УДК 528 https://doi.org/10.5281/zenodo.10395956

Мягков С.С., Карандаева Л.М.

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Ташкент, Узбекистан

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ МЕСТНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА ТАШКЕНТА

Аннотация. *При выполнении пространственного моделирования зачастую необходимо наличие цифровой модели рельефа исследуемой территории. Так, например, для расчета потенциальных зон затопления городской территории города Ташкента при выпадении ливневых осадков необходима математическая модель расчета поверхностного стока с учетом рельефа местности.*

Основным источником цифровых моделей рельефа является дистанционное зондирование. Статья посвящена описанию построения цифровой модели местности территории города Ташкента с использованием данных дистанционного зондирования земли и ГИС-технологий.

С использованием глобальной цифровой модели ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Global Digital Elevation Model) и открытой географической базы данных OpenStreetMap (OSM) построены цифровая модель рельефа и цифровая модель местности территории города Ташкента.

Ключевые слова: *город Ташкент, городская территория, цифровая модель рельефа (ЦМР), цифровая модель местности (ЦММ), ГИС-технологии, данные дистанционного зондирования земли (ДДЗ).*

Myagkov S.S., Karandaeva L.M.

Hydrometeorological Research Institute, Tashkent, Uzbekistan

DIGITAL TERRAIN MODEL OF THE TERRITORY OF THE CITY OF TASHKENT

Abstract. *When performing spatial modeling, it is often necessary to have a digital relief model of the territory under study. For example, to calculate potential flooding zones of the urban territory of Tashkent as a result of heavy rainfall, a mathematical model for calculating surface runoff taking into account the terrain is needed.*

The main source of digital terrain models is remote sensing. The article is devoted to the description of the construction of a digital terrain model of the territory of the city of Tashkent using remote sensing data and GIS technologies.

Using the global digital model ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Global Digital Elevation Model) and the OpenStreetMap open geographic database (OSM), a digital terrain model and a digital terrain model of the territory of the city of Tashkent were built.

Key words*: Tashkent city, urban area, digital terrain model (DEM), digital terrain model (DMM), GIS technologies, Earth remote sensing data.*

Введение и постановка проблемы. Изменения климата в разных регионах планеты проявляются не только в повышении средней температуры воздуха, но и в росте, и в меняющемся характере выпадающих осадков. Изменилось не только количество осадков, но и характер их выпадения, увеличилось количество ливневых дождей. Ливневые дожди являются возможным источником чрезвычайной ситуации, когда затопление приносит материальный ущерб или наносит вред здоровью людей.

В современном градостроительстве широко используются асфальт и бетон при создании автомобильных дорог, тротуаров и т.д., что снижает фильтрационные свойства

водосборной поверхности. Строительство зданий и сооружений приводит к повышению скорости течения ливневых вод к городским понижениям и повышению скорости заполнения их водой. В настоящее время крайне актуальным является вопрос определения возможных зон затопления городских территорий в результате ливневых осадков. В течение последних нескольких лет именно в результате ливневых осадков на территории города Ташкента произошло большое количество серьезных затоплений, как пример, см. рис. 1-3.



Рис. 1. Сарыкульский мост 3 июня 2019 года



Рис. 2. Мост возле старого ТашМИ 2 ноября 2022 года



Рис. 3. Центр Ташкента после ливня 2 апреля 2023 года

Для расчета потенциальных зон затопления городских территорий в результате ливневых осадков необходима математическая модель формирования поверхностного стока с учетом рельефа местности [6]. Настоящая статья посвящена описанию построения цифровой модели местности территории города Ташкента с использованием ГИС-технологий и данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ).

Цель и задачи исследования. Цель – цифровая модель местности территории города Ташкента. Для достижения поставленной цели необходимо выполнение следующих задач:

– поиск информации о существующих в свободном доступе глобальных цифровых моделях рельефа (ЦМР) на платформах: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), GMTED2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data), ASTER GDEM

(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Global Digital Elevation Model);

– выяснить какая из перечисленных выше ЦМР будет являться основой для достижения поставленной цели, т.е. определить преимущества тепловых свойств снимков городских территорий с более высоким пространственным разрешением или снимков с большим радиометрическим разрешением и спектральным охватом теплового диапазона;

– построить цифровую модель рельефа города Ташкента;

– построить цифровую модель местности территории города Ташкента.

Объектом исследований данной работы является территория города Ташкента, предмет исследования – рельеф местности территории города Ташкента.

Материалы и методы. В процессе работы над данной статьей были использованы данные дистанционного зондирования земли (ДДЗ) из космоса и геоинформационные технологии.

