяются инструментами моделирования и гидрологического анализа геоинформационных систем. Впервые были выполнены расчет, уточнение границ и анализ площадей бассейнов рек, расположенных в котловине озера Иссык-Куль, с использованием цифровой модели рельефа на основе открытых данных дистанционного зондирования Земли. Полученные модель и методология исследования позволяют определять водосборные площади всех бассейнов рек в котловине озера Иссык-Куль выше определенных устьев или любых точек наблюдений с высокой точностью и эффективностью. Необходимо отметить, что моделирование границ бассейнов на устьевом равнинном участке рек с использованием ЦМР с разрешением 30 м не дает требуемой точности линии водораздела, что может потребовать выполнения наземных работ или использования аэрокосмических снимков сверхвысокого пространственного разрешения.

Сегодня для пространственной организации географических систем часто применяется бассейновый подход, который дополняет организации объектов и явлений на основе экосистем [22-24]. Сравнительный анализ результатов исследования и используемых сегодня данных показал, что применяемые сегодня границы и площади бассейнов рек Кыргызской Республики требует уточнения и обновления с применением современных геоинформационных и аэрокосмических технологий. Многие из площадей бассейнов рек определены выше пунктов гидрологических наблюдений, часто несовпадающих с положением реальных устьев рек.

Современные геоинформационные системы и данные дистанционного зондирования Земли позволяют моделировать бассейнов рек для уточнения их границ и площадей с использованием открытых глобальных цифровых моделей рельефа. Результаты данного исследования и других научно-исследовательских работ позволяют рекомендовать ЦМР AW3D30 в качестве открытой цифровой модели рельефа с пространственным разрешением 30 м, наиболее подходящей для выполнения гидрологических исследований в горных условиях Кыргызской Республики.

Литература:

1. Barreiro-Fernández L., Buján S., Miranda D., Diéguez-Aranda U., & González-Ferreiro E. Accuracy assessment of LiDAR-derived digital elevation models in a rural landscape with complex terrain. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(1), 2016, 016014. DOI: 10.1117/1.jrs.10.016014.
2. Mukherjee S., Joshi P., Mukherjee S., Ghosh A., Garg R., Mukhopadhyay A. Evaluation of vertical accuracy of open source digital elevation model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 21, 2013. 205–217. DOI:10.1016/j.jag.2012.09.004.
3. Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H.: Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-4, 71-76, DOI:10.5194/isprsannals-II-4-71-2014, 2014.
4. Laurent C., Soriano-Monzalvo J.C., Pedrozo-Acuña A. «Evaluation of Open-access Global Digital Elevation Models (AW3D30, SRTM and ASTER) for Flood Modelling Purposes.» *Earth-ArXiv*. June 25, 2018. DOI:10.1111/jfr3.12550.
5. Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA). ALOS Global Digital Surface Model «ALOS World 3D - 30m (AW3D30)» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm.
6. 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. Издательство МГУ*, 2020. Т. 26. Ч. 2. С. 349–365. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-349-365.
7. Жусупов Н.А., Ха Т.В., Дахал Т.П., Ашыралиев Т.А., Бактыбек у. М. Оценка точности открытых глобальных цифровых моделей рельефа. *Вестник КРСУ*. 2019. Том 19. №8. С. 135-139.
8. 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.
9. 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.
10. Скрыпицына Т.Н., Флоринский И.В., Лущикова О.С. Сравнительная оценка точности квази-глобальных моделей рельефа AW3D30 DSM, ASTER GDEM и SRTM1 DEM. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофото-съемка*. 2017, Том 61, № 5. С.86-90.

11. Маматканов Д.М., Бажанова Л.В., Романовский В.В. Водные ресурсы Кыргызстана на современном этапе. Бишкек: Илим, 2006. 276 с.
12. Романовский В.В., Кузьмиченок В.А., Маматканов Д.М., Подрезов А.О. Все об озере Иссык-Куль. Бишкек: Изд. Кыргызско-Российского Славянского Университета, 2005. 406 с.
13. Abdiev A., Chumurov 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. С. 85-90.
14. Kaplan G., Avdan U. Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery, *European Journal of Remote Sensing*, 50:1, 2017, 137-143, DOI: 10.1080/22797254. 2017. 1297540.
15. Li J., Peng B., Wei Y., Ye H. Accurate extraction of surface water in complex environment based on Google Earth Engine and Sentinel-2. *PloS one*, 16(6), 2021, e0253209. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253209>.
16. 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*, Том 12, № 3, 2018. С. 96-102.
17. Wang Y., Zou Y., Henrickson K., Wang Y., Tang J., et al. (2017). Google Earth elevation data extraction and accuracy assessment for transportation applications. *PLOS ONE* 12(4): e0175756. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175756>.
18. Mohammed N.Z., Ghazi A., Mustafa H.E. Positional Accuracy Testing of Google Earth. *International journal of multidisciplinary sciences and engineering*, Vol. 4, No. 6, July 2013. С. 6-9.
19. Ступин В. П. Анализ возможностей использования данных Google Earth в интересах мониторинга динамики морфосистем зоны влияния каскада Ангарских водохранилищ. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 8 (55), 2011. С. 46-54.
20. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 14. Бассейны рек Средней Азии. Вып. 2. Бассейн озера Иссык-Куль, рек Чу, Талас и Тарим / под ред. А.А. Григорьева. Ленинград: Гидрометеиздат, 1966. 207 с.
21. Ресурсы поверхностных вод СССР: Основные гидрологические характеристики. Т. 14. Средняя Азия. Вып. 2. Бассейны оз. Иссык-Куль, рек Чу, Талас, Тарим. Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. 347 с.
22. Симонов Ю.Г., Симонова Т.Ю. Речной бассейн и бассейновая организация географической оболочки / Эрозия почв и русловые процессы: Сб. статей, М, 2003. Вып. 14. С. 7-32.
23. Калашникова О. Ю. К разработке методов долгосрочного прогноза стока горных рек и притока воды в водохранилища на примере реки Нарын. // *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана* № 5. 2015. С. 100-103.
24. Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Нарожняя А.Г. Применение бассейновой концепции природопользования для почво-водоохранного обустройства агроландшафтов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 1 (9). С. 2432-2435.