

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	6
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	8
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	9
ВВЕДЕНИЕ.....	10
1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ	13
1.1 Классические алгоритмы.....	13
1.1.1 Метод обратно взвешенных расстояний	13
1.1.2 Интерполяция сплайном.....	14
1.1.3 Кригинг	14
1.1.4 Интерполяция Сибсона	15
1.1.5 ANUDEM	16
1.1.6 Полиномиальная интерполяция.....	16
1.1.7 Метод триангулированной нерегулярной сети.....	17
1.1.8 Метод радиально-базисной функции.....	17
1.2 Алгоритмы глубокого машинного обучения.....	18
1.2.1 Сверточная нейронная сеть.....	18
1.2.2 Остаточная нейронная сеть.....	20
1.2.3 Генеративно-состязательная сеть.....	21
1.3 Сравнение методов.....	22
2. ПОИСК И АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ	25
1.4 Анализ DEM.....	25
1.5 Анализ наборов данных городских застроек.....	27
1.6 Поиск и анализ карт высот высокого разрешения	29
1.6.1 USGS National Map 3DEP.....	29
1.6.2 Синтетическая генерация исходных данных	30

3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАБОТЫ АЛГОРИТМА.....	32
1.7 Анализ FABDEM.....	32
1.8 Разработка схемы алгоритма.....	33
4. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА	36
1.9 Создание набора данных для алгоритма.....	36
1.9.1 Наложение WSF-2019 на GLO-30	36
1.9.2 Наложение зданий из OSM на GLO-30.....	37
1.9.3 Интерполяция 3DEP.....	39
1.9.4 Результат создание набора данных	39
1.10 Предварительная обработка данных	40
1.11 Обучение SRGAN.....	43
1.12 Восстановление зданий.....	44
5. ПРОВЕРКА РАБОТЫ АЛГОРИТМА.....	46
1.13 Синтез эталонных данных	46
1.14 Оценка работы алгоритма.....	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	53
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	55

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

DEM – цифровая модель рельефа (digital elevation model)

DSM – цифровая модель поверхности (digital surface model)

DTM – цифровая модель рельефа (digital terrain model)

CNN – сверточная нейронная сеть (convolutional neural network)

GAN - генеративно-сопоставительная сеть (generative adversarial network)

ResNet – остаточная нейронная сеть (residual neural network)

IDW - метод обратно взвешенных расстояний (inverse distance weighting)

SRGAN – Super resolution GAN (GAN предназначенная для увеличения изображений)

MSE – среднеквадратическая ошибка (mean squared error)

PSNR – пиковое отношение сигнала к шуму (peak signal-to-noise ratio), означающее соотношение между максимумом возможного значения сигнала и мощностью шума.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Геоморфология – наука о рельефе, его внешнем облике, происхождении, истории развития, современной динамике и закономерностях распространения.

Интерполяция – способ нахождения промежуточных значений величины по имеющемуся дискретному набору известных значений.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы для проектирования городов и анализа природных явлений, связанных с ландшафтом, используют цифровые карты, составленные с помощью сканированных снимков Земли, полученных из космоса или при помощи летательных аппаратов. Такие карты называются DEM или DSM, с их помощью можно отслеживать изменения русел рек, высот гор, размеры лесов и моделировать ландшафт для дальнейшего его использования в проектировании.

В случае сканирования из космоса точность DEM составляет 30 метров в районе экватора, но из-за сферической формы Земли и траекторий полета спутников, в областях северный и южных широт появляются значительные искажения. При этом, чем дальше исследуемая область от экватора, тем сильнее на неё действует искажение. Кроме этого, при подобной погрешности, дороги и здания становятся трудно различимыми на картах высот городов (рисунок 1).

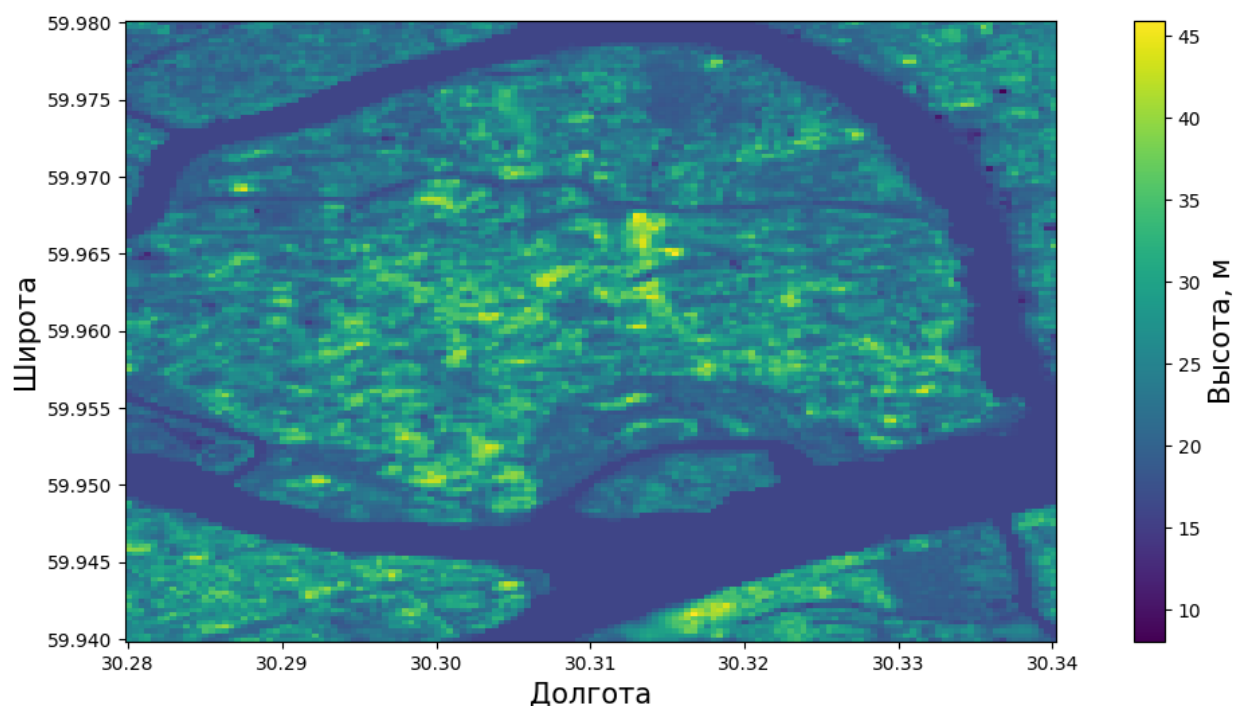


Рисунок 1 – DEM Петроградского острова с разрешением 30 м

В случае сканирования при помощи летательных аппаратов получаются более точные карты, но не всегда является возможным из-за ограничений на полёты, погодных условий или запаса топлива или аккумуляторной батареи для облёта всей исследуемой области. Чаще всего съёмка происходит при помощи небольших беспилотных аппаратов, поэтому из-за ветра и неточности в позиционировании оборудования шаг сканирования является непостоянным, что приводит к погрешностям в сетке карты, и как следствие к ухудшению разрешения DEM.

Вопрос разрешения DEM особенно важен в сфере геоморфологии – науке о рельефе, его внешнем облике, происхождении, истории развития, современной динамике и закономерностях распространения [3]. В зависимости от вида исследования необходимы карты различного разрешения. Для исследования водоразделов и их симуляции необходимы карты с разрешением от 30 м и меньше [33], при прогнозировании обвалов камней на локальном уровне необходима точность в 1 метр, а на региональном уровне подойдут DEM с разрешением в 5, 12,5 и 25 м [40]. Также карты с точностью в 10 метров показывают себя лучше всего при прогнозировании оползней [35], а для симуляции образования и таяния снежных покровов подходят DEM с разрешением от 8 до 250 м [6].

Также на основе DEM городов исследуют морфологию городских застроек, например ценообразования на недвижимость [42], скорость ветра между постройками [24] или оценки наводнений [19]. Кроме этого, такие карты используют для постройки цифрового двойника города для планирования и улучшения инфраструктуры и постройки новых районов.

Кроме выше сказанного, DEM используются для создания виртуальных трёхмерных моделей ландшафтов для интерактивной визуализации, а в сфере разработки игр такие модели используются для создания реалистичных игровых миров, что позволяет ускорить и удешевить разработку так как художникам не приходится вручную создавать такие ландшафты. Но для

воссоздания городского ландшафта на основе DEM необходимо максимально возможная точность, для наилучшего погружения игрока.

Множество исследований направлены на улучшение качества карт высот: одни пытаются добиться повышения точности разработкой более точного оборудования и методов для сканирования, а другие при помощи алгоритмов интерполяции. Такие алгоритмы позволяют увеличивать разрешение уже отсканированных DEM, что позволяет использовать карты с меньшей точностью для проведения исследований, не используя более дорогое и точное оборудование. Но большинство алгоритмов изначально применялись для карт природного ландшафта, который сильно отличается от ландшафта городской застройки, из-за чего результирующие карты могут обладать большим количеством ошибок.

Поэтому целью данной работы является создание алгоритма для увеличения разрешения карт высот городской застройки.

В задачи входило:

- 1) Исследование существующих методов интерполяции.
- 2) Поиск и анализ карт высот.
- 3) Формирование набора исходных данных.
- 4) Разработка метода увеличения разрешения карт высот городской застройки.
- 5) Реализация разработанного алгоритма.
- 6) Исследование точности метода и его сравнение с другими алгоритмами.

1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ

В исследованиях в области улучшения качества карт высот выбранная проблема практически не рассматривается, поэтому были рассмотрены алгоритмы, использующиеся в смежных проблематиках карт природного ландшафта.

При анализе существующих решений были рассмотрены две группы алгоритмов и сферы их применения: классические алгоритмы и алгоритмы, основанные на использовании глубокого машинного обучения.

1.1 Классические алгоритмы

1.1.1 Метод обратно взвешенных расстояний

Метод обратно взвешенных расстояний (IDW) основан на предположении, что более близкие известные точки влияют на интерполяцию неизвестных точек сильнее. Другими словами, значения находящиеся поблизости более подобны друг другу, чем удалённые [43]. Этот метод является эффективным и интуитивно понятным и лучше всего работает на равномерно распределённых изначальных данных.

Простейшая форма данного алгоритма – это метод Шепарда [4, 5], в котором значение интерполируемой точки $E(x, y)$ рассчитывается, как:

$$E(x, y) = \sum_{j=0}^n \omega_j E(x_j, y_j), \quad (1)$$

где. ω_j – вес известной точки с координатами (x_j, y_j) , который рассчитывается по формуле (2).

$$\omega_j = \frac{h_j^{-p}}{\sum_{i=0}^n h_i^{-p}}, \quad (2)$$

где, p – произвольный положительный степенной параметр, обычно равный 2, а h_i – расстояние от известной точки до интерполируемой равно:

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}. \quad (3)$$

Часто для увеличения скорости расчётов значение интерполируемой точки рассчитывается из значения точек в определённом радиусе от неё.

Метод обратно взвешенных расстояний является классическим методом интерполяции, именно поэтому его сравнивают с другими алгоритмами интерполяции в большинстве рассмотренных исследований.

Из недостатков метода можно выделить чувствительность к кластеризации данных и к выпадающим значениям.

1.1.2 Интерполяция сплайном

Интерполяция сплайном – это другой детерминированный метод интерполяции, то есть расчёт проводится в окрестности интерполируемого значения. Этот метод строит поверхность через все известные точки таким образом, чтобы кривизна поверхности была минимальной [44]. Такой метод лучше всего работает с несильно менявшимся ландшафтом. Недостатком данного метода является чувствительность к выпадающим значениям, так как прохождение поверхности через все точки является обязательным условием алгоритма [5].

1.1.3 Кригинг

Кригинг, в отличие от интерполяции сплайном и метода обратно взвешенных расстояний, является геостатистическим методом [4, 45], то есть учитывает статистические характеристики распределения исходных данных.

Формула значения высоты интерполируемой точки похожа на метод обратно взвешенных расстояний и выглядит так:

$$E(x, y) = \sum_{j=0}^n \lambda_j E(x_j, y_j), \quad (4)$$

где λ_j – неизвестный вес, который зависит не только от расстояния до известных точек, но и от их пространственного расположения, который является решением системы линейных уравнений (5), которая выводится из предположения, что $E(x, y)$ является траекторией выборки случайного процесса $F(x, y)$ и имеет ошибку

$$\varepsilon(x, y) = F(x, y) - \sum_{j=0}^n \lambda_j E(x_j, y_j), \quad (5)$$

которую необходимо минимизировать. Выбор процесса (вариограммы) $F(x, y)$ основывается на статистических показателях исходных данных. В результате алгоритма мы получаем не только интерполированную карту ландшафта, но и плоскость предполагаемой ошибки.