Результаты и их обсуждение. Наиболее важными данными для гидрологических расчетов являются цифровые модели рельефа (ЦМР) и цифровые модели местности (ЦММ). Цифровая модель рельефа (ЦМР) – это трехмерное отображение земной поверхности, представленное в виде массива точек с определенной высотой. Цифровая модель рельефа содержит информацию о высоте только истинного рельефа без учета растительности, зданий и других объектов на местности [15].

Цифровая модель местности (ЦММ) – совокупность данных (пространственных координат) о каком-либо множестве точек, которая представляет собой многослойную модель, состоящую из частных моделей (слоев), например, из ситуации (здания, сооружения, дорожная сеть и т.д.), рельефа (координаты и высота точек), а также технико-экономических, геологических и других характеристик. Указанная совокупность может представлять собой отдельно цифровую модель рельефа (ЦМР) и цифровую модель ситуации (ЦМС) (ситуации местности) [15]. В основном ЦМР и ЦММ создаются на основе интерферометрической радиолокационной космической и стереоскопической оптической съемки [10].

Первые эксперименты по созданию ЦМР относятся к самым ранним этапам развития геоинформатики и автоматизированной картографии первой половины 1960-х годов [2, 3, 4]. Одна из первых цифровых моделей рельефа местности была построена в 1961 г. на кафедре картографии Военно-инженерной академии США [8].

Сегодня, в связи с развитием технологий для производства ЦМР в США активно используются данные радиолокационной съемки с космических кораблей многоразового использования. Проект SRTM (Shuttle Radars Topography Mission) был разработан Национальным агентством по аэронавтике и космическим исследованиям (NASA) [6]. Для данного проекта целью является создание топографических цифровых карт на всю территорию суши от 60° с.ш. до 56° ю.ш. (т.е. на 80% всей суши Земли) с пространственным разрешением равной одной угловой секунде с вертикальной точностью 16 метров. При создании географических изображений большую популярность получили SRTM данные [6].

Моделирование рельефа по спутниковым данным. Спутниковая информация является наиболее достоверной и лишена субъективизма [7]. С помощью программных комплексов ГИС (ArcGIS [1, 5, 16], Surfer [14], Global Mapper [18] и др.) по данным спутниковой информации (данные высот местности, космоснимки и т.д.) осущетвляется моделирование рельефа исследуемой местности. В настоящее время в свободном доступе появились глобальные ЦМР: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), GMTED2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data), ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Global Digital Elevation Model) с шагом сетки 30 м, 90 м, 30 м соответственно [13].

В данной работе не рассматривается ЦМР снимков GMTED2010, так как снимки имеют разрешение регулярной сетки 90 на 90 метров, что недостаточно для решения поставленных задач.

Для определения проницаемости поверхностей территории города Ташкента сравнивались тепловые снимки съёмочных систем ETM+ и ASTER, которые отличает лучшее на сегодняшний день пространственное разрешение доступных космических изображений в тепловом диапазоне 60 и 90 метров соответственно (рис. 4 и рис. 5) [11]. Уникальность сравниваемых материалов состоит в том, что эти снимки были получены практически одновременно с разницей лишь в полчаса (4 мая 2001 г.). Цель подобного сравнения – выясние преимуществ при определении тепловых свойств снимков городских территорий с более высоким пространственным разрешением или снимков с большим радиометрическим разрешением и спектральным охватом теплового диапазона.

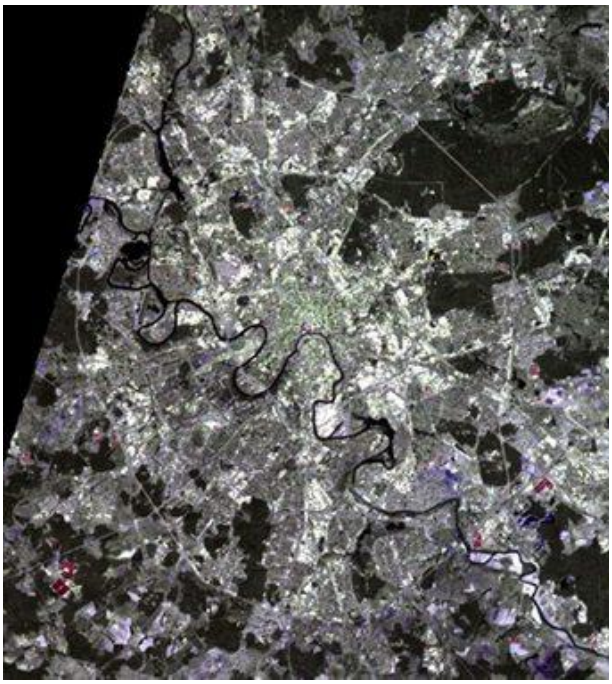


Рис. 4. Снимок ASTER/Terra, синтез каналов R:8,125 - 8,475, G:8,925 - 9,275 и B:10,95 - 11,65 мкм, пространственное разрешение 90 м

