

УДК 004.9:504.4

## СРАВНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ПРИ АНАЛИЗЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЗОН С РИСКОМ ЗАТОПЛЕНИЯ В ГОРОДЕ САМАРКАНД, ИСПОЛЬЗУЯ HEC-RAS

<sup>+</sup> *Абатова Ш.<sup>1</sup>, Худаярова Ш.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада аль-Хоразми, Самарканд, Узбекистан

<sup>2</sup> Самаркандский государственный университет имени Шарофа Рашидова, Самарканд, Узбекистан

<sup>+</sup> yoprince93@gmail.com

**Аннотация.** В нашем исследовании мы разработали и опробовали комплексный подход к оценке зон риска затопления в городе Самарканд, интегрируя данные цифровых моделей рельефа различного разрешения (NASA SRTM — 30 м, ALOS PALSAR DEM— 12,5 м) и почасовые данные о количестве осадков из архива IMERG. Границы городской территории были получены из открытой базы OpenStreetMap. Для моделирования гидродинамики подтоплений применялся программный комплекс HEC-RAS в режиме неустановившегося течения (unsteady flow), с учётом нормальной глубины (normal depth) в качестве граничного условия и с заданным уклоном трения (friction slope = 0,0125). Мы провели сравнительный анализ результатов при разном разрешении DEM, а также учли экстремальные события осадков, отфильтровав самые высокие значения из IMERG. Полученные карты глубины и скорости позволили выделить критические участки в черте города и сформулировать рекомендации по снижению ущерба. Данный подход может быть использован как методологическая основа для дальнейших работ по оценке гидрологических рисков и планированию мероприятий по защите населения и инфраструктуры в условиях быстрорастущих городов.

**Ключевые слова:** Самарканд, HEC-RAS, затопление, NASA SRTM DEM, ALOS PALSAR DEM, IMERG, городской паводок, неустановившееся течение, гидравлическое моделирование, OpenStreetMap.

### 1 ВВЕДЕНИЕ

Глобальный рост урбанизации, изменение климата и локальные особенности рельефа во многих регионах мира приводят к учащению случаев затопления и паводков в городах. На фоне всего многообразия антропогенных и природных факторов выделяются две основные причины риска: увеличение интенсивности и частоты экстремальных осадков, а также рост застроенной территории, где снижается естественная способность почв поглощать поверхностный сток. В городских условиях любая значительная модификация ландшафта — от засыпки арыков и пойм до строительства новых дорог — способна повлиять на маршруты и интенсивность потока воды. Именно поэтому в последние годы наблюдается активное развитие численных моделей, позволяющих оценить и спрогнозировать зоны потенциального затопления. Самарканд, будучи одним из древнейших городов Центральной Азии, представляет особый интерес для такого рода исследований. Он имеет сложную историю застройки, сочетает объекты культурного наследия и современные урбанизированные районы, а также находится в зоне, подверженной колебаниям климатических условий. Этот город, расположенный в юго-западной части Зерафшанской долины, неоднократно сталкивался с проблемами подтопления в периоды интенсивных дождей или снеготаяния в горах. Исторический центр с плотной застройкой, узкими улицами и уникальными памятниками архитектуры также не застрахован от последствий чрезвычайных погодных явлений.

Цель нашего исследования является комплексная оценка риска затопления в черте города Самарканда с учётом специфики его рельефа и осадочного режима, опираясь на гидравлическое моделирование в среде HEC-RAS. Для достижения этой цели мы сфокусировались на нескольких задачах, каждая из которых является самостоятельным этапом работы.

Научная новизна нашего исследования заключается в интеграции разных по разрешению DEM (30 м и 12,5 м) с реальными почасовыми данными осадков (IMERG), что позволило моделировать городской сток и затопления в Самарканде с учётом его исторической и современной планировки. Хотя HEC-RAS широко применяется в исследованиях речного и паводкового стока, сравнительные работы по моделям с различной детальностью рельефа в сочетании с экстремальными сценариями осадков для конкретного центральноазиатского города ранее представлялись в ограниченном виде. Практическая значимость определяется тем, что результаты можно использовать при планировании городской инфраструктуры, проектировании систем ливневой канализации и защите культурного наследия Самарканда. Карты с граничными контурами затопления, рассчитанные по моделям с учётом неустановившегося течения, дают наглядное представление о зонах риска и необходимых мерах предосторожности.

В мировой практике анализ зон подтопления в урбанизированных районах часто базируется на интеграции гидравлических моделей (HEC-RAS, MIKE21, FLO-2D и других) с геоинформационными системами. Ряд исследований подчёркивает важность детализированных DEM при работе в городской среде, где микрорельеф и застройка значительно влияют на маршрутизацию потоков [1,2]. Многие авторы отмечают, что NASA SRTM DEM, хотя и обладает глобальным покрытием, не всегда отражает мелкомасштабные особенности рельефа, особенно в исторических районах [3,4,5]. В то же время более детальные радиолокационные DEM (например, ALOS PALSAR) позволяют воспроизводить локальные неровности, но требуют качественной калибровки [6,7]. Данные о осадках IMERG зарекомендовали себя как один из наиболее репрезентативных глобальных. В среднем, IMERG обеспечивает дневное пространственное разрешение до  $\sim 0,1^\circ$ , что приемлемо для оценки экстремальных осадков, хотя и требует локальных корректировок [8]. Результаты подобных исследований нередко демонстрируют, что экстремальные ливни способны вызвать опасное затопление даже при короткой продолжительности осадков, если город лишён адекватной дренажной инфраструктуры.