Недостатками кригинга по сравнению с предыдущими алгоритмами является вычислительная сложность и необходимость выбора пользователем $F(x, y)$ на основе предварительного анализа ландшафта [5].

1.1.4 Интерполяция Сибсона

Интерполяция Сибсона или интерполяция естественной окрестности (Natural Neighbor), заключается в предварительном построении диаграммы Вороного и определения веса точки за счёт площади областей на ней [39, 43]. То есть пространство разбивается на области с исходными точками, таким образом, что любая точка пространства находится в области ближайшей к ней известной точке (рисунок 2). После этого встраивается новая точка и диаграмма перерисовывается, при этом значение точки выбирается как средневзвешенное среди ближайших, где вес – это площадь пересечения области искомой точки с известной.

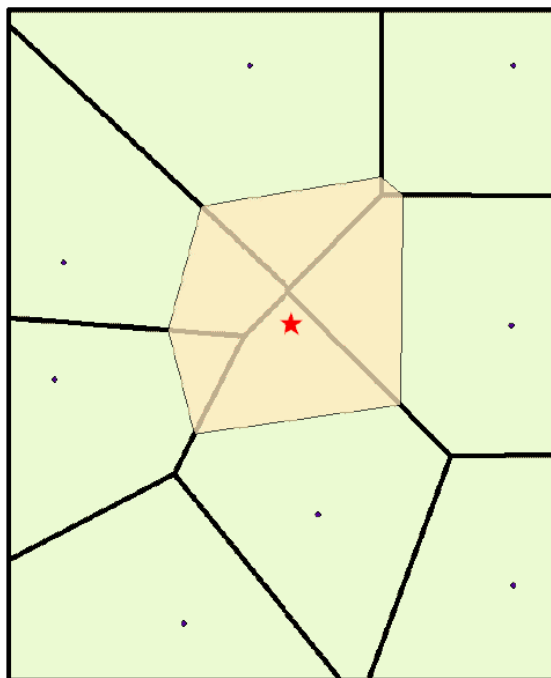


Рисунок 2 – Диаграмма Вороного

Метод позволяет избежать пиков, ям, хребтов и долин, которых не было в исходных данных, так как значение интерполируемых точек находится в пределах значений соседних известных. Алгоритм хорошо работает на данных с неоднородным распределением точек [2].

Также за счёт проверки только ближайших точек алгоритм обладает высокой производительностью [7].

1.1.5 ANUDEM

ANUDEM (Australian National University DEM) – специальный метод для создания гидрологически корректных карт [21]. Также его называют «Топо в растр» [46], так как из исходных топологических данных получается карта со структурой сетки, то есть точки в ней расположены как в растровом изображении.

Метод заключается в симуляции коррозии поверхности от движения воды, то есть по изначальным данным о водных источниках и поверхности происходит понижение отдельных точек участвующих в течении воды, что позволяет создавать реалистичную интерполированную карту. Но для достижения лучшего результата необходима предварительная обработка данных на выделение рек, озёр и линий обрывов, что не всегда возможно выделить из DEM низкого разрешения.

1.1.6 Полиномиальная интерполяция

Полиномиальная интерполяция заключается в подборе коэффициентов полиномиальной функции для построения поверхности, максимально подходящей под исходные данные [47]. Данный вид интерполяции может использоваться для грубой оценки ландшафта всей карты или для интерполяции её отдельных участков [48]. Для подбора коэффициентов используют метод наименьших квадратов.

При этом в зависимости от степени полинома поверхности интерполяция имеет устоявшиеся названия: билинейная – для линейного полинома, биквадратная – для полинома второго порядка и бикубическая – для

полинома третьего порядка. Чаще всего используют первую и последнюю. Например, в работе [23] успешно произвели интерполяцию DEM разрешением в 90 м до разрешения в 30 м при помощи бикубической интерполяции.

1.1.7 Метод триангулированной нерегулярной сети

Триангулированная нерегулярная сеть (TIN) – это модель ландшафта, которая является сетью треугольников, вершинами которых являются известные точки (рисунок 3) [49]. Данный способ позволяет получить модель поверхности с неравномерным распределением точек, при этом чем больше скопление точек в области, тем более детализированной будет эта область. Данная особенность позволяет строить карты с высоким разрешением, если плотность данных на неравномерных участках ландшафта больше плотности данных на равномерных участках.

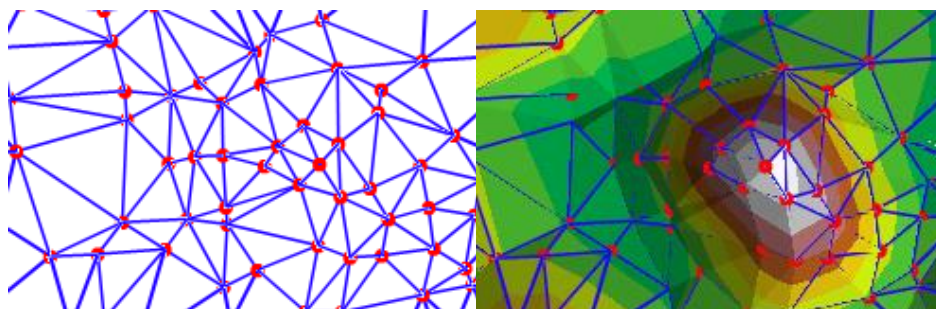


Рисунок 3 – Триангулированная нерегулярная сеть

Также при построении TIN есть вариации в выборе пар для создания рёбер треугольной сетки, что сильно влияет на качество карты и её точность[26].

1.1.8 Метод радиально-базисной функции

Метод радиально-базисной функции схож с методом обратно взвешенных расстояний, но при вычислении интерполируемой точки в качестве весов для известных точек берутся не обратные расстояния а значения базисной функции этой точки [8, 50].

Например, в одномерном случае есть две точки с координатами $x_1 = 0,75$ и $x_2 = 3,25$, а в качестве радиально-базисной функции взята

ненормализованная гауссова, тогда получим график двух функций (рисунок 4), по которому можно получить веса обеих точек для любой новой точки на оси.

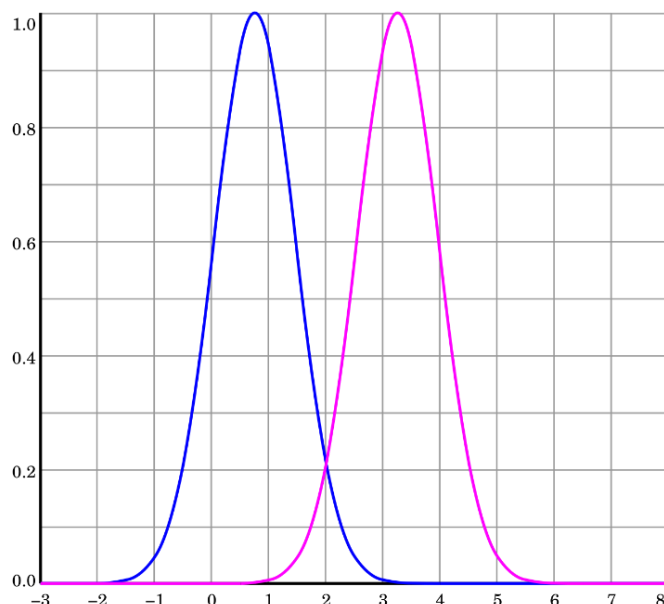


Рисунок 4 – Две ненормализованных гауссовых радиальных базисных функций одной переменной, с центрами в точках $x_1 = 0,75$ и $x_2 = 3,25$

Данный алгоритм подходит для интерполяции гладких поверхностей и несильно изменяющейся высотой, также в отличие от метода обратно взвешенных расстояний значение интерполируемых точек может лежать вне пределов исходных данных.

1.2 Алгоритмы глубокого машинного обучения

Развитие и популярность нейронных сетей отразились на алгоритмах воссоздания DEM для увеличения точности карт, а также для заполнения в них отдельных неизученных участков.

1.2.1 Сверточная нейронная сеть

Сверточная нейронная сеть или CNN – модель нейронной сети, в которой присутствует слой свёртки (convolutional layer), кроме того, в классическом варианте присутствуют слой под выборки (pooling layer) и полносвязный слой (full-connected layer) [1, 17, 30].

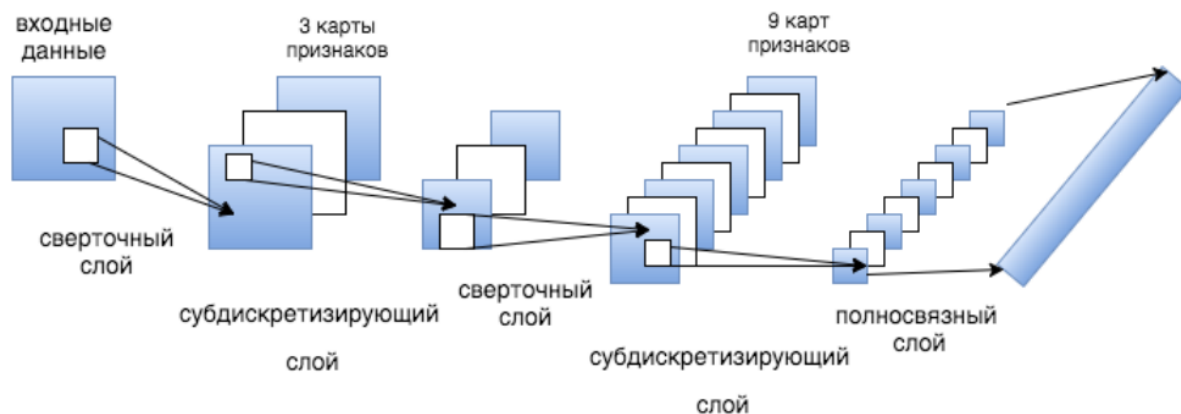


Рисунок 5 – Схема работы LeNet5

В классическом варианте под названием LeNet5 (рисунок 5) на вход подается изображение, которое посредством применения фильтров (kernel) переводится в карты признаков (рисунок 6), количество которых равно количеству фильтров. После этого происходит обработка слоем выборки, который подобно предыдущему уменьшает карту признаков и выделить существенные значения. Чаще всего на этом шаге изображение уменьшается в два раза, посредством суммирования, выделения максимума или среднего четырёх ближайших значений.

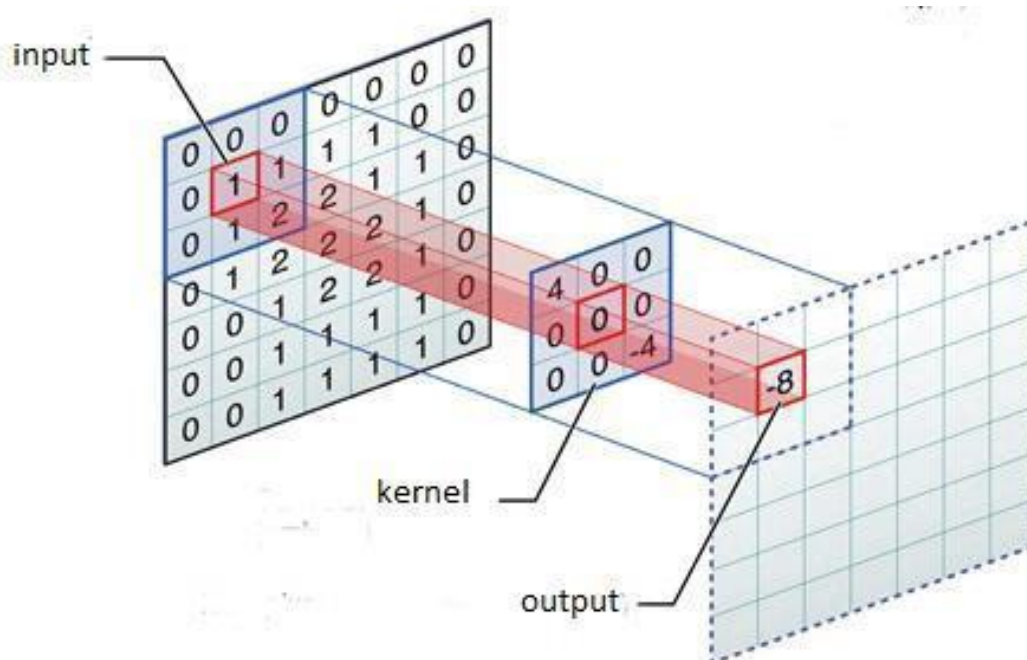


Рисунок 6 – Вычисление результата карты признаков

Далее процесс свертки и выборки повторяется до тех пор, пока карты признаков не будут размером в один пиксель, после чего они попадают в последний полносвязный слой, в котором количество нейронов равно количеству классифицируемых объектов. В результате в каждом последнем нейроне будет вероятность отнесения изображения к соответствующему классу.