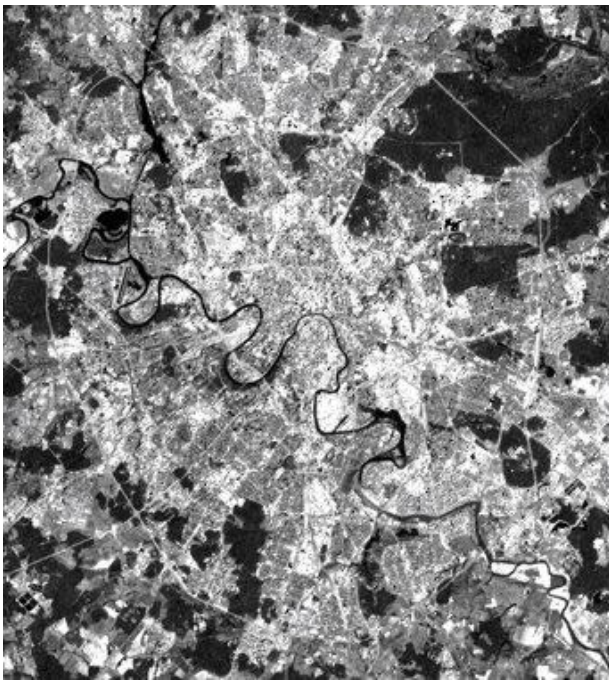


Рис. 5. Снимок ETM+/Landsat-7, спектральный диапазон 10,4 - 12,5 мкм, пространственное разрешение 60 м

Тепловые снимки ASTER уступают снимкам ETM+ по пространственному разрешению (90 м и 60 м соответственно) и в тепловом диапазоне, зато по радиометрическому разрешению и по спектральному охвату превосходят [11]. ETM+ имеет одну спектральную зону шириной (10,40 - 12,50 мкм), тогда как ASTER имеет пять спектральных зон (8,125 - 8,475; 8,475 - 8,825; 8,925 - 9,275; 10,25 - 10,95 и 10,95 - 11,65 мкм). Кроме того, ASTER имеет высокое радиометрическое разрешение во всех тепловых зонах, в связи с чем формат представления данных (16 бит или 2 байта на элемент разрешения) отличается от данных ETM+.

Синтезированный по трём каналам снимок ASTER (R: 8,125 - 8,475; G: 8,925 - 9,275 и B: 10,95 - 11,65 мкм) в целом слабо отличается по цвету от чёрно-белого изображения, что говорит о незначительных различиях в свойствах излучаемых объектов в узких участках теплового диапазона. Однако, некоторые объекты изобразились разными цветами, что представляет особый интерес. Примеры изображений бетонных, асфальтированных покрытий и сельскохозяйственных полей на космических снимках представлены на рис. 6 и

рис. 7. Как видно, на рис. 6 бетонные и асфальтированные покрытия окрашены синим и голубым цветом, а сельскохозяйственные поля – бордовым.

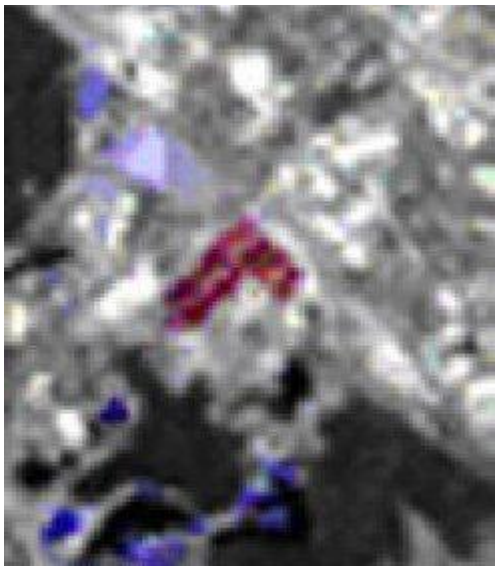


Рис. 6. Снимок ASTER/Terra с бетонными и асфальтовыми покрытиями и сельскохозяйственными полями



Рис. 7. ETM+/Landsat-7 с бетонными и асфальтовыми покрытиями и сельскохозяйственными полями

Отображение покрытий дорог и открытого грунта сине-фиолетовыми оттенками на синтезированном тепловом снимке ASTER показывает преимущество использования узких участков спектра в разных частях теплового диапазона, позволяющего отобразить разные спектральные свойства материалов и пород в тепловом диапазоне. На тепловом снимке ETM+, охватывающим весь диапазон, эти объекты «сливаются» с изображениями прочих объектов, характеризующихся повышенной яркостью. Рассмотренный пример указывает на возможность многоканальных тепловых снимков ASTER отображать характер материала покрытия объектов (бетон, асфальт), состав пород для открытытого грунта, а также в случае с изображениями полей отображать их состояние (влажность, физические особенности почв, мелиоративные мероприятия).