Таким образом, литературный обзор подтверждает актуальность поставленных нами задач и подчёркивает ценность подхода, сочетающего разномасштабные DEM, гидравлические расчёты неустановившегося течения и реальные сценарии осадков. В дальнейшем мы опишем, как именно мы реализовали данную методологию для города Самарканда, какие данные использовали и каким образом анализировали полученные результаты.

## 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Первым шагом стало уточнение контура городской территории (Region of Interest, ROI). Поскольку административные границы Самарканда могут варьироваться в зависимости от источника, мы решили опираться на базу OpenStreetMap (OSM), широко используемую в научном сообществе для получения актуальных геоданных. С помощью соответствующего API мы выгрузили полигон, отражающий общую границу города. Далее этот полигон был загружен в ГИС (ArcGIS), проверен на топологические ошибки и согласован с крупномасштабными картами. В результате получился чётко очерченный контур, ограничивающий нашу область исследования, и позволяющий отсекал все данные за пределами городской черты.

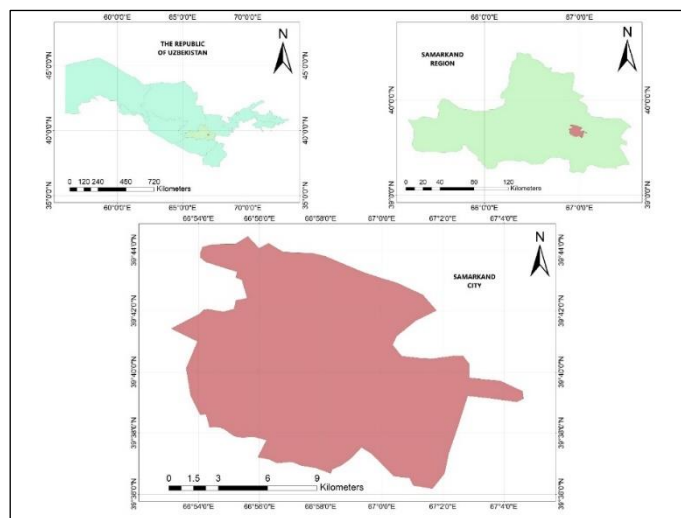


Рис. 1. Локация зоны интереса ROI

В качестве одного из источников рельефа мы выбрали глобальные данные NASA SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), доступные в разрешении 30 м (примерно 1 угл. секунда). Данный DEM был загружен для охватываемой ROI, после чего выполнили стандартные процедуры: выравнивание высот, сглаживание резких скачков и проверку непрерывности рельефа. Важно было убедиться, что в пределах городской территории нет существенных провалов или «шумов», и все лишние области за пределами ROI отсекались. Для большей детализации рельефа, особенно в густонаселённых или исторических кварталах, мы дополнительно используем ALOS PALSAR DEM с разрешением ~12,5 м, полученный в результате радиолокационного зондирования спутником ALOS. После загрузки данных мы применили базовые фильтры для минимизации помех, часто встречающихся при радиолокационных измерениях над городскими территориями. Все растры были переведены в EPSG:4326-32642, чтобы соответствовать ранее выбранной проекции. Подготовленный таким образом DEM12.5 (ALOS) служит вторым сценарием при дальнейших численных экспериментах.



Рис. 2. Затопленные зоны в г. Самарканд (источник: kun.uz 2020.04.06)

Для имитации интенсивной дождевой нагрузки мы обратились к спутниковым данным IMERG V06 (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM), созданным в рамках миссии GPM (Global Precipitation Measurement) агентства NASA. Из доступных временных рядов был выбран период активных осадков, зафиксированный 6 апреля 2020 года, когда в районе Самарканда наблюдались существенно повышенные дожди.

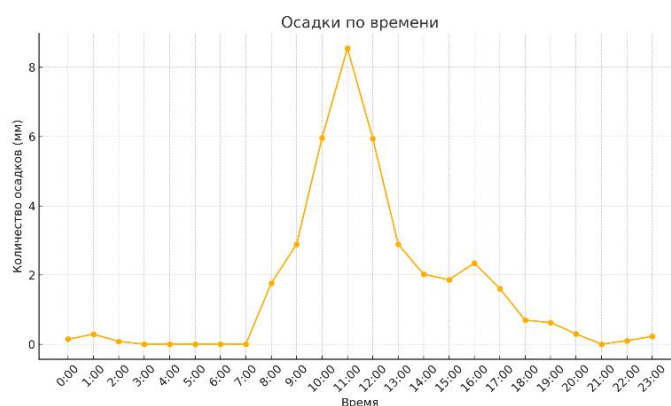


Рис. 3. Почасовые данные осадков в Самарканде за 06.04.2020

Данные IMERG загружались в сеточном формате с пространственным разрешением ~0,1° (около 10 км). Для включения этих осадков в расчёты HEC-RAS мы выполнили несколько шагов:

1. Проецирование и обрезка растров (или гридов) осадков по границам города (ROI), используя EPSG:4326 / EPSG:32642;
2. Интерполяция или перерасчёт данных, чтобы они согласовывались с временным шагом моделирования (например, почасовым или поквადровым) [9];
3. Подготовка сценариев, в которых осадки были заданы как общее поступление дождевой воды на территорию за счёт «Rainfall on Grid» (при 2D-моделировании в HEC-RAS).

Таким образом, мы получили возможность напрямую учитывать интенсивность и продолжительность дождей, характерных именно для 6 апреля 2020 года, и анализировать динамику подтоплений в городе на основании реального эпизода осадков.