Одна из причин для использования данной нейронной сети – это возможность выделения особенностей изображения за счёт различных вариантов фильтров в момент свертки, например, она позволяет выделить края объектов в изображении. Это используется для выделения особенностей рельефа и увеличения точности карт, как природной местности [11], так и городской застройки [22].

1.2.2 Остаточная нейронная сеть

Остаточная нейронная сеть или ResNet – это сеть, основанная на сверточной сети, а ее главное отличие заключается в том, что каждый слой связан не только с соседними слоями, но также может быть связан со всеми предыдущими слоями (рисунок 7), что позволяет не терять особенности найденные на предыдущих слоях, а также создавать более глубокие нейронные сети с меньшим количеством параметров для обучения [25].

Нейронные сети данного типа также используются для увеличения точности DEM и заполнения пропусков в них, при этом в зависимости от параметров модели и карты ResNet работает в одних случаях лучше, а в других хуже по сравнению с CNN [37, 41].

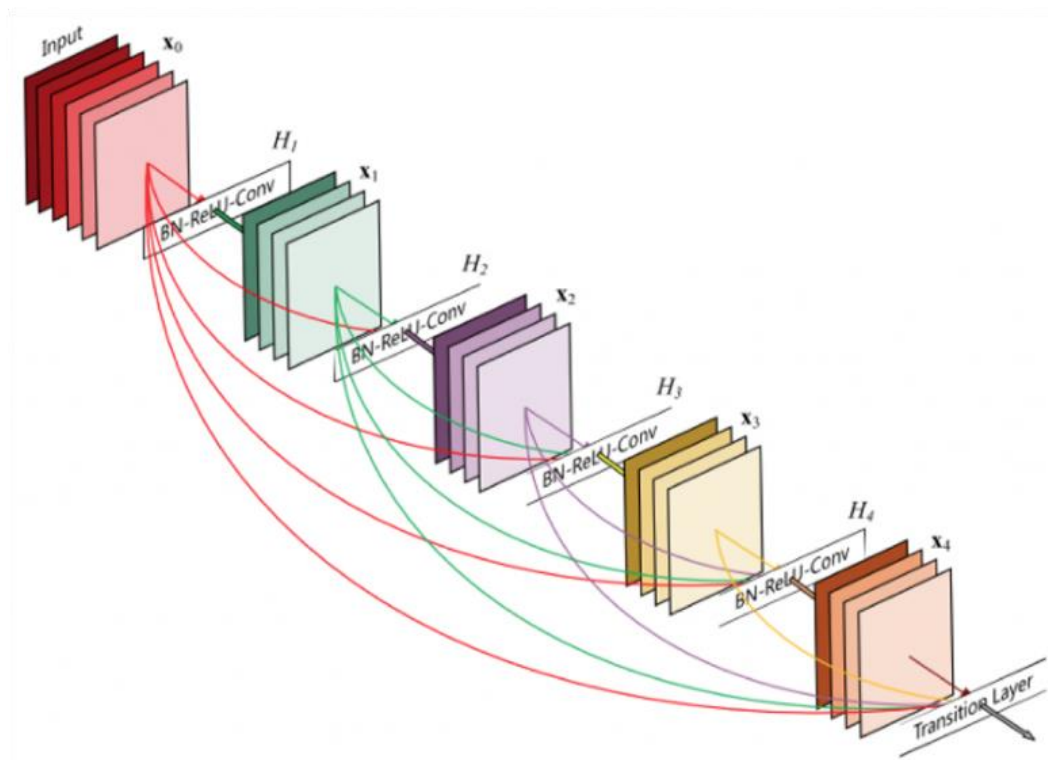


Рисунок 7 – Схема ResNet

1.2.3 Генеративно-сопоставительная сеть

Генеративно-сопоставительная сеть или GAN – сеть, состоящая из дискриминатора и генератора, которые работают друг против друга, то есть между ними происходит своеобразное «сопоставление»[12]. Генератор на основе шума и известных данных, генерирует искусственные данные. Задача дискриминатора заключается в том, чтобы отличить реальные данные от данных полученных на выходе из генератора (рисунок 8). В результате обучения генератор и дискриминатор можно использовать для классификации и для генерации данных соответственно.

Генеративно-сопоставительная сеть подходит для увеличения разрешения изображений, поэтому она применяется и для увеличения разрешения карт высот [13, 41]

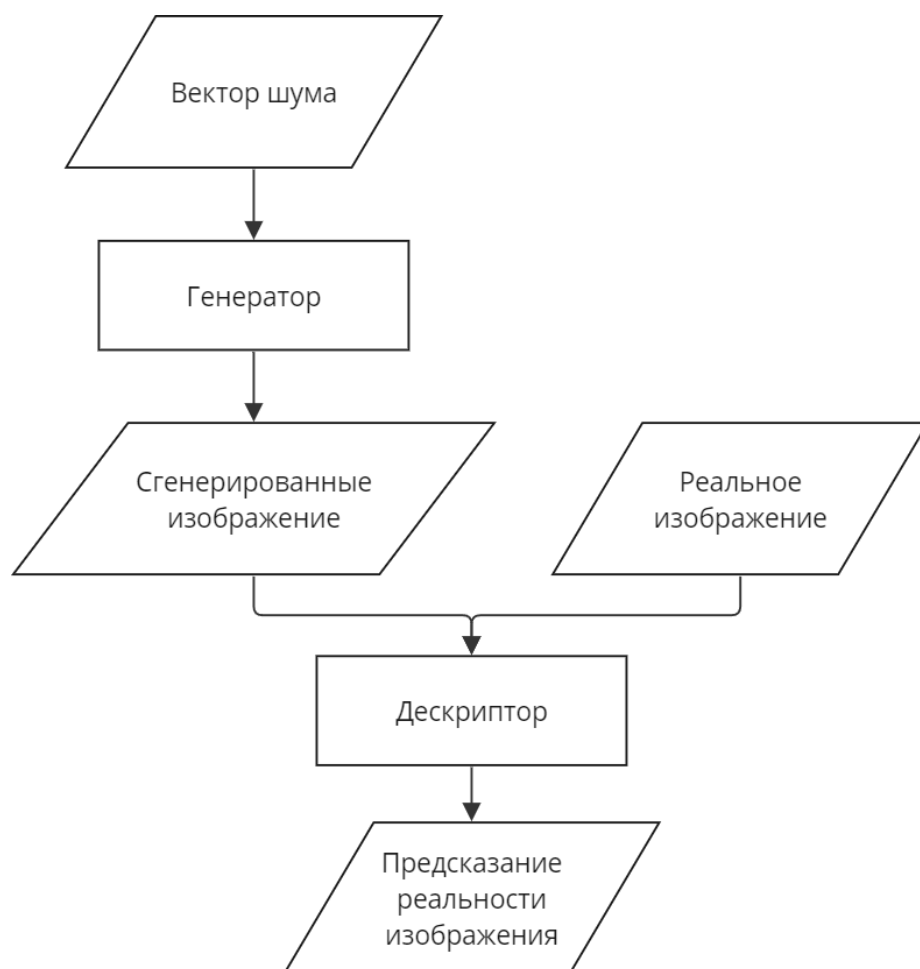


Рисунок 8 – Схема GAN

1.3 Сравнение методов

Классические алгоритмы постоянно сравниваются между собой в точности интерполяции различных видов природного ландшафта. Так, например, для ландшафтов с мало меняющейся высотой или областей малых масштабов лучше всего подходят такие методы как IDW или интерполяция сплайном [9, 31], а для более масштабных и резкоменяющихся ландшафтов стоит использовать Кригинг или ANUDEM [4, 9, 18, 34]. Также для работы классических методов необходимы равномерно распределенные данные в случае интерполяции ровной местности и более плотные данные в случае областей с неровностями. Значительным преимуществом классических методов является простота настройки по сравнению с обучением нейронных сетей.

В свою очередь алгоритмы глубокого машинного обучения позволяют увеличивать разрешение карт высот ландшафтов, с которыми не могут справиться классические методы, например, на горной местности [13, 41] и поверхности Марса [29]. Также с помощью данных алгоритмов можно восстанавливать отдельные части карт, как приведено в работах [15, 27, 32]. Однако методы машинного обучения требуют сложной настройки параметров, обучение может занимать долгое время и требует объёмный набор тренировочных данных для настройки весов. Также алгоритмы глубокого машинного обучения могут переобучиться, то есть после обучения начать выдавать корректный результат из-за того, что веса в сети случайным образом подобрались под тренировочные данные, но при этом на тестовой выборке алгоритм будет выдавать неверный результат.

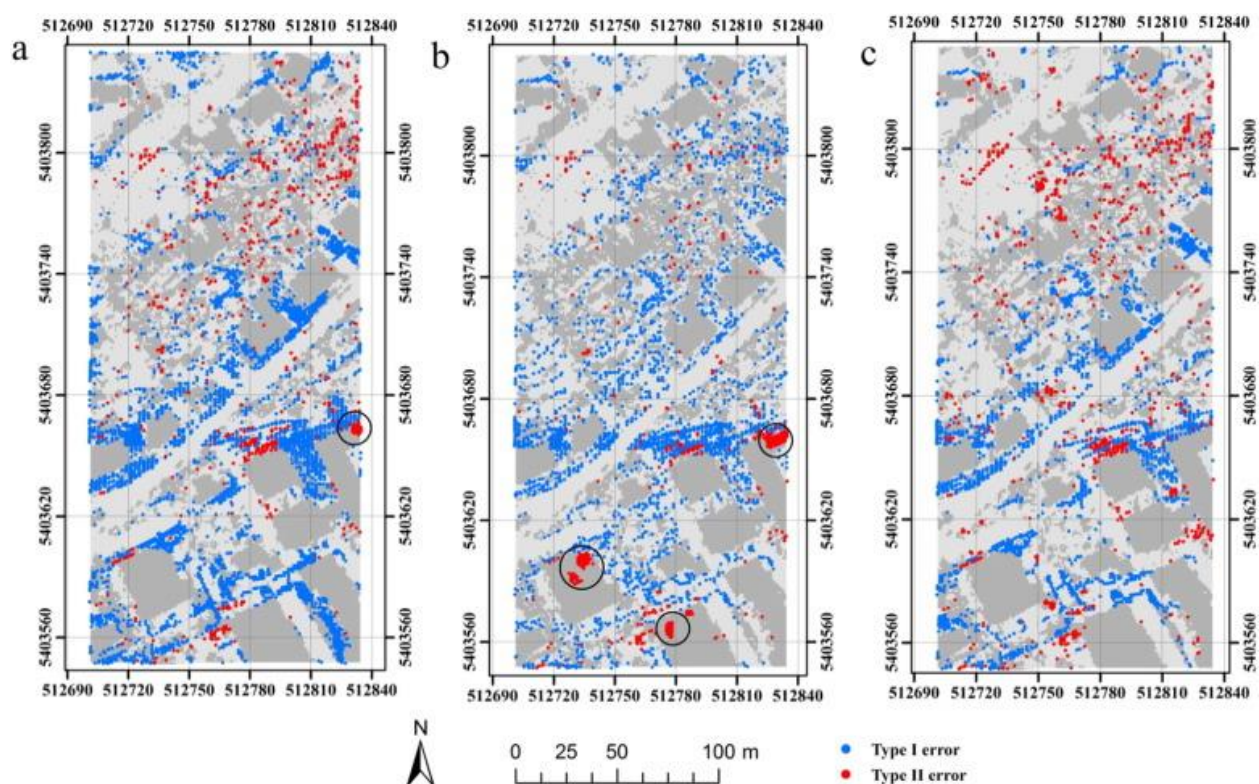


Рисунок 9 – Карты ошибок классификации точек зданий и земли, после интерполяции карты классическими алгоритмами: интерполяции сплайном, биквадратной интерполяции и модифицированной биквадратной интерполяции

Если же рассматривать DEM городской застройки, то в результате интерполяции классическими методами получается более сглаженная

поверхность чем на самом деле [38], поэтому при с недостаточной для работы алгоритма плотностью точек очертания зданий сглаживаются и алгоритмы классификации не справляются с отделением точек зданий от точек земли (рисунок 9) [10]. В свою очередь методы глубокого обучения могут справиться с резким изменением высоты, не сглаживая его, при увеличении разрешения в два раза [37].