Приведённое сравнение съёмочных систем ASTER и ETM+ показывает, что снимки ETM+ с разрешением 60 м позволяют получить наиболее детальное распределение относительной интенсивности теплового излучения в пределах изучаемой территории. Снимки ASTER с разрешением 90 м позволяют получить дополнительные характеристики теплового излучения объектов, которые проявляются как цвет на снимке, синтезированном из 3 тепловых каналов, что может быть полезно при дешифрировании покрытий дорог и типов почвенного покрова [17]. Этот факт свидетельствует о целесообразности применения инфракрасной спектрометрии в подобных исследованиях [9]. В целом, при выявлении очагов тепла в пределах города, более целесообразно пользоваться тепловой зоной (R:8,125-8,475; G:8,925-9,275 и B:10,95-11,65 мкм), имеющей наилучшее пространственное разрешение, обеспечивающей выявление тепловых аномалий промышленных и инфраструктурных объектов, представляющих в городской среде наибольший интерес.

С помощью программных комплексов ГИС (ArcGIS, Surfer, Global Mapper и др.) по данным спутниковой информации осуществлялось моделирование рельефа территории города Ташкента. Путем интерполяции и сглаживания растровой модели глобальных ЦМР в программе Surfer были получены горизонтали поверхностей для сравнения их точности с данными OpenStreetMap (OSM). OpenStreetMap (OSM) - это бесплатная открытая географическая база данных, обновляемая и поддерживаемая сообществом добровольцев в рамках открытого сотрудничества. Сам веб-сайт

OpenStreetMap [19] представляет собой онлайн карту, поисковую систему и редактор геоданных. Совмещенные в программе Surfer слои данных OpenStreetMap и горизонтали, построенные по данным ASTER и SRTM, как пример для площади Чорсу, представлены на рис. 8 и рис. 9 соответственно.

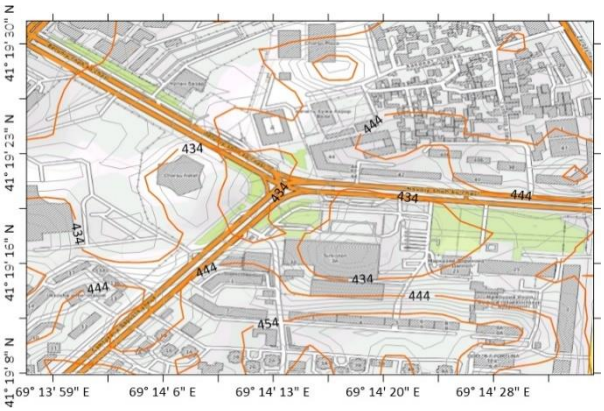


Рис. 8. Площадь Чорсу г. Ташкента. Совмещенные в программе Surfer слои данных OpenStreetMap и горизонтали, построенные по данным ASTER

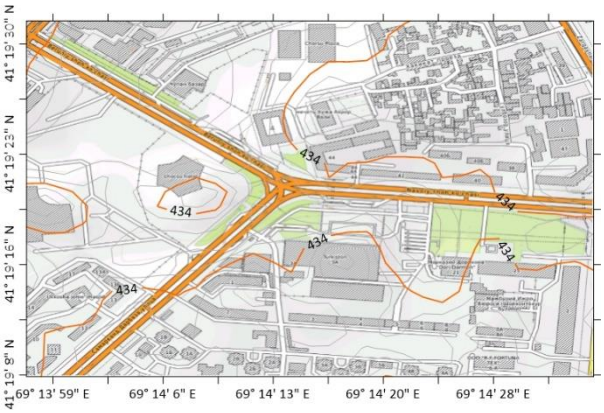


Рис. 9. Площадь Чорсу г. Ташкента. Совмещенные в программе Surfer слои данных OpenStreetMap и горизонтали, построенные по данным STRM

В результате анализа местоположения зданий относительно построеных горизонталей вышеуказанных моделей наиболее приемлемой для численной реализации математической модели расчета поверхностного стока была признана ЦМР ASTER ввиду приемлемой точности, доступности и быстроты работы с моделью. Модель находится в открытом доступе [12].

Для получения ЦМР ASTER на территорию г. Ташкента была использована ГИС программа Global Mapper [18]. Для этого в программу был загружен полигон территории города Ташкента (shp файл). Затем онлайн сервисом ASTER GDEM v3 Worldwide Elevation Data (1 arc-second Resolution) был загружен снимок, покрывающий территорию города Ташкента (см. рис. 10). Полученный снимок ASTER GDEM v3 был экспортирован в формат GeoTiff с данными об отметках высот регулярной сетки с разрешением 30 на 30 метров (рис.11).