Таблица 1. Основные характеристики использованных данных

Набор данных	Тип данных	Разрешение	Источник
EPSG:4326 (32642)	PROJECTED_CRS	Между 66°Е и 72°Е	EPSG(Европейская нефтяная исследовательская группа)
NASA SRTM DEM	Цифровая модель рельефа (ЦМР)	~30 м (1 угл. секунда)	NASA
ALOS PALSAR DEM	Цифровая модель рельефа (ЦМР, радиолокационные)	~12,5 м	JAXA (Японское агентство аэрокосмических исследований)
IMERG_V06 (данные осадков)	Гридированные данные осадков .csv (почасовая серия)	~0,1° (примерно 10 км)	NASA GPM (Global Precipitation Measurement), интегрированная продукция IMERG)
OpenStreetMap	Векторные географические данные .shp (границы, дороги и т. д.)	Не имеет фиксированного разрешения	Сообщество OpenStreetMap (непрерывно обновляемая открытая база)
Спутниковые изображения Google	Растровые изображения	Не имеет фиксированного разрешения	Google Satellite
Координаты потопленных участков	Координатные данные	-	МЧС РУз

В HEC-RAS мы сформировали новую 2D Flow Area, где в качестве основы для рельефа последовательно применяли два варианта DEM: SRTM 30 м и ALOS 12,5 м.

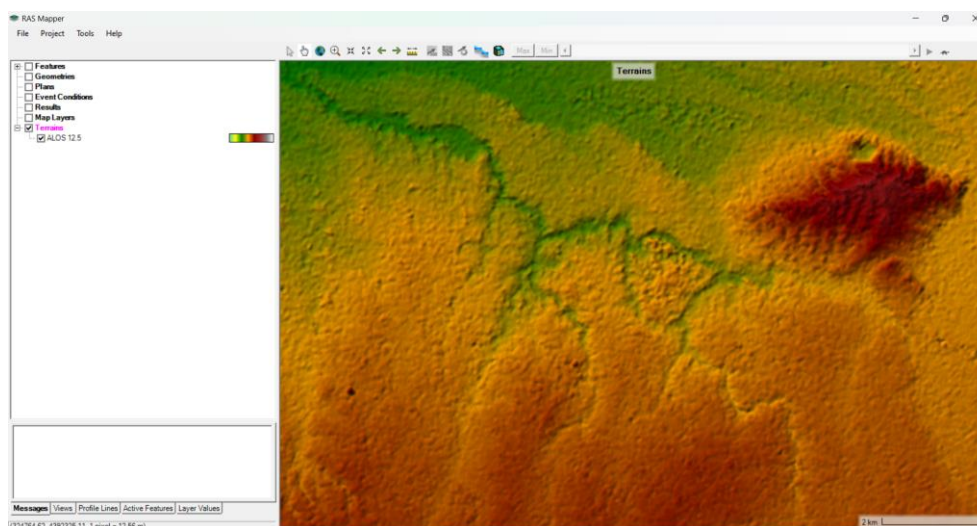


Рис. 4. Загрузка данных рельефа в платформе HEC-RAS

Для каждого из них создавалась своя расчётная сетка с шагом сетки, соответствующим исходному разрешению. На границах ROI указывались условия стока за пределы города (boundary condition line), чтобы вода могла оттекать естественным образом. В местах резких перепадов высот (дорожных насыпей, береговых линий каналов) добавлялись break lines, помогающие точнее учесть резкие изменения рельефа.

Чтобы воспроизвести процесс накопления воды при ливне, мы выбрали режим неустановившегося течения (unsteady flow), где осадки поступают во времени, а модель вычисляет последовательное изменение глубины и скорости потока на каждом шаге. В качестве граничных условий геометрии (geometry boundary conditions) мы указали нормальную глубину (Normal Depth) на тех участках, где поток покидает пределы модельной области. Коэффициент уклона или friction slope мы задали усреднённым, обычно варьируясь в районе 0,0125, что типично для смешанной городской среды, где есть как асфальтированные участки, так и грунтовые/травянистые зоны. Оптимальный временной шаг (time step) в двумерном моделировании зависит от размера ячеек и ожидаемой скорости распространения потока. При крупной сетке (30 м) мы могли использовать временной шаг порядка 15–30 секунд, а при мелкой сетке (12,5 м) шаг уменьшался до 5–10 секунд, чтобы обеспечить стабильность и адекватность решений. Перед основными прогонами мы проводили тестовые расчёты,

на которых проверялась устойчивость, отсутствие чрезмерных осцилляций и реалистичность движения воды.

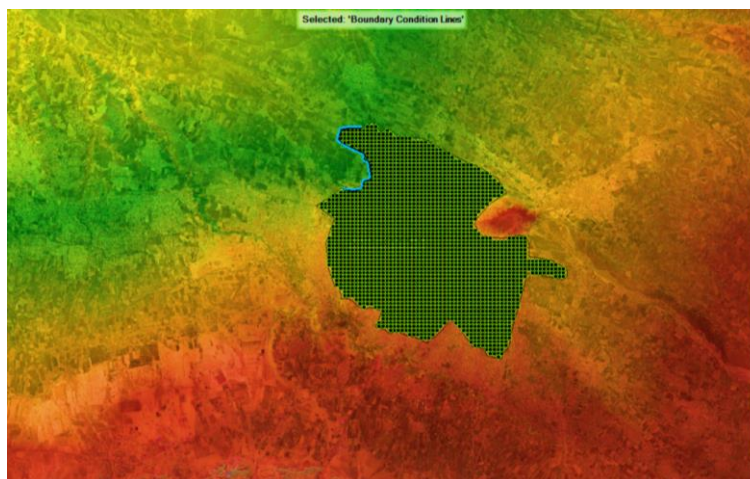


Рис. 5. Процесс создания сетки для выбранной геометрии



Рис. 6. Методологический процесс исследования

Для учёта дождевой нагрузки 6 апреля 2020 года значения IMERG были трансформированы в формат, который HEC-RAS способен считать при работе с 2D-моделированием осадков [10]. При любом из этих вариантов выходные вычисления дают динамический портрет накопления воды: вначале ячейки расчётной сетки начинают заполняться дождевой водой, а затем при достижении определённого уровня вода стекает в соседние ячейки или через boundary condition line, формируя потенциальные зоны затопления. Когда расчёт в HEC-RAS заканчивается, система создаёт массив результатов, включающих глубину (Depth), скорость (Velocity) и другие параметры (уровень воды,