2. ПОИСК И АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Для разработки алгоритма для улучшения разрешения карт высот городской застройки был проведён поиск и анализ DEM и связанных наборов данных в открытом доступе.

1.4 Анализ DEM

В первую очередь было необходимо найти DEM покрывающую весь земной шар с максимально возможным разрешением, для этого была составлена сравнительная таблица 1 и рисунок 10 отражающий зависимость карт, так как часть из них получена на основе совмещения данных и их постобработке.

Таблица 1 – Сравнительная таблица карт высот

Карта высот	Тип	Горизонтальное разрешение, м	Вертикальная точность, м	Период получения данных
ASTER GDEM V3	DSM	30	17	2000-2011
SRTM DEM V3	DSM	30 США, 90 остальной мир	9	2000
NASADEM	DSM	30		2000
AW3D30	DSM	30	5	2006-2011
COPERNICUS GLO-30	DSM	30	4	2011-2015
MERIT	DSM	90	12	2000, 2006- 2011
FABDEM	DTM	30	1.12-2.88	2011-2015
TanDEM-X 90m	DSM	90	10	2010-2015

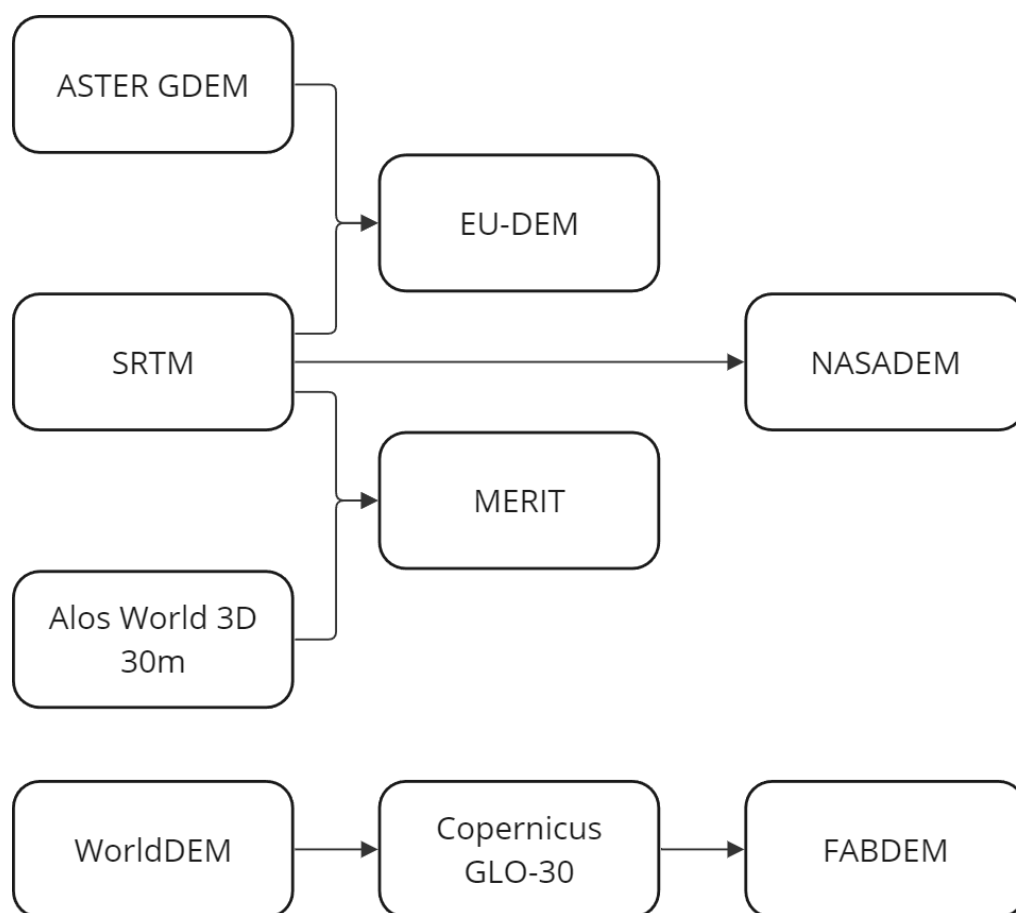


Рисунок 10 – Зависимость карт высот друг от друга

Кроме этого, было необходимо учесть, что DEM подразделяются на DSM и DTM. Они отличаются тем, что DSM включает в себя объекты на поверхности Земли, такие как здания и деревья, а DTM в свою очередь получается методами фильтрации DSM от зданий и лесов (рисунок 11). В случае рассматриваемой задачи данные о городской застройке должны были содержаться в карте, то есть подходили только DSM. Однако DTM были также рассмотрены, так как их получают в результате обработки DSM при помощи алгоритмов интерполяции и фильтрации, которые были рассмотрены для разработки методологии увеличения точности карт высот.

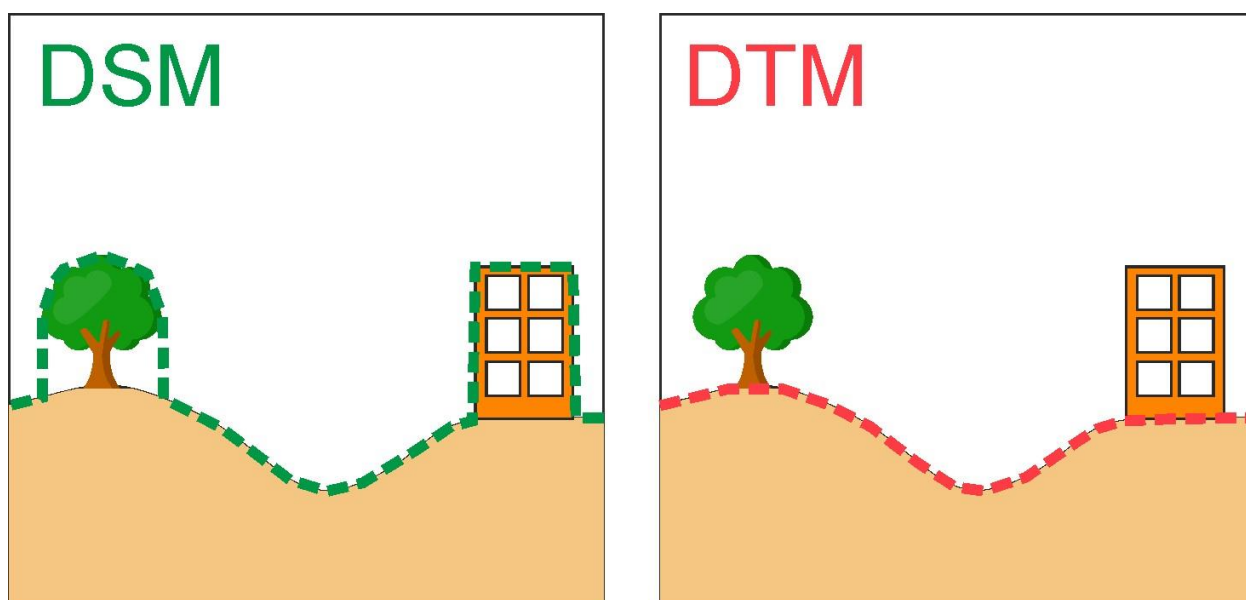


Рисунок 11 – Различие DSM и DTM

В результате сравнения карт высот, из-за низкого горизонтального разрешения были отсеяны SRTM DEM V3, MERIT и TanDEX-X. Также из-за того, что NASADEM является улучшением SRTM DEM, её покрытие ограничено 60 градусами северной широты и 59 градусами южной широты, что противоречит требованию о глобальном покрытии. В итоге из оставшихся DSM была выбрана Copernicus GLO-30 из-за наилучшего из рассмотренных разрешений по вертикали и горизонтали, а также из-за актуального периода получения данных.

1.5 Анализ наборов данных городских застроек

Кроме DEM городской застройки существуют другие карты, позволяющие получить данные о зданиях, дорогах и деревьях. В данной работе рассматриваются два источника такой информации: World Settlement Footprint (WSF)[28] и Open Street Map (OSM)[51].

WSF – это карта-маска, на которой черным цветом выделены квадраты в которых находятся здания, построенные человеком (рисунок 12), её максимальная горизонтальная точность составляет 10 метров.



Рисунок 12 – World Settlement Footprint южной части Петроградского острова

OSM – это некоммерческий веб-картографический проект по созданию силами пользователей Интернета подробной свободной и бесплатной географической карты мира. Данная карта представляет собой карту мира отмеченными на ней улицами, зданиями и достопримечательностями (Рисунок 13). Все здания и улицы представлены в ней в виде векторного изображения, из-за чего карта не выглядит как сетка пикселей WSF и в теории может быть использована с большей точностью.



Рисунок 13 – Open Street Map южной части Петроградского острова

1.6 Поиск и анализ карт высот высокого разрешения

Как уже было описано ранее для набора данных были выбраны Copernicus GLO-30, World Settlement Footprint (WSF-2019) и Open Street Map (OSM), однако для обучения алгоритма и оценки его работы необходимы карты более высокого разрешения.

1.6.1 USGS National Map 3DEP

В рамках проведения дополнительных исследований была найдена база данных DSM для территории Соединенных Штатов Америки (США). Эта база данных, известная под названием USGS National Map 3DEP [52], состоит из карт высот высокого разрешения до 1 метра, при этом она является DTM, то есть на ней уже убраны здания.

Особенностью полученных данных является то, что они собраны при помощи метода сканирования с летательного аппарата, с использованием лидара. Это позволило собрать обширный объем информации о поверхности местности, включая даже труднодоступные или опасные участки.

Тем не менее, данная карта высот не охватывает всю территорию США и имеет определенные пропуски в местах плотной и современной городской застройки (рисунок 14). Это обусловлено тем, что такие места могут быть сложными для исследования или недоступны из-за правовых или технических ограничений, а также тем, что данную карту сканировали для геологических исследований, для которых более важным является ландшафт природного происхождения.