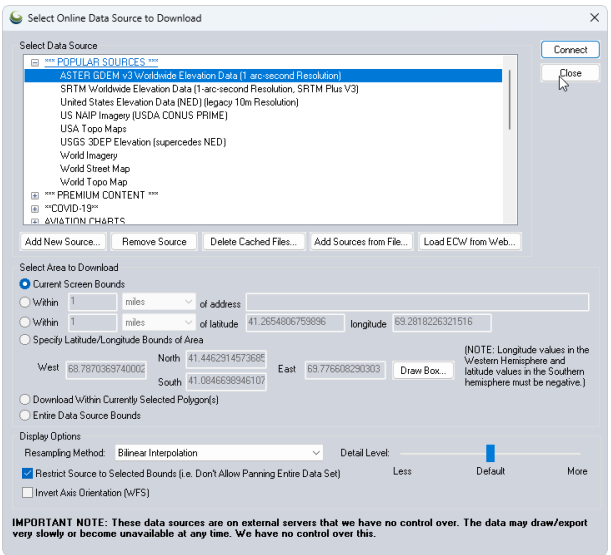


Рис. 10. Окно онлайн сервиса программы Global Mapper

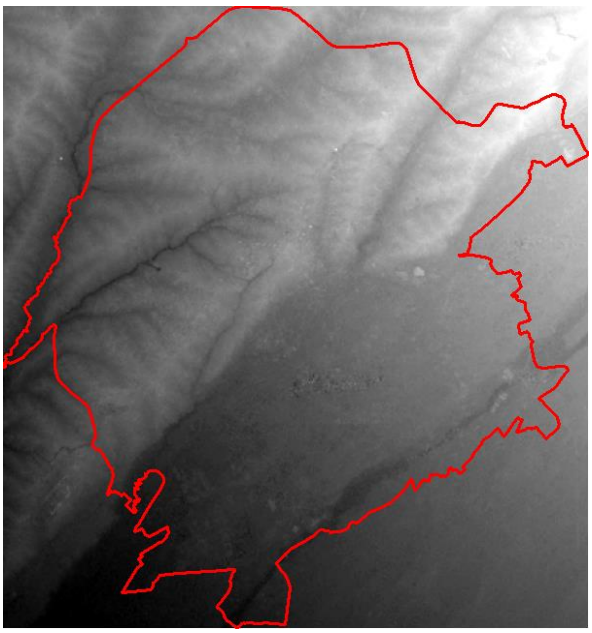


Рис. 11. Полученный снимок ASTER GDEM в формате GeoTiff с контуром территории города Ташкента

Инструментами геообработки в программе ArcMap была получена ЦМР города Ташкента. На полученную ЦМР в ГИС программе ArcMap были наложены контуры (shp. файлы): зданий, автодорог, водных объектов (данные OSM) с географической привязкой (см. рис. 12).

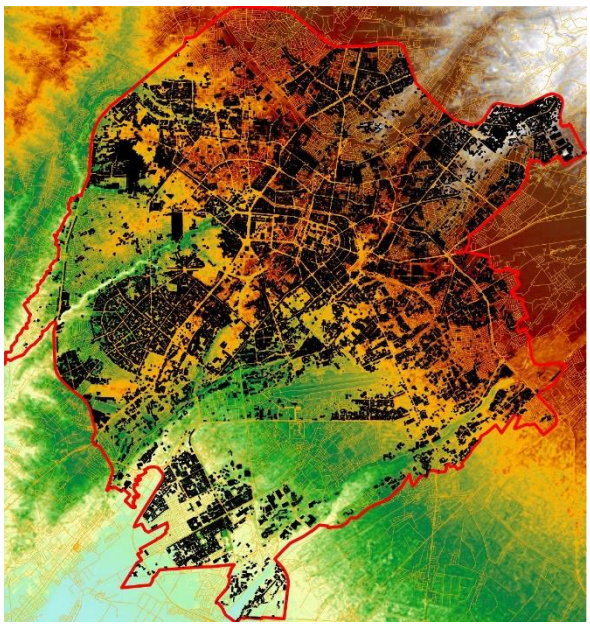


Рис. 12. Цифровая модель территории города Ташкента со слоями автодорог, зданий и водных объектов (данные OSM).