объём стока и т. д.) на каждый временной шаг. С целью анализа и наглядного представления мы выгружаем эти данные в формат, совместимый с ГИС. Далее ArcGIS строим тематические карты, отражающие потенциальные зоны затопления, глубину наводнения и поля скорости воды.

На данном этапе особенно важно, что все данные уже находятся в одной системе координат — EPSG:4326 / EPSG:32642. Это упрощает наложение полученных слоёв на другие источники (например, базовые карты улиц или административных кварталов). Кроме того, мы можем создавать анимированные кадры, демонстрирующие, как распространяется вода во времени, что полезно при обсуждении вариантов реагирования на внезапные ливни. В связи с тем, что двумерные расчёты на мелкой сетке (12,5 м) довольно ресурсоёмки, мы проводили их на рабочей станции с многопроцессорной архитектурой (не менее 16 ядер) и объёмом оперативной памяти не менее 16 ГБ. Для каждой комбинации (DEM 30 м vs. DEM 12,5 м) и сценария ливня (6 апреля 2020) выполнялось несколько серий прогонов: тестовые, для определения оптимального временного шага, и итоговые, результаты которых сохранялись для дальнейшего анализа и построения карт.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате экстремального дождевого события 6 апреля 2020 года (по данным осадков GPM IMERG) в пределах города Самарканда была смоделирована паводковая обстановка с помощью 2D-модели HEC-RAS. Для оценки влияния топографических данных были выполнены два варианта расчёта: первый – с использованием глобальной модели высот NASA SRTM с шагом 30 м, второй – с использованием DEM ALOS PALSAR с разрешением ~12,5 м.

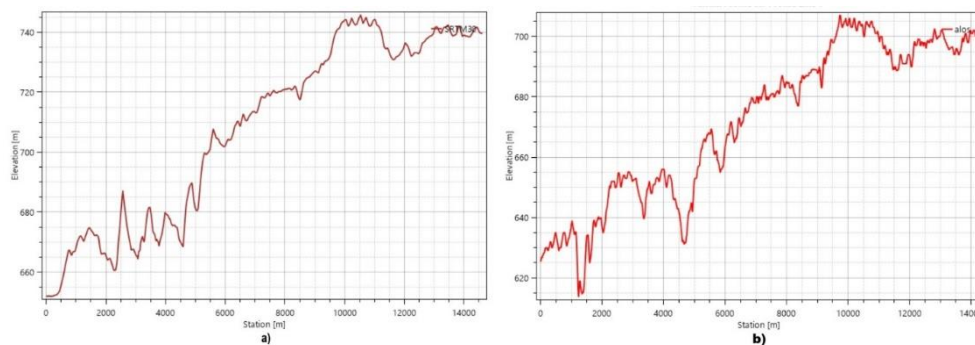


Рис. 7. а) Профиль рельефа SRTM 30 м б) Профиль рельефа ALOS 12.5 м

Оба цифровых модели рельефа (DEM) отличаются по детализации и точности, что отражается на прогнозируемых зонах затопления, глубинах воды и скоростях потока. Ниже приведено сравнение полученных результатов по глубине и скорости потока для этих двух вариантов, с акцентом на отличия каждого, а также подробный анализ семи ключевых точек подтопления в городе (координаты указаны).

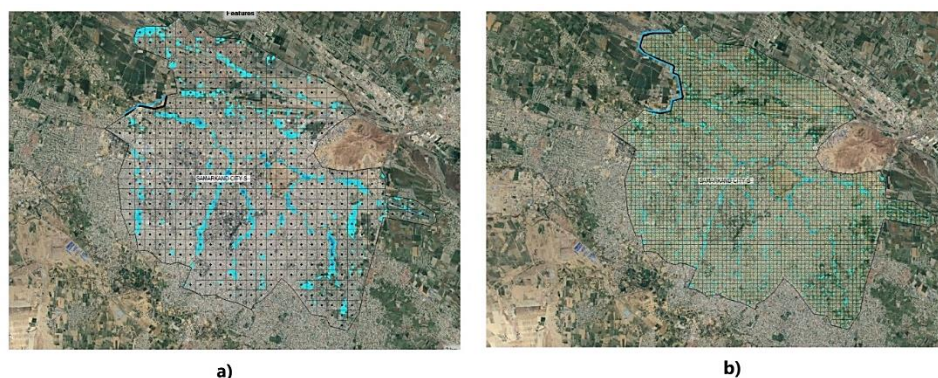


Рис. 8. а) Визуализация зон затопления SRTM 30 м, б) Визуализация зон затопления ALOS 12.5 м

Моделирование показало заметные различия в распределении глубин затопления при использовании разных DEM. В целом, расчет на основе SRTM 30 м дал более сглаженную картину: площадь затопления вышла больше, но средняя глубина воды меньше. Это согласуется с известной тенденцией, что грубые глобальные DEM могут переоценивать площадь охваченной водой и одно-

временно недооценивать глубину потока [11]. В нашем случае большая часть затопленной территории в сценарии SRTM относится к мелководью – условно  $<0,3$  м глубины (значительно больше доли мелкого затопления по сравнению с более детальными моделями) [12]. Такая модель отображает воду, «размазанную» тонким слоем по относительно широкой зоне.