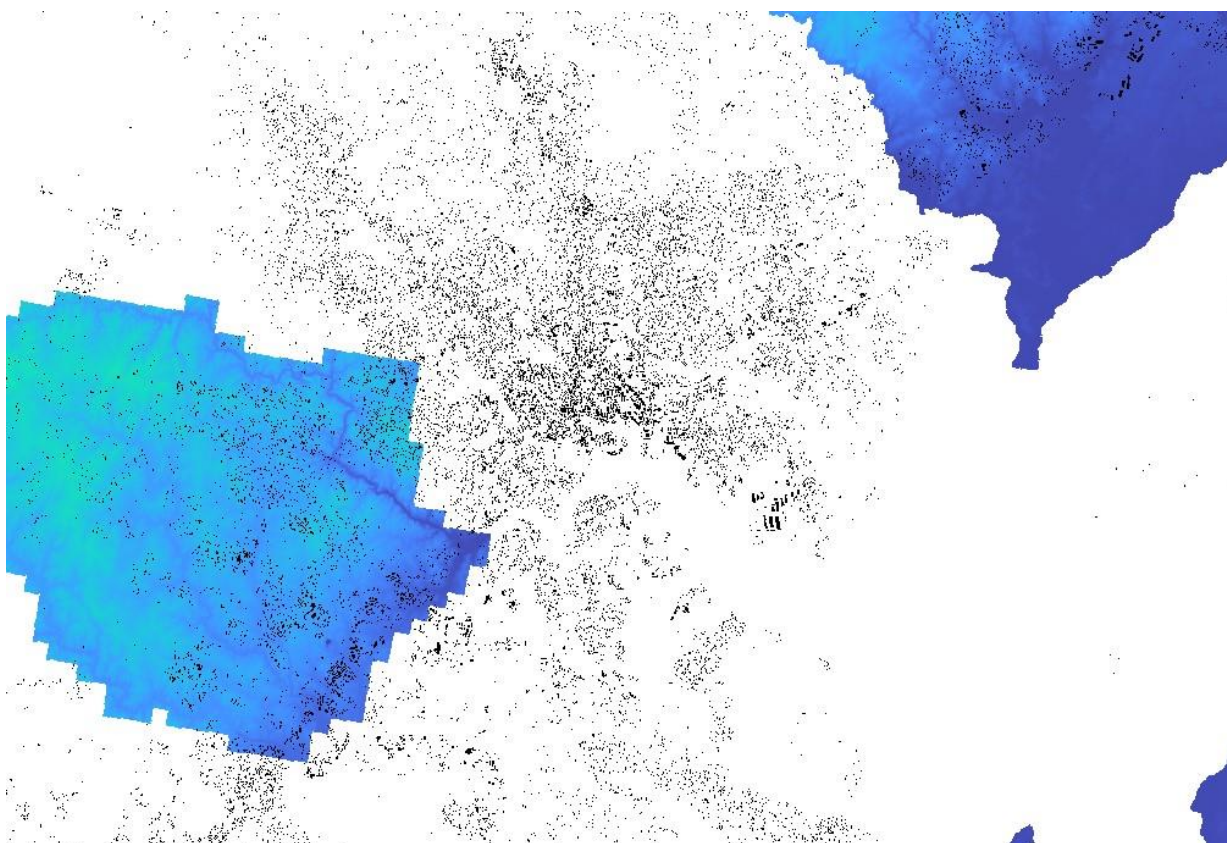


Рисунок 14 – Покрытие карт высот 3DEP в районе городской застройки города Вашингтон. Градиент – карта 3DEP, чёрным – городская застройка

Из-за наличия пропусков в данных возникает риск недостаточного количества информации для обучения алгоритма глубокого машинного обучения. Поэтому был рассмотрен второй вариант для получения исходных данных.

1.6.2 Синтетическая генерация исходных данных

В тех случаях, когда имеющихся данных недостаточно, возможно применение синтетически созданных моделей ландшафтов, включающих

городскую застройку. Для создания таких моделей возможно использование специализированные программы, например, Houdini[53] или ArcGIS CityEngine [54], которые предназначены для генерации трехмерных моделей и ландшафтов.

На основе полученных с помощью этих программ моделей можно получить карты высот. Эти DEM могут быть как в исходном разрешении, достигающем 30 метров, так и в приближенном разрешении, достигающем 1 метра. Это позволяет получить информацию о топографических особенностях исследуемой территории в практически любом желаемом масштабе для проверки или обучения алгоритма.

3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАБОТЫ АЛГОРИТМА

1.7 Анализ FABDEM

Как было замечено в разделе 2.1.1, при рассмотрении алгоритмов фильтрации и интерполяции полезными являются работы по созданию DTM на основе DSM. Поэтому была рассмотрена работа[20] по созданию набора данных FABDEM основанного на выбранной DSM, Copernicus GLO-30.

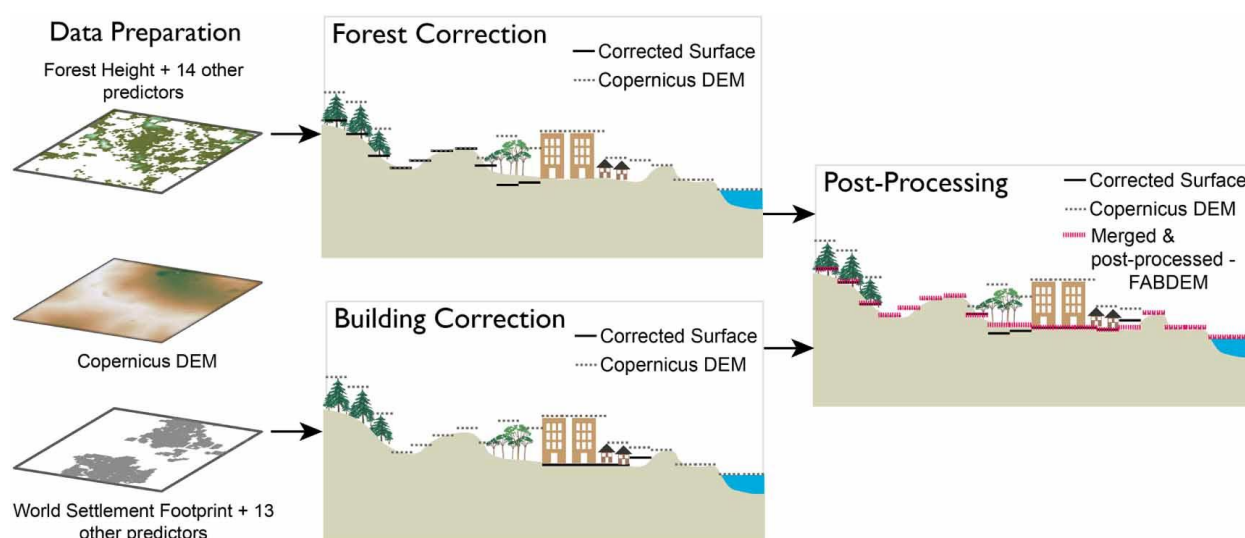


Рисунок 15 – Схема работы алгоритма для создания FABDEM.

Авторы предложили следующую схему работы алгоритма (рисунок 15). Взяв за основу Copernicus GLO-30 и алгоритм машинного обучения регрессии случайного леса[16, 36], они отдельно убрали деревья и здания, после чего объединили эти результаты в одну карту высот с разрешением 30 метров (рисунок 16). Для коррекции карты деревьев была использована карта высоты лесов, а для коррекции зданий была использована карта WSF и плотности мирового населения. Авторы не использовали OSM, так как она не подходила для используемого алгоритма и имеет неточности в районах редкой городской застройки. Однако для поставленной цели использование OSM возможно, так как в работе были рассмотрены только карты крупной городской застройки, которые чаще всего имеют покрытие OSM



Рисунок 16 – FABDEM Петроградского острова

1.8 Разработка схемы алгоритма

После рассмотрения метода создания FABDEM, была предложена схема алгоритма для улучшения разрешения карт высот городской (рисунок 17).

Первый шаг заключался в получении карты высоты с исходным разрешением без высот зданий. Для этого при предобработке наборы данных OSM и WSF-2019 были наложены на GLO-30 для получения соответствие точек на карте высот с точками зданий на маске. С помощью этого соответствия было произведено удаление точек высот зданий. Далее пропуски в полученной, после удаления зданий, карте заполняются методом интерполяции. В результате первого шага была получена DEM, которая принималась за карту высот природного ландшафта низкого разрешения.

Следующим шагом было увеличение разрешения карты высот при помощи метода интерполяции на основе алгоритма машинного обучения. В результате была получена карта высот высокого разрешения без зданий.

После получение карты поверхности ландшафта без зданий был произведён последний шаг – восстановление точек высот зданий с помощью исходных данных OSM со значениями высот из Copernicus GLO-30.

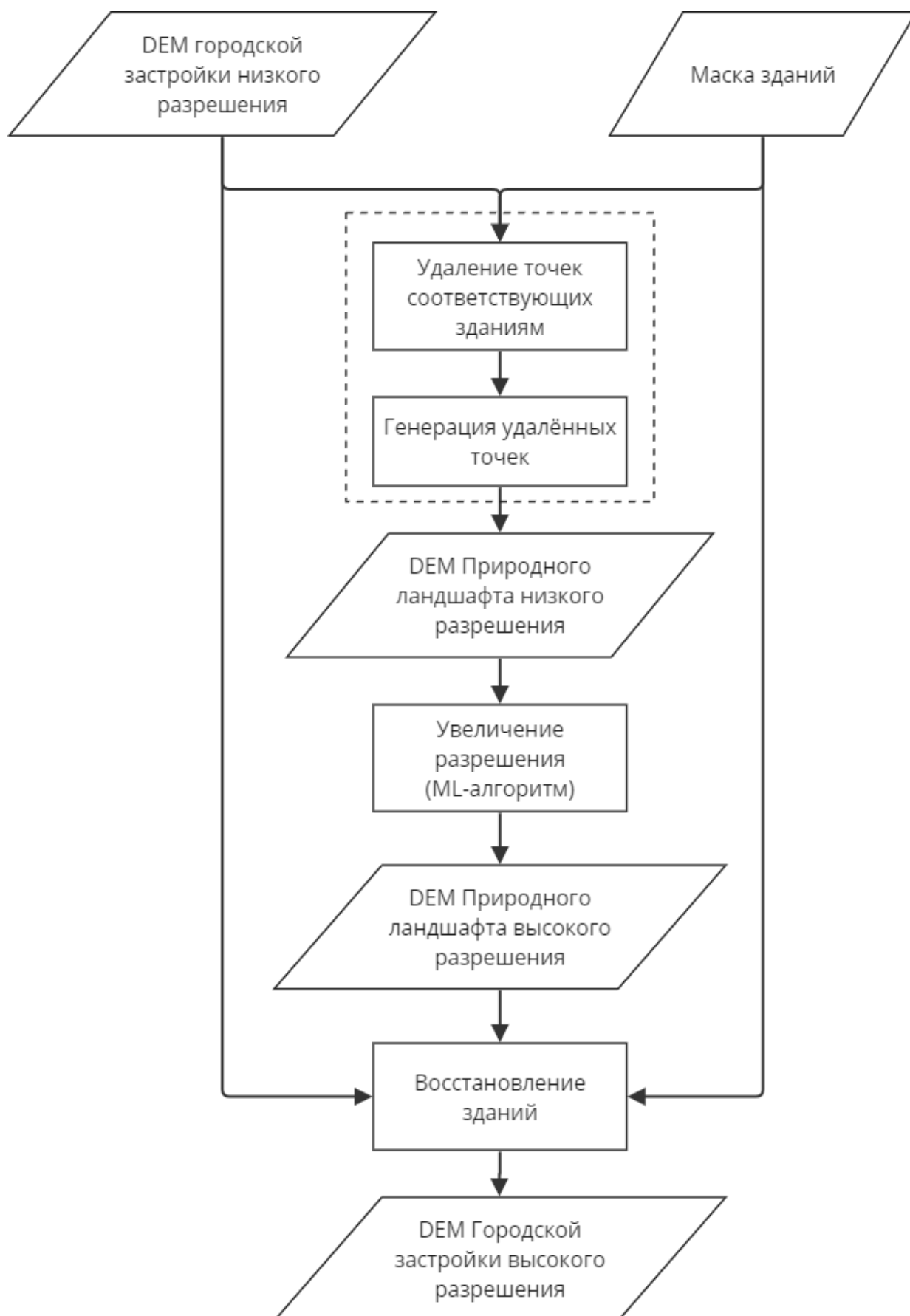


Рисунок 17 – Схема разработанного алгоритма

При разработке схемы работы метода, было замечено, что на втором этапе алгоритма результат может быть использован для генерации изначального природного ландшафта. Подобную задачу решал алгоритм для FABDEM и в результате была получена карта с вертикальной точностью 1.12–2.88 метров и горизонтальным разрешением 30 метров. Возможно, предложенный подход в результате даст карту с более точным горизонтальным разрешением. Однако это уже выходит за рамки цели работы.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА

1.9 Создание набора данных для алгоритма

Для создания набора данных необходимо было произвести наложение данных из World Settlement Footprint (WSF-2019) и Open Street Map (OSM) на Copernicus GLO-30 и разделить карты на квадраты для последующей обработки и обучения алгоритма. Для достижения этого использовалось программное обеспечение для создания карт QGIS[55]. Процесс создания исходного набора данных состоит из шагов подробно описанных далее.