Интегральная модель местности города Ташкента. При проведении спутникового зондирования городских территорий происходит интеграция высотных значений в один элемент изображения. Как пример, растровая модель рельефа площади Чорсу представлена на рис. 13. На растровой модели заметно, что здания и земная поверхность попадают в один растр, что значительно искажает непосредственно сам рельеф. На шкале отображены абсолютные отметки высот в метрах. Низшая отметка площади Чорсу 425 метров, крыша здания гостиницы Чорсу имеет высотную отметку

440 метров. Соседние растры уже имеют интегрированную величину (высоты от 425 до 440 метров), что объясняется размером пикселя, снимаемого спутником.

Растровая модель рельефа предусматривает разбиение пространства на далее не делимые элементы (пикселы), образуя матрицу высот – регулярную сеть высотных отметок. Регулярная сеть высот представляет собой решетку с равными прямоугольниками или квадратами, где вершины этих фигур являются узлами сетки.

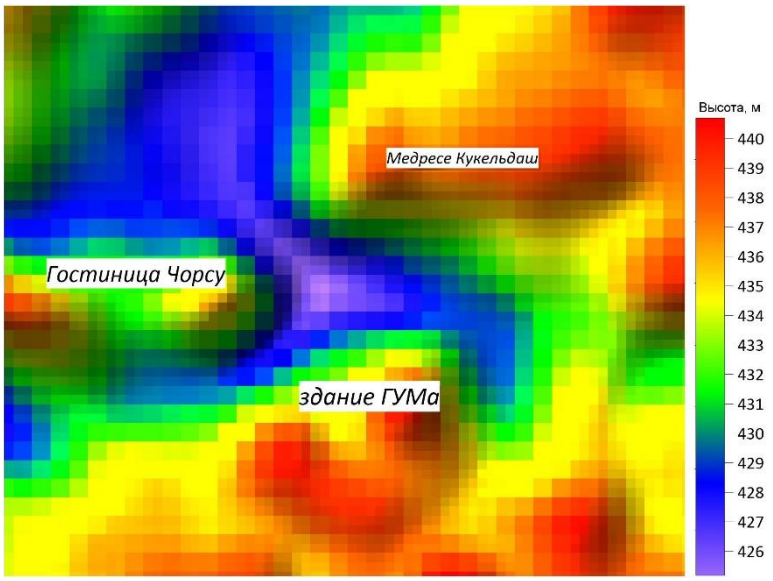


Рис. 13. Растровое представление цифровой модели рельефа площади Чорсу

Таким образом, на городской территории происходит искажение цифровой модели рельефа. Особенно важно, если сама территория представляет собой резко изменяющуюся по высоте поверхность (территория со зданиями на поверхности земли). В этом случае цифровая модель будет представлять собой сглаженную поверхность, с неравномерно распространёнными отметками высот. Сглаженный растр, представленный на рис. 14, получен в результате обработки растровой модели рельефа в ГИС программе Surfer.

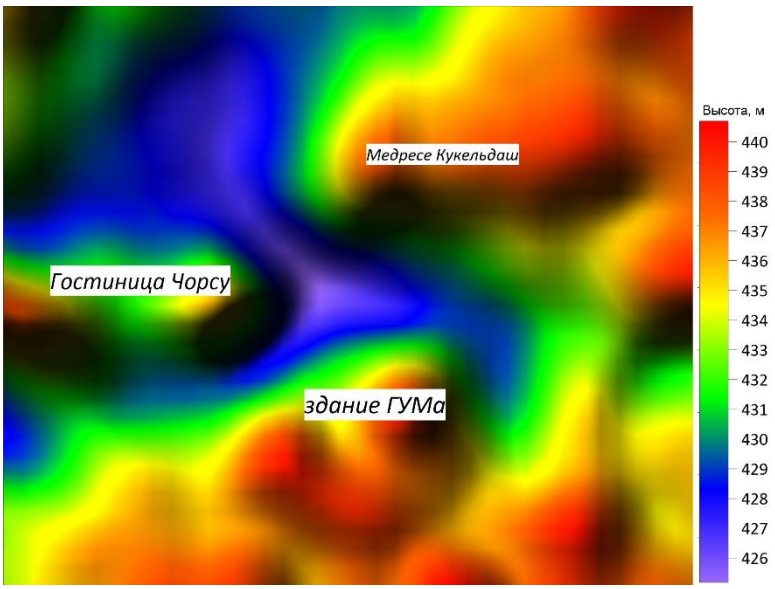


Рис. 14. Интегрированная сглаженная модель рельефа площади Чорсу

Ввиду того, что растр содержит только отметки высот и не отображает структуру поверхности, которая необходима для учета гидравлических и фильтрационных свойств

поверхности, необходимо наложить слой состояния поверхности. Например, асфальт или бетон для дорог, металл или соответствующий тип поверхности крыш зданий, растительный покров и другие. Данные слои могут быть взяты из различных ГИС источников (OpenStreetMap, 2GIS и др.), на которых имеются контуры зданий и отображены автомобильные дороги.