Для варианта с ALOS PALSAR 12,5 м наблюдается обратная картина: благодаря более высокому разрешению рельефа вода концентрируется в низинах и руслах более локально. Это приводит к тому, что максимальные глубины местами получаются больше, чем в сценарии SRTM (например, на отдельных участках  $\sim 1,2$  м против  $\sim 0,8$ – $1,0$  м по SRTM). Более точное отображение мелких форм рельефа позволяет модели на основе ALOS выявлять узкие зоны глубокого подтопления, которые сглаженная SRTM может не показать. Суммарно площадь затопления по ALOS-DEM часто получается немного меньше, чем по SRTM, зато вода в этих зонах лежит более толстым слоем. Из литературных источников известно, что ограниченное разрешение SRTM может приводить к искусственному «застою» воды на рельефных барьерах и завышению уровня воды вверх по склону, в то время как вниз по потоку затопление недооценивается [12]. Наши результаты соответствуют этому: модель с SRTM показала некоторые локальные «лужи» на возвышенных участках, тогда как вариант с ALOS позволил воде протечь дальше, перераспределив объем воды вниз по рельефу. Таким образом, DEM ALOS 12,5 м даёт более контрастную и точную карту глубин – выделяются четкие зоны глубокого потока вдоль естественных низин, тогда как DEM SRTM 30 м отображает более расплывчатое, повсеместно мелкое затопление.

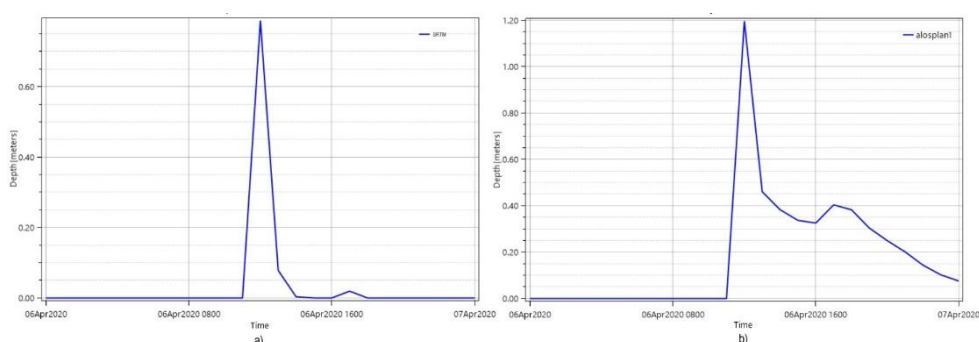


Рис. 9. а) Профиль глубины в SRTM 30 м. б) Профиль глубины в ALOS 12.5 м

Поле скоростей движения воды также претерпевает изменения в зависимости от модели рельефа. В расчёте с грубым DEM (SRTM 30 м) водный поток распределяется шире и медленнее. Размытая топография приводит к тому, что вода течет по относительно пологому градиенту, часто растекаясь в стороны, а не собираясь в четко очерченные русла. В результате расчётные скорости в сценарии SRTM в затопленных районах города, как правило, ниже: на открытых участках поток тихий (менее  $\sim 0,5$ – $0,8$  м/с), в потенциальных руслах максимумы скорости оцениваются порядка 1 м/с или чуть выше. Отсутствие деталей рельефа (узких протоков, мелких уклонов) не позволяет модели SRTM разогнать поток – вода чаще стоит или медленно движется на большой площади.

В случае с ALOS 12,5 м более детальный рельеф формирует направленные потоки по пониженным линиям местности. Здесь модель показывает более высокие пиковые скорости на этих участках, поскольку вода сконцентрирована и движется по крутым локальным уклонам. Можно отметить, что максимальные скорости потока в варианте ALOS выше, чем в SRTM. Например, вдоль главных русел внутри города скорость течения может достигать  $\sim 1,2$ – $1,5$  м/с (в местах сужения потока), тогда как в модели SRTM на тех же участках она ниже ( $\sim 0,8$ – $1,0$  м/с).

На периферии разлива, где вода растекается, скорости в обоих вариантах невысокие ( $<0,5$  м/с), но зона таких «медленных вод» по ALOS-DEM меньше, чем по SRTM. В целом карта скоростей для DEM ALOS выглядит более контрастной: отчётливо видны узкие полосы быстрого течения вдоль потоков и сравнительно сухие междуречья. Для DEM SRTM картина более диффузная – умеренные скорости распределены шире, но экстремальных значений почти нет. Это значит, что в модели с высоким разрешением могут проявляться опасные быстротекущие потоки в отдельных местах (важно для оценки ущерба и риска), тогда как грубый DEM сглаживает пики скорости. В реальности второй вариант считается более правдоподобным, поскольку учитывает особенности городского стока (направленного вдоль дорог, каналов и т.д.).

Особое внимание в моделировании уделялось семи контрольным точкам в пределах города Самарканд, где наблюдается подтопление (координаты заданы в задании). Ниже приведено сравнение рассчитанной глубины воды и скорости потока в этих точках для двух вариантов DEM, с кратким обсуждением отличий.