1.9.1 Наложение WSF-2019 на GLO-30

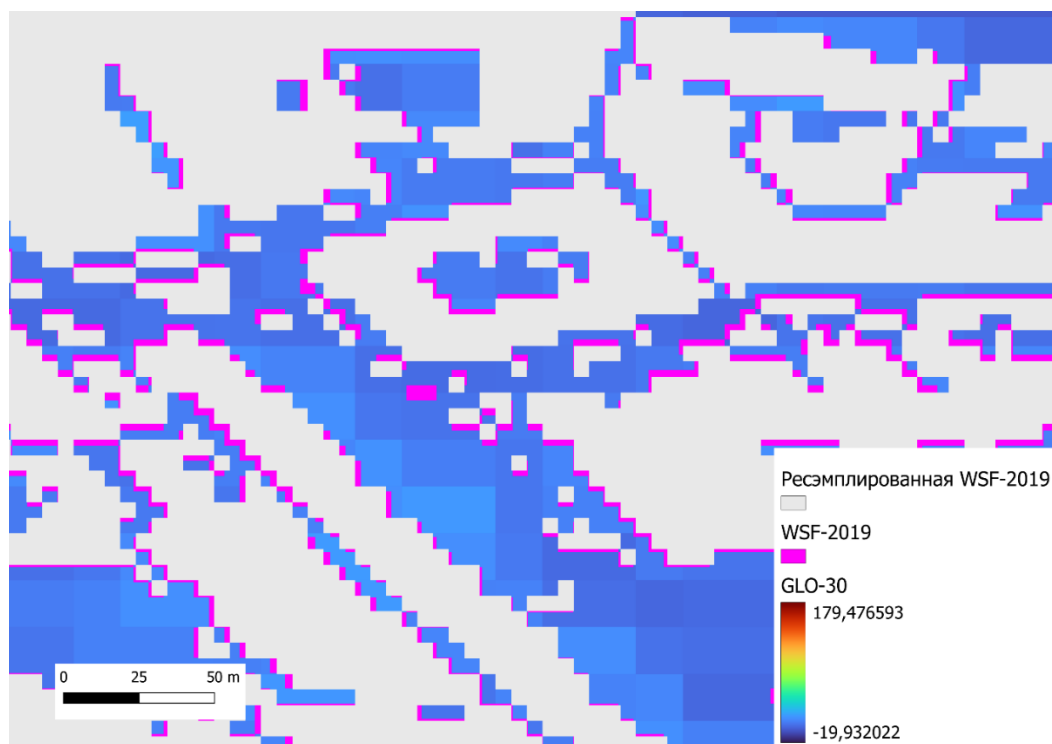


Рисунок 18 – Карта с WSF-2019 до и после интерполяции

Как было описано ранее точность данных WSF-2019 достигает 10 метров, когда у GLO-30 – это значение достигает только 30 метров, поэтому при наложении каждому пикселю GLO-30 соответствуют девять пикселей WSF-2019. Но в процессе импорта в QGIS было выяснено, что координатные сетки WSF-2019 и GLO-30 совпадают с небольшим сдвигом. Поэтому было принято решение ресемплировать WSF-2019 для совпадения с GLO-30 (рисунок 18).

Данная операция заключается в том, что для каждого пикселя новой карты с разрешением в 10 метров, производится интерполяция значений на основе уже известных, в нашем случае использовался метод ближайших соседей [14]. Полученную после интерполяции WSF-2019 карту-маску нельзя считать настолько же точной, как и исходную, но так как WSF-2019 в алгоритме будет использоваться скорее как вспомогательная карта с информацией о городской застройке, этим можно пренебречь.

1.9.2 Наложение зданий из OSM на GLO-30

В отличие от растровых карт, таких как GLO-30 и WSF-2019, система OSM базируется на множестве векторных объектов. Каждый из этих объектов символизирует конкретную географическую область или структуру. Например, дорожные сегменты представлены в виде линий, местоположения автобусных остановок — в виде точек, а зоны парков — в форме полигонов. Для эффективного выполнения задачи алгоритму требуется детализированная информация о зданиях, которые в рамках системы OSM представлены в виде геометрических полигонов, как показано на рисунке 19.

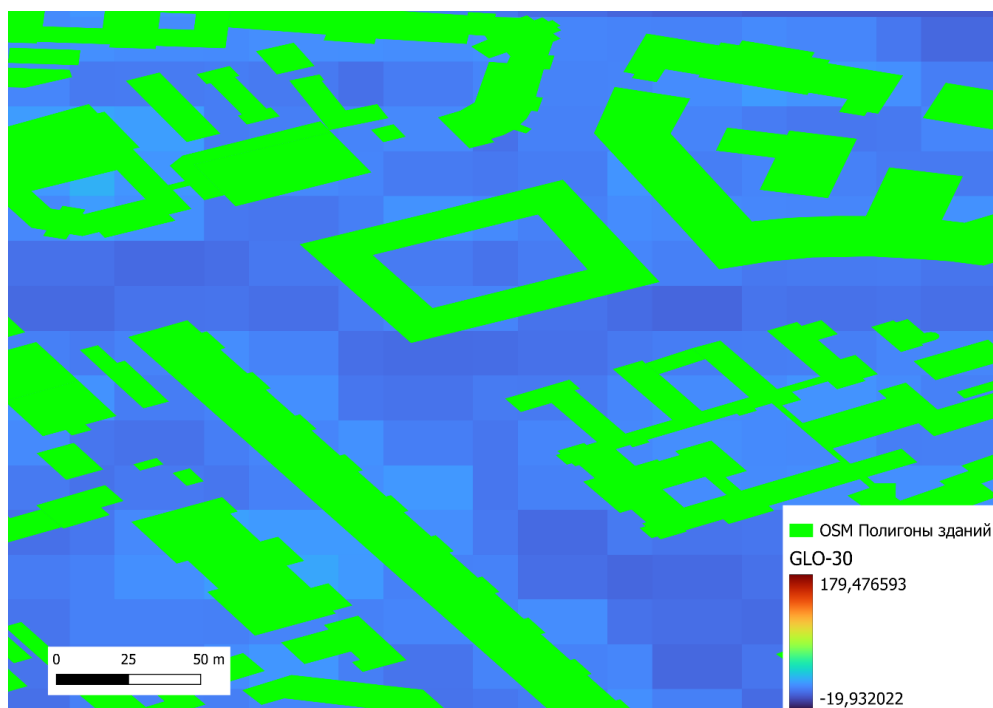


Рисунок 19 – Карта наложения векторного представления данных зданий OSM

Для алгоритмов глубокого машинного обучения и интерполяции векторное представление не подходит, поэтому необходимо произвести растеризацию векторного слоя OSM, иллюстрация простейшего примера растеризации приведена на рисунке 20.

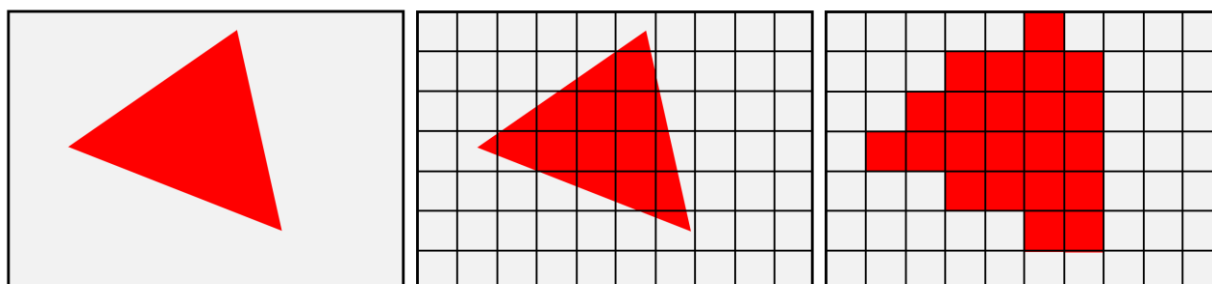


Рисунок 20 – Растеризация треугольника

В случае данных из OSM была проведена растеризация на сетку, где каждый пиксель GLO-30 разбивается на 81 пикселей на результирующем растровом изображении. Это соотношение выбрано для упрощения перехода между слоями GLO-30, WSF-2019 и OSM. Такой подход обеспечивает согласование, при котором количество пикселей OSM в пикселе WSF-2019 соответствует количеству пикселей WSF-2019 в пикселе GLO-30. Таким образом результатом алгоритма станет карта городской застройки, каждый пиксель которой соответствует растеризованной карте OSM с точностью в 9 раз выше по сравнению с GLO-30, что приблизительно соответствует 1.1 м. Результат растеризации векторного слоя зданий OSM представлен на рисунке 21.

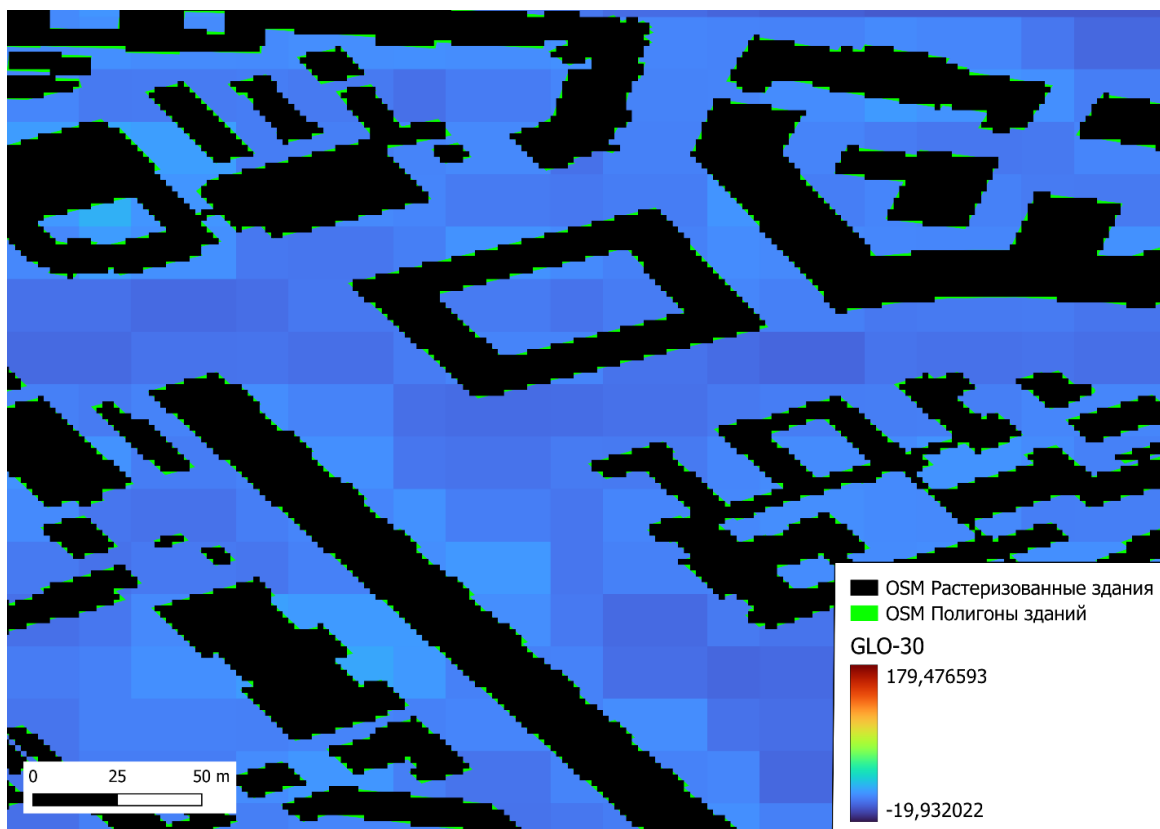


Рисунок 21 – Растеризованный слой зданий OSM

1.9.3 Интерполяция 3DEP

Данные карты высоты 3DEP также необходимо ресемплировать к сетке полученного на прошлом шаге растерного слоя зданий OSM, для этого использовался метод интерполяции кубическим В-сплайном [14] для сохранения резких перепадов высот городских построек. Данная операция уменьшила точность данных 3DEP, так как пиксель стал отвечать за большее количество метров, но это было необходимо для обучения алгоритма, а также это привело данные к целевому значению точности, при этом так как изначально у данных точность была выше, потерями в их качестве можно пренебречь.

1.9.4 Результат создание набора данных

В итоге были получены карты с разрешением плотностью пикселей на градус приведённые в таблице 2. Также в таблице приведены количество пикселей при разделении карт на квадраты, на которых планируется производить обучение и проверку алгоритма.

Таблица 2 – Таблица полученных карт

Параметр	GLO-30	WSF-2019	Растерный слой зданий OSM	3DEP
Максимальное разрешение, м	30	10	1,1	1,1
Плотность пикселей на один градус	3600	10800	32400	32400
Сторона квадрата набора данных (0,1°, 0,05°, 0,02°, 0,01°), пиксели	360	1080	3240	3240
	180	540	1620	1620
	72	216	648	648
	36	108	324	324

Для меньшего количества вычислений и необходимой памяти при обучении нейронной сети был выбран набор данных с квадратом со стороной в 0,01°, что составило 10393 изображений из каждой карты.