Для построения цифровой модели местности (ЦММ) г. Ташкента средствами ГИС программ была обработана цифровая модель рельефа ASTER с извлечением пиковых значений высот (неправильное отображение зданий), после чего были нанесены векторные слои основных зданий, сооружений города Ташкента с атрибутивными данными их высоты. Как пример на рис.15. показана цифровая модель местности площади Чорсу.

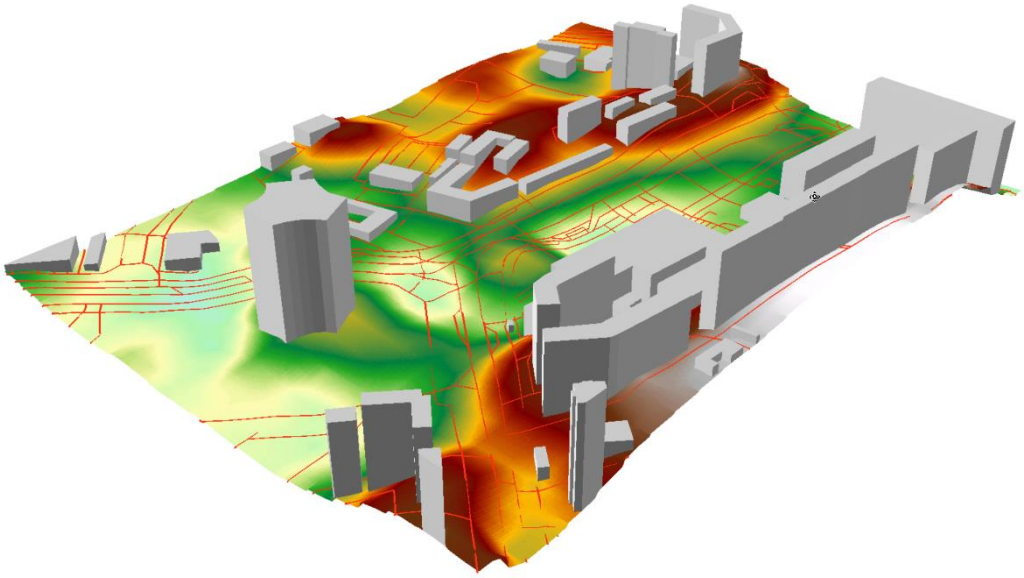


Рис. 15. Цифровая модель местности площади Чорсу г. Ташкента

Выводы. Построение цифровой модели местности основано на данных дистанционного зондирования Земли из космоса и применении географических информационных технологий.

В результате проведенного исследования для построения ЦММ территории г. Ташкента были выбраны снимки ASTER.

Тепловые снимки ASTER с разрешением 90 м позволяют получить дополнительные характеристики теплового излучения объектов, которые проявляются как цвет на снимке, синтезированном из 3 тепловых каналов, что может быть полезно при дешифрировании покрытий дорог и типов почвенного покрова.

При выявлении очагов тепла в пределах города более целесообразно пользоваться тепловой зоной RGB (R:8,125-8,475; G:8,925-9,275 и B:10,95-11,65 мкм), имеющей наилучшее пространственное разрешение, обеспечивающей выявление тепловых аномалий промышленных и инфраструктурных объектов, представляющих в городской среде наибольший интерес.

Путем интерполяции и сглаживания растровой модели глобальных ЦМР в программе Surfer, были получены горизонтали поверхностей для сравнения их точности (геопривязка) с данными OpenStreetMap (OSM).

В результате анализа местоположения зданий (данные OSM) относительно построеных по моделям SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) и ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Global Digital Elevation Model) горизонталей наиболее приемлемой для достижения поставленной цели была

признана ЦМР ASTER GDEM ввиду приемлемой точности, доступности и быстроты работы с моделью

Инструментами геообработки в программе ArcMap была получена ЦМР города Ташкента. На полученную ЦМР в ГИС программе ArcMap были наложены контуры (shp. файлы): зданий, автодорог, водных объектов (данные OSM) с географической привязкой.

Для построения цифровой модели местности (ЦММ) г. Ташкента средствами ГИС программ была обработана цифровая модель рельефа ASTER с извлечением пиковых значений высот (неправильное отображение зданий), после чего были нанесены векторные слои основных зданий, сооружений города Ташкента с атрибутивными данными их высоты.

Использованная литература:

1. Бут Б. ArcGIS 3DAnalyst: Руководство пользователя. Москва: Дата+. 2002. 243 с.

2. Геоинформатика / Под ред. В.С. Тикунова. Москва: Изд. центр «Академия», 2005. 480 с.