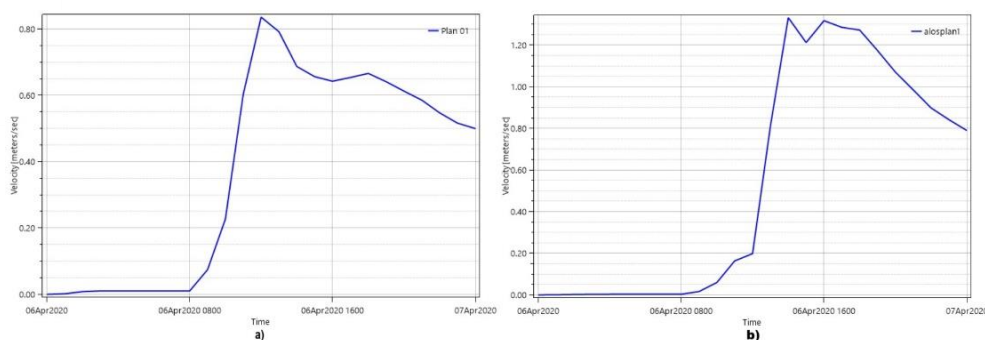


Рис. 10. а) Профиль скорости потока SRTM 30 м, б) Профиль скорости потока ALOS 12.5 м

Таблица 2. Промежуточные результаты классификации затопленных территорий различными методами

Точка	Координаты	Глубина (depth SRTM)	Скорость (velocity SRTM)	Глубина (depth ALOS)	Скорость (velocity ALOS)
1	39.65247, 66.97017	~0.8–0.9 м	~0.6 м/с	~1.1–1.2 м	~1.0 м/с
2	39.645503, 66.970734	~0.5 м	~0.4–0.5 м/с	~0.8 м	~0.7–0.8 м/с
3	39.672761, 66.956466	~1.0 м	~0.6 м/с	~1.3 м	~1.2 м/с
4	39.662907, 66.951448	~0.7 м	~0.5 м/с	~0.9–1.0 м	~0.8–0.9 м/с
5	39.680083, 66.904491	0.1–0.2 м	Практически 0 м/с	~0.3–0.4 м	~0.3–0.4 м
6	39.664258, 66.991683	~0.6 м	~0.5 м/с	~0.8 м	~0.7–0.8 м/с
7	39.683576, 66.949474	~1.9 м	~1.1 м/с	~2.3 м	~1.5 м/с

На основе сравнения можно отметить, что в большинстве контрольных точек DEM ALOS 12,5 м даёт большую глубину подтопления (на 0,2–0,4 м больше, чем SRTM) и более высокую скорость потока (на 0,2–0,5 м/с больше). В одной из точек (№5) модель с высоким разрешением выявила подтопление, вовсе отсутствующее в грубом DEM – важный нюанс для оценки риска. Эти различия объясняются тем, что высокдетализированный рельеф обеспечивает лучшую гидрологическую связность и точность: вода находит пути стока, формирует узкие глубокие потоки и доходит до окраин [13]. Напротив, грубый SRTM 30 м местами искажает картину: где-то «размазывает» воду тонким слоем (занижая глубины и скорости), а где-то препятствует стоку, создавая фиктивные запруды. Для города Самарканда в условиях ливня 6 апреля 2020 г. использование DEM ALOS 12,5 м позволяет точнее оценить масштабы подтопления: выделить наиболее глубокие опасные участки и быстрые потоки, что важно для прогнозирования ущерба и планирования защитных мер. SRTM 30 м, хотя и даёт общее представление о зоне затопления, сглаживает локальные экстремумы и может недооценивать риск на отдельных критических точках. Таким образом, вариант с ALOS PALSAR 12,5 м рекомендуется для более надежного картирования паводков в урбанизированной местности, тогда как SRTM 30 м пригоден разве что для грубой первичной оценки.

#### 4 ОБСУЖДЕНИЕ

Подтверждается критическая роль разрешения цифровой модели рельефа (DEM) в точности гидравлических расчетов. Как отмечают исследования, различное пространственное разрешение DEM может существенно влиять на результаты моделирования паводков. В нашем случае использование DEM с высоким разрешением позволило детальнее отразить микрорельеф местности и точно определить границы затопления, тогда как более грубая модель рельефа сглаживает топографию и может приводить к упрощению контура паводковой зоны. Литературные источники указывают, что повышение детализации рельефа, например с SRTM (~30 м) до более мелкого шага сетки, заметно повышает достоверность результатов [14]. В то же время следует учитывать, что сверхвысокое разрешение DEM не гарантирует пропорционального роста точности – при отсутствии калибровки и наличии иных неопределенностей модели слишком подробная сетка (>10 м) может не давать значимого выигрыша [15]. Таким образом, результаты нашего моделирования подтверждают

необходимость качественных топографических данных: модель HEC-RAS способна точно прогнозировать зону затопления при условии использования адекватного DEM, отражающего реальные особенности рельефа исследуемой территории.

Следует также обсудить ограничения примененной модели и возможные источники погрешностей. Во-первых, точность DEM сама по себе ограничена: общедоступные данные (например, SRTM с шагом ~30 м) имеют относительно крупный пиксель и погрешности по высоте, что для отдельных городских условий может быть недостаточно [16]. Мелкие гидрографические объекты (канавы, арыки) и искусственные возвышения (дороги, дамбы) могут не отразиться на DEM с низким разрешением, вследствие чего модель пропустит важные детали рельефа. Во-вторых, отсутствие детальной батиметрической информации о руслах рек и каналов в Самарканде ограничивает точность симуляции: если глубина русла недооценена, модель может переоценивать площадь разлива, и наоборот. Кроме того, HEC-RAS как инструмент моделирования накладывает свои допущения. При 1D-моделировании поток воды вне русла описывается упрощенно, что может приводить к неточностям в сложных урбанизированных ландшафтах. 2D-режим HEC-RAS позволяет более реалистично воспроизвести распределение воды по территории, однако требует качественной сетки и может сталкиваться с численной неустойчивостью при грубой дискретизации или неверно заданных граничных условиях. Неопределенности в исходных гидрологических данных (например, расчётных паводковых расходах или интенсивности дождя) также влияют на результаты. Именно неточности топографических и гидрологических данных признаны одним из главных источников неопределенности в прогнозировании наводнений [17]. Таким образом, модельные результаты необходимо трактовать с осторожностью, понимая заложенные упрощения: несмотря на общее соответствие ожидаемым зонам подтопления, возможны отклонения из-за ограничений данных и модели.