1.10 Предварительная обработка данных

Первый шаг разработанного алгоритма состоит в предобработке изображений карты высот. Во-первых, было необходимо удалить данные GLO-30 (рисунок 22), где они совпадают с полученной ранее растеризованной маской зданий из OSM (рисунок 23) и WSF-2019 по отдельности.

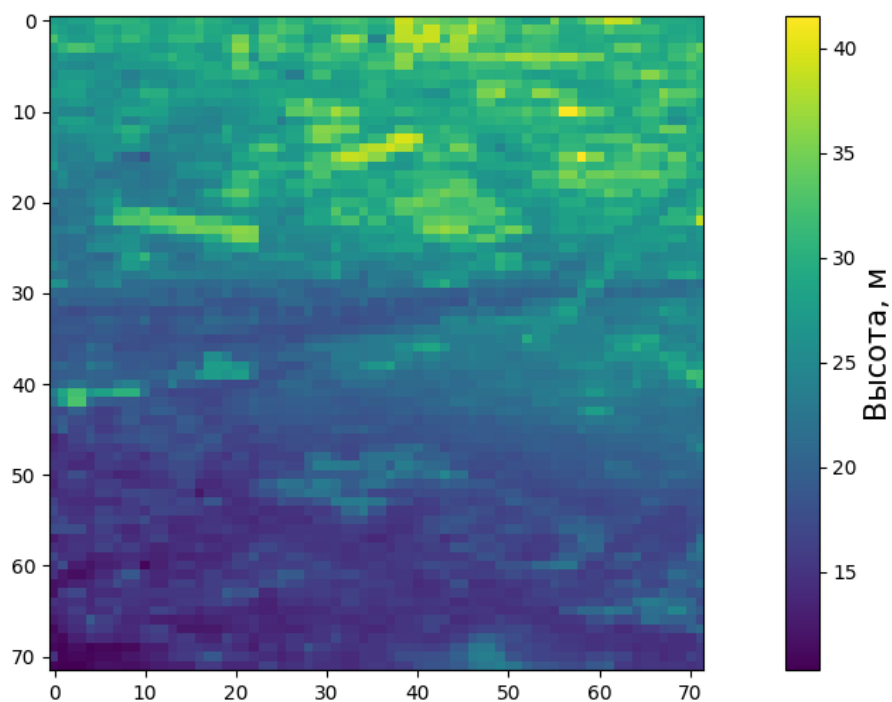


Рисунок 22 – Данные GLO-30 для квадрата в 0.02 градуса

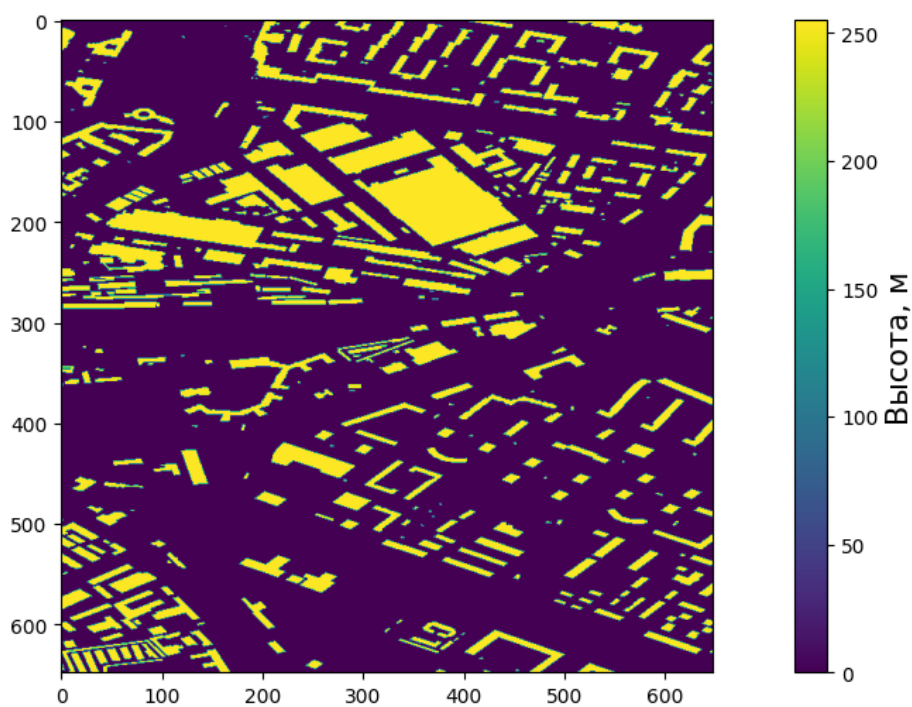


Рисунок 23 – Данные OSM для квадрата в 0.02 градуса

Во-вторых, удалённые точки полученных карт (рисунок 24) были заполнены при помощи классического метода интерполяции IDW (рисунок 25) и в итоге карты были соединены методом взвешенного среднего (рисунок 26). Для этого была написана программа на языке программирования Python.

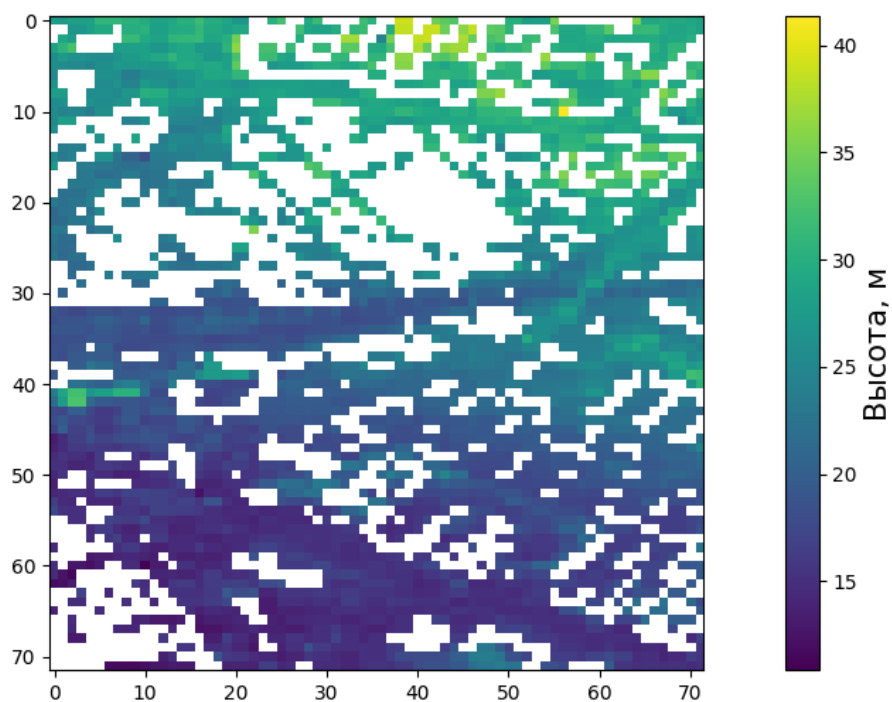


Рисунок 24 – Данные GLO-30 удалёнными пикселями зданий OSM для квадрата в 0.02 градуса

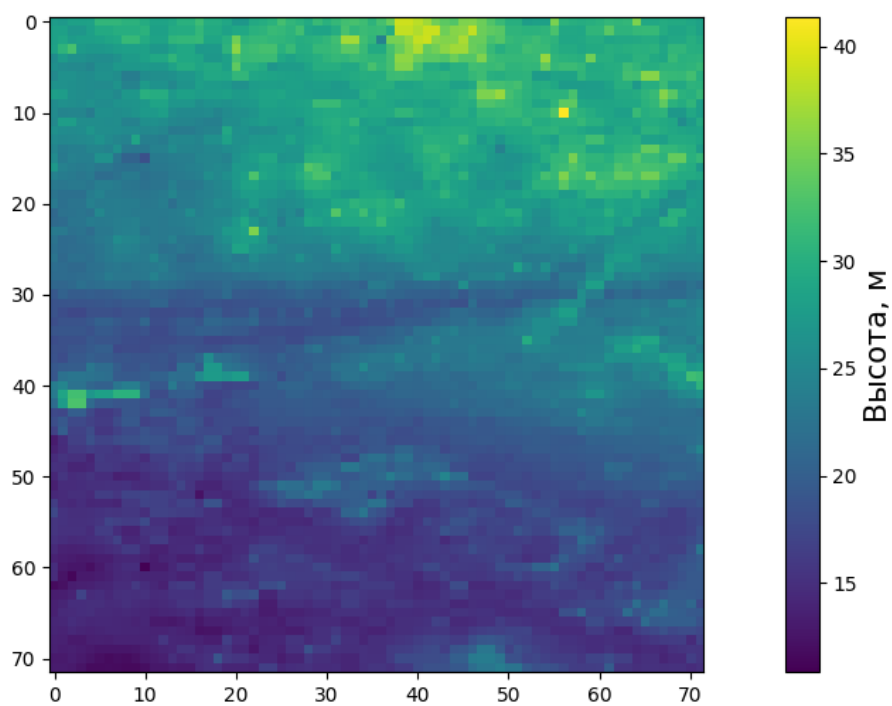


Рисунок 25 – Интерполированные данные для удалённых OSM зданий для квадрата в 0.02 градуса

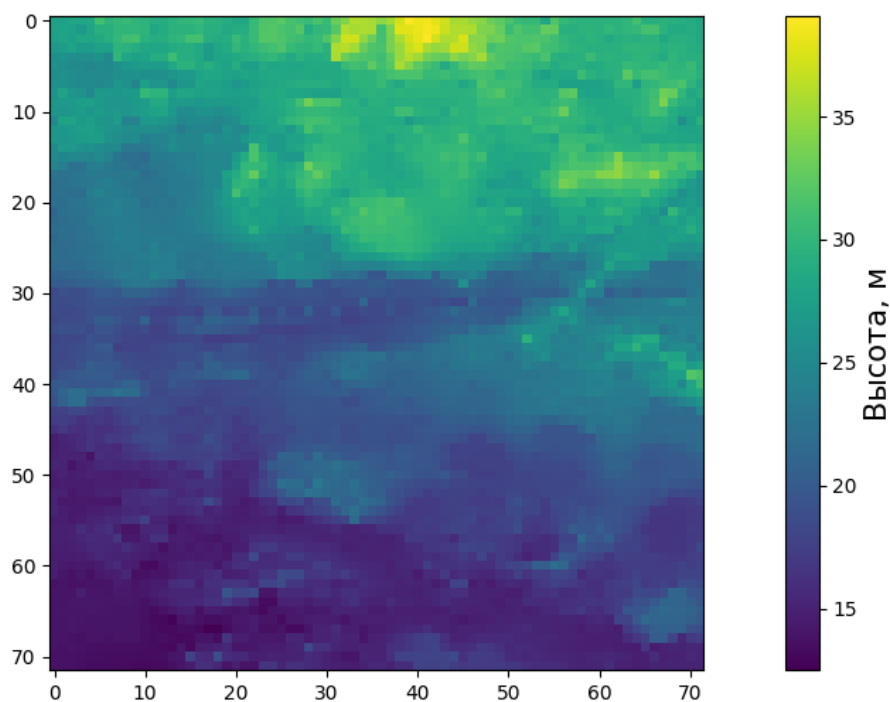


Рисунок 26 – Результирующая карта высот без зданий

1.11 Обучение SRGAN

Основываясь на литературном обзоре, для увеличения карты высот ландшафта без зданий была использована модель генеративно-сопоставительной нейронной сети для увеличения изображений (SRGAN), которая увеличивала изображение в 3 раза. Перед этим изображение увеличивалось в 3 раза при помощи бикубической интерполяции, что позволяло сгладить артефакты после удаления зданий. Таким образом изображение со стороной квадрата в 36 пикселей увеличивалось, сначала до 108 пикселей, а потом до 324.

Генератор SRGAN состоял из пяти остаточных слоёв как в ResNet и одного слоя увеличения разрешения в 3 раза, таким образом на вход генератора подавались изображения размером 108x108 пикселей с одним каналом данных, а на выходе генерировалось изображение - 324x324x1 пикселей. В качестве дескриптора выступала стандартная реализация CNN, которая состояла из семи свёрточных слоёв, которые преобразовывали изображение 324x324x1 в изображение 4x4x864, после чего каждый пиксель рассматривался как один из 13824 параметров, на основе которых

происходила классификация. Для обучения использовалась уже упомянутая карта высот 3DEP.