3. Геоинформатика: учебник для студентов вузов. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. В.С.Тикунова. Москва: Академия, 2008. 384 с.

4. Лурье И.К. Основы геоинформатики и создание ГИС / Дистанционное зондирование и географические информационные системы. Ч. 1. Москва, 2002. 168 с.

5. МакКой Д., Джонстон К. ArcGIS Spatial Analyst: Руководство пользователя. Москва: Дата+, 2002. 216 с.

6. Мягков С.В., Дергачева И.В., Мягков С.С. Влияние городского ландшафта на опасность наводнений от ливневых осадков // Центральноазиатский журнал географических исследований. № 3-4, 2021. С. 105-114.

7. Новаковский Б.А., Прасолов С.В., Прасолова А.И. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей. Москва: Научный мир, 2003. 64 с.

8. Хромых В.В., Хромых О.В. Цифровые модели рельефа. Учебное пособие. Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. 178 с.

9. Dai O., P.K. Srivastava (2017), *In Sensitivity Analysis in Earth Observation Modelling*, 243 p.

10. Goodchild M., Kemp K. (1991), *Core Curriculum in GIS*, Santa Barbara, 318 p.

11. Mohammad Hossein Shahrokhnia, Seyed Hamid Ahmadi (2019), *In Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*, 243 p.

12. https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp

13. https://sovzond.ru/products/spatial-data/digital-models/

14. https://support.goldensoftware.com/hc/en-us

15. https://topogis.ru/tsifrovaya-model-rel-yefa-fotogrammetriya.php

16. https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-desktop/overview

17. http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat_img/files/3/sravnenie_snimkov_aster_i_etm.htm

18. https://www.globalmapper.com

19. https://www.openstreetmap.org

References:

1. But B. (2002). *ArcGIS 3DAnalyst: User Manual*, Moscow, 243 p. (In Russ.).

2. *Geoinformatics* (2005), Edited by V.S. Tikunov, Moscow, 480 p. (in Russ.).

3. *Geoinformatics: textbook for university students*, In 2 books. Book 1 (2008), Edited by V.S.Tikunov, Moscow, 384 p. (in Russ.).

4. Lurie I.K. (2002), *Fundamentals of geoinformatics and GIS creation / Remote sensing and geographic information systems*, Part 1, Moscow, 168 p. (in Russ.).

5. McCoy D., Johnston K. (2002), *ArcGIS Spatial Analyst: User Manual*, Moscow, 216 p. (In Russ).

6. Myagkov S.V., Dergacheva I.V., Myagkov S.S. (2021), The influence of the urban landscape on the danger of flooding from heavy rainfall, *Central Asian Journal of Geographical Research*, No. 3-4, pp. 105-114. (in Russ.).

7. Novakovsky B.A., Prasolov S.V., Prasolova A.I. (2003). *Digital relief models of real and abstract geofields*, Moscow, 64 p. (in Russ.).

8. Khromykh V.V., Khromykh O.V. (2007), *Digital relief models. Study guide*, Tomsk, 178 p. (in Russ.).

9. Dai O., P.K. Srivastava (2017), *In Sensitivity Analysis in Earth Observation Modelling*, 243 p.

10. Goodchild M., Kemp K. (1991), *Core Curriculum in GIS*, Santa Barbara, 318 p.

11. Mohammad Hossein Shahrokhnia, Seyed Hamid Ahmadi (2019), *In Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*, 243 p.

12. https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp

13. https://sovzond.ru/products/spatial-data/digital-models/

14. https://support.goldensoftware.com/hc/en-us

15. https://topogis.ru/tsifrovaya-model-rel-yefa-fotogrammetriya.php

16. https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-desktop/overview

17. http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat_img/files/3/sravnenie_snimkov_aster_i_etm.htm

18. https://www.globalmapper.com

19. https://www.openstreetmap.org

Сведения об авторах:

Мягков Сергей Сергеевич – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), базовый докторант (PhD). E-mail: s.s.myagkov@gmail.com

Карандаева Лидия Михайловна – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: karan.serg@rambler.ru

Information about authors:

Myagkov Sergey – Hydrometeorological Research Institute (Tashkent, Uzbekistan), basic doctoral student (PhD). E-mail: s.s.myagkov@gmail.com

Karandaeva Lidiya – Hydrometeorological Research Institute (Tashkent, Uzbekistan), Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher. E-mail: karan.serg@rambler.ru

Для цитирования:

Мягков С.С., Карандаева Л.М. Цифровая модель местности территории города Ташкента // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2023. № 3-4. С. 72-82.

For citation:

Myagkov S.S., Karandaeva L.M. (2023), Digital terrain model of the territory of the city of Tashkent, *Central Asian Journal of Geographical Researches*, No. 3-4, pp. 72-82. (In Russ.).