На основе выявленных зон затопления можно выработать практические рекомендации для градостроительства и гидрологического мониторинга в Самарканде. Рекомендуется ограничить новое строительство и размещение критически важных объектов в выявленных зонах подтопления. Эти территории целесообразно резервировать под парки, сельскохозяйственные угодья или другие малочувствительные виды использования, либо предусматривать при застройке инженерные меры защиты (поднятие зданий на свайных фундаментах, обвалование, локальные дамбы). В уже застроенных подтопляемых районах следует внедрять меры по повышению устойчивости зданий к паводкам и создать системы оповещения населения. Выявленные низинные участки, где скапливается паводковая вода, требуют особого внимания со стороны коммунальных служб. Необходимо увеличить пропускную способность ливневой канализации, очистить и углубить русла арыков и каналов, чтобы обеспечить отвод воды во время ливней. В наиболее уязвимых местах возможно сооружение регулирующих водоемов или сухих болот (паводковых резервуаров), способных временно аккумулировать избыточный сток и тем самым снизить пик нагрузки на городскую территорию. Усиление гидрологического мониторинга и актуализация данных. На основе карт подтопления следует организовать систему мониторинга, ориентированную на раннее предупреждение наводнений. Рекомендуется установить дополнительные дождемеры в водосборе, а также гидропосты на ключевых водотоках, влияющих на город. Это позволит в реальном времени отслеживать приближение опасных явлений и своевременно информировать городские службы и население. Кроме того, важно регулярно актуализировать цифровую модель рельефа – например, проводить аэрофотосъемку или лазерное сканирование (LiDAR) по мере изменения городской застройки и русловых условий. Периодическое уточнение модели (включая калибровку на основе данных о фактических событиях затопления) будет повышать точность прогнозирования и надежность карт риска.

## 5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе нашего исследования мы провели детальное моделирование зон затопления в городе Самарканд, применяя комплекс HEC-RAS и различные цифровые модели рельефа. Мы показали, что высокое разрешение DEM позволяет точнее определять углубления рельефа, в которых концентрируется вода, и таким образом надёжнее прогнозировать не только площадь подтопления, но и критические значения глубины и скорости потока. Наша работа подчёркивает, насколько важна тщательная подготовка входных данных: от выбора DEM до корректного задания дождевых сценариев (на основе реальных эпизодов осадков, таких как ливень и град, зафиксированные 6 апреля 2020 года). Мы выяснили, что в случае применения глобальной модели рельефа с грубым разрешением (30 м) часть локаций, где реально наблюдалось подтопление, может ошибочно не попадать в зону затопления или демонстрировать слишком мелкое разлитие воды. В то же время более детализированная DEM отражает локальные особенности городского ландшафта, позволяя выявить узкие каналы, дорожные насыпи и иные факторы, влияющие на движение потока. Это позволяет уточнить

глубину, скорость и направления стока, что критически важно при оценке ущерба и разработке мер по снижению риска.