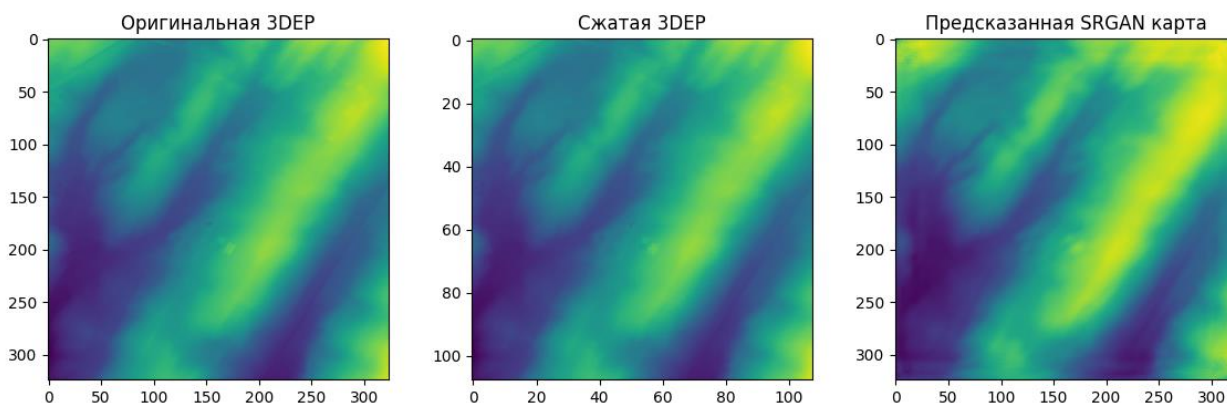


Рисунок 27 – Увеличение разрешения изображения при помощи SRGAN

В результате, после 50 эпох ошибка PSNR колебалось от 25 до 29 дБ, чего было достаточно для проверки работоспособности алгоритма. Пример результата работы обученной SRGAN приведён на рисунке 27.

1.12 Восстановление зданий

Для дальнейшего восстановления зданий использовалась маска OSM и данные высоты из DEM низкого разрешения. В каждую точку маски одного здания было записано значение высоты, после чего вычислялась максимальная высота и принималась за высоту всего здания (рисунок 28).

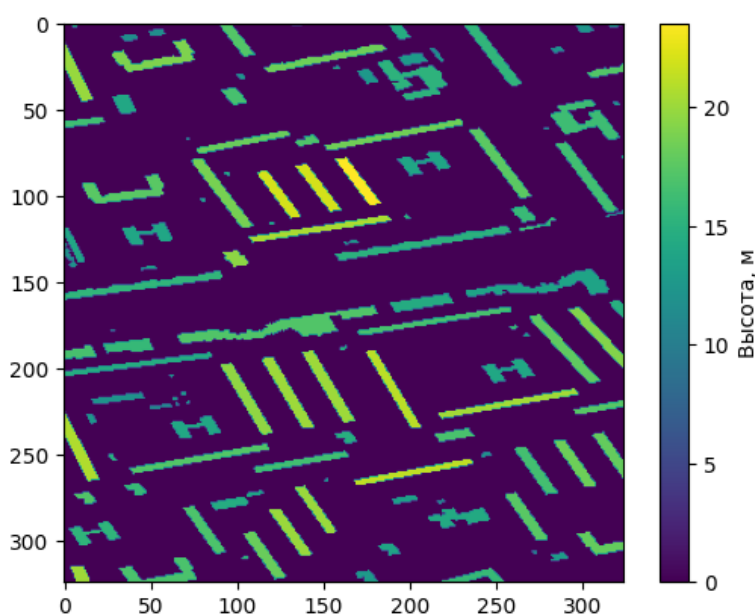


Рисунок 28 – Маска OSM с высотами зданий из исходной карты DEM

После чего производилось наложение маски зданий с высотами на карту высот без зданий, которая была получена на предыдущем шаге (рисунок 29).

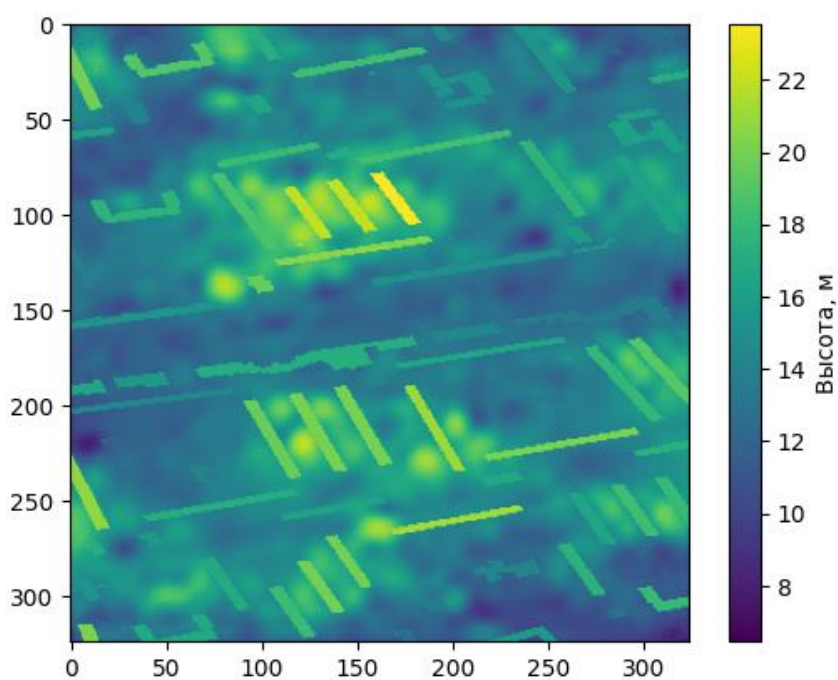


Рисунок 29 – Результат наложения маски зданий с высотами на DEM увеличенной точности

5. ПРОВЕРКА РАБОТЫ АЛГОРИТМА

1.13 Синтез эталонных данных

Для проверки работы алгоритма необходимо взять карту высот городской застройки с высокой точностью, взяв её за эталонные данные, искусственно уменьшить её точность, после чего применить разработанный алгоритм и сравнить результат алгоритма с исходным. Так как данные 3DEP являются картой поверхности земли, в них не входят высоты зданий, поэтому для оценки работы алгоритма было принято решение синтезировать эталонные данные.

Для синтеза данных была использована бесплатная версия программы для процедурной генерации Houdini[53]. В ней сначала был сгенерирован природный ландшафт (рисунок 30), а потом на основе данных из OSM воссозданы здания (рисунок 31). После чего на основе трехмерной модели с помощью программы бесплатной программы с открытым исходным кодом CloudCompare[56] была получена эталонная карта высот городской застройки (рисунок 32).

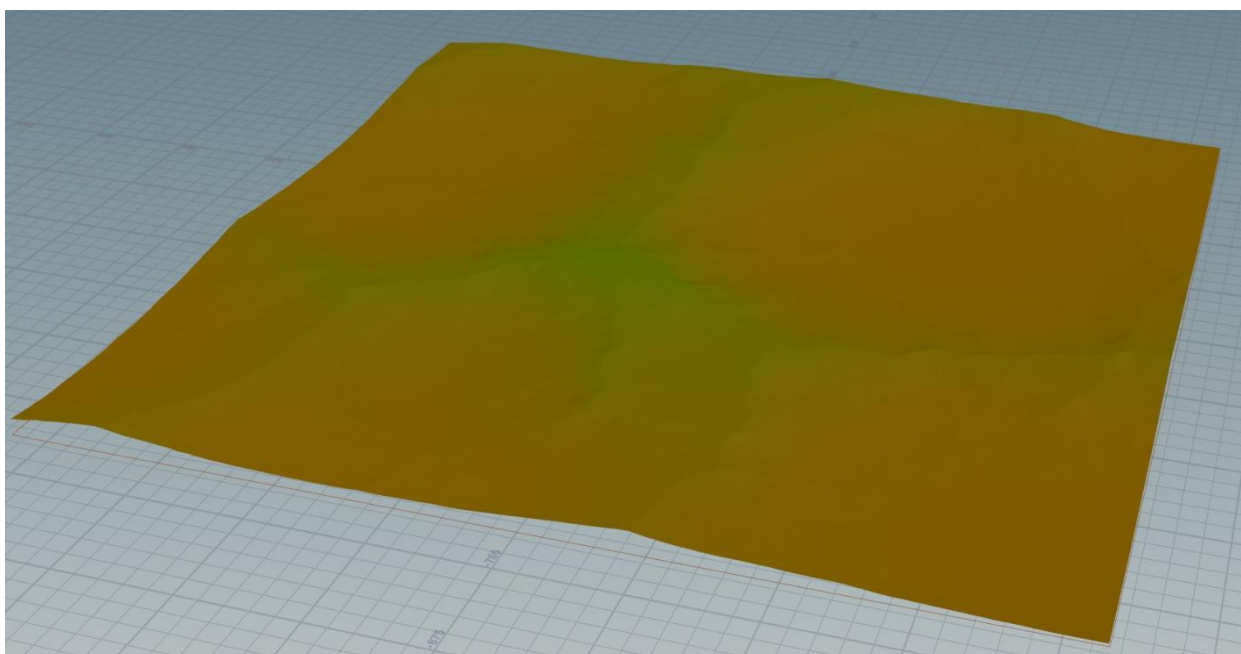


Рисунок 30 – Природный ландшафт, процедурно сгенерированный в Houdini

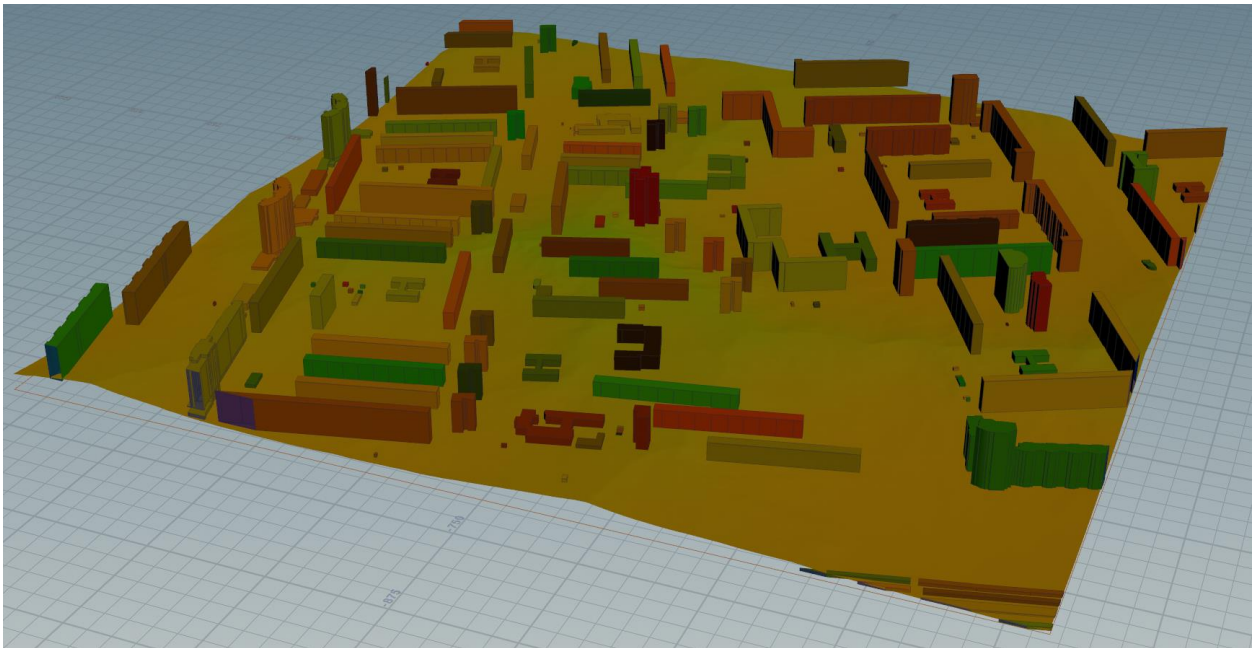


Рисунок 31 – Ландшафт городской застройки, процедурно сгенерированный в Houdini