Мы убеждены, что наши результаты предоставляют ценную основу для принятия управленческих решений в городе Самарканде. Выявленные зоны подтопления и их характеристики могут применяться при градостроительном планировании, модернизации ливневой канализации, развитии системы гидрологического мониторинга и формировании планов защиты важных социально-экономических и культурных объектов. Кроме того, наш подход способен служить моделью для аналогичных исследований в других урбанизированных территориях, где необходим комплексный учёт рельефа, данных спутникового мониторинга осадков и возможностей двухмерного гидравлического моделирования для снижения негативных последствий паводков и ливней.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Addison-Atkinson, W., Chen, A. S., Memon, F. A., & Chang, T.-J.* (2022). Modelling urban sewer flooding and quantitative microbial risk assessment: A critical review. *Journal of Flood Risk Management*, 15(4), e12844. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12844>
- [2] *Mark, Ole & Weesakul, Sutat & Apirumanekul, Chusit & Boonya-aroonnet, Surajate & Djordjević, Slobodan.* (2004). Potential and limitations of 1D modeling of urban flooding. *Journal of Hydrology*. 299. 284-299. 10.1016/j.jhydrol.2004.08.014.
- [3] *Kh Khasanov* 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 883 012063 DOI 10.1088/1757-899X/883/1/012063
- [4] *Garrote, J.* (2022). Free Global DEMs and Flood Modelling—A Comparison Analysis for the January 2015 Flooding Event in Mocuba City (Mozambique). *Water*, 14(2), 176. <https://doi.org/10.3390/w14020176>
- [5] *Al-Areeq, Ahmed & Sharif, HO & Abba, Sani & Chowdhury, Shakhawat & Al-Suwaiyan, Mohammed & Benaafi, Mohammed & Yassin, Mohamed & Aljundi, Isam.* (2023). Digital elevation model for flood hazards analysis in complex terrain: Case study from Jeddah, Saudi Arabia. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. 119. 10.1016/j.jag.2023.103330.
- [6] *A. Alcántara Boza and A. Castro Tenorio*, “Determination of flood zones with HEC-RAS in zones of the Central Andes mountain range. Microcuenca Saraus-La Llanga river. Celendin”, *Rev. Inst. investig. Fac. minas metal cienc. geogr.*, vol. 24, no. 48, pp. 181–187, Dec. 2021, doi: 10.15381/iigeo.v24i48.19852.
- [7] *I. Made I.M. Brunner*, Prediction of Urban Growth Using the Bucket Model, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 227, 2016, Pages 3-10, ISSN 1877-0428, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.06.036>.
- [8] *Jinghua Xiong, Guoqiang Tang, Yuting Yang*, Continental evaluation of GPM IMERG V07B precipitation on a sub-daily scale, *Remote Sensing of Environment*, Volume 321, 2025, 114690, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114690>.
- [9] *Awad, Anas & Wikantika, Ketut & Windupranata, Wiwin & Virtriana, Riantini.* (2025). Multi-scenario modelling framework for afforestation strategies to mitigate runoff and flooding across storm return periods in tropical large river basins: the Upper Citarum case. *International Journal of River Basin Management*. 1-24. 10.1080/15715124.2025.2457543.
- [10] *L. Sciuto, F. Licciardello, E.R. Giuffrida, S. Barresi, V. Scavera, D. Verde, S. Barbagallo, G.L. Cirelli*, Hydrological-hydraulic modelling to assess Nature-Based Solutions for flood risk mitigation in an urban area of Catania (Sicily, Italy), *Nature-Based Solutions*, Volume 7, 2025, 100210, ISSN 2772-4115, <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100210>.
- [11] *md ali, Anuar & Solomatine, Dimitri & Di Baldassarre, Giuliano.* (2015). Assessing the impact of different sources of topographic data on 1-D hydraulic modelling of floods. *Hydrology and Earth System Sciences*. 19. 631-643. 10.5194/hess-19-631-2015.
- [12] *Zandsalimi, Zanko & Feizabadi, Sajjad & Yazdi, Jafar & Neyshabouri, Seyed.* (2024). Evaluating the Impact of Digital Elevation Models on Urban Flood Modeling: A Comprehensive Analysis of Flood Inundation, Hazard Mapping, and Damage Estimation. *Water Resources Management*. 38. 10.1007/s11269-024-03862-4.
- [13] *Kim, Dong-Eon & Gourbesville, Philippe & Liong, Shie-Yui.* (2019). Overcoming data scarcity in flood hazard assessment using remote sensing and artificial neural network. *Smart Water*. 4. 10.1186/s40713-018-0014-5.

- [14] Interpretation of Flood Zone Mapping using HEC-RAS Hydraulic Model for the Bennihalla Stream through 1D Flow Analysis Vinayak S. Naikar, Rajkumar V. Raikar E3S Web of Conf. 559 04022 (2024) DOI: 10.1051/e3sconf/202455904022
- [15] <https://www.climate-x.com/articles/science/flood-model-resolution-does-size-matter#:~:text=It%E2%80%99s%20intuitive%20to%20think%20that%20underpins%20the%20model%20itself>
- [16] Ongdas, N., Akiyanova, F., Karakulov, Y., Muratbayeva, A., & Zinabdin, N. (2020). Application of HEC-RAS (2D) for Flood Hazard Maps Generation for Yesil (Ishim) River in Kazakhstan. *Water*, 12(10), 2672. <https://doi.org/10.3390/w12102672>
- [17] Costabile, P.; Costanzo, C.; Ferraro, D.; Macchione, F.; Petaccia, G. Performances of the new HEC-RAS version 5 for 2-D hydrodynamic based rainfall-runoff simulations at basin scale: Comparison with a state-of-the art model. *Water* 2020, 12, 2326

Поступила в редакцию 28.01.2025

**Цитирование:** Абатов Ш., Худаярова Ш. (2025). Сравнение цифровых моделей рельефа при анализе и визуализация зон с риском затопления в городе Самарканд, используя HEC-RAS. *Международный Журнал Теоретических и Прикладных Вопросов Цифровых Технологий*, 8(1), –С. 37-47. <https://doi.org/10.62132/ijdt.v8i1.231>.

## COMPARISON OF DIGITAL ELEVATION MODELS IN ANALYZING AND VISUALIZATION OF FLOOD RISK ZONES IN THE CITY OF SAMARKAND USING HEC-RAS

+ Abatov Sh.<sup>1</sup>, Khudoyarova Sh.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samarkand branch of Tashkent university of information technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Samarkand, Uzbekistan

<sup>2</sup> Samarkand State University named after Sharof Rashidov, Samarkand, Uzbekistan

+ yoprince93@gmail.com

**Abstract.** In our study, we developed and tested a comprehensive approach to assess flood risk zones in Samarkand city by integrating data from digital elevation models of different resolutions (NASA SRTM - 30 m, ALOS PALSAR DEM- 12.5 m) and hourly precipitation data from IMERG archive. The boundaries of the urban area were obtained from the OpenStreetMap open source database. For modeling of waterlogging hydrodynamics we used HEC-RAS software package in unsteady flow mode, taking into account normal depth as a boundary condition and with a given friction slope (friction slope = 0.0125). We comparatively analyzed the results at different DEM resolutions and also took into account extreme precipitation events by filtering out the highest values from IMERG. The resulting depth and velocity maps allowed us to identify critical areas within the city limits and formulate recommendations for damage mitigation. This approach can be used as a methodological basis for further work on hydrological risk assessment and planning of measures to protect the population and infrastructure in fast-growing cities.

**Keywords:** Samarkand, HEC-RAS, flooding, NASA SRTM DEM, ALOS PALSAR DEM, IMERG, ur-ban flood, unsteady flow, hydraulic modeling, OpenStreetMap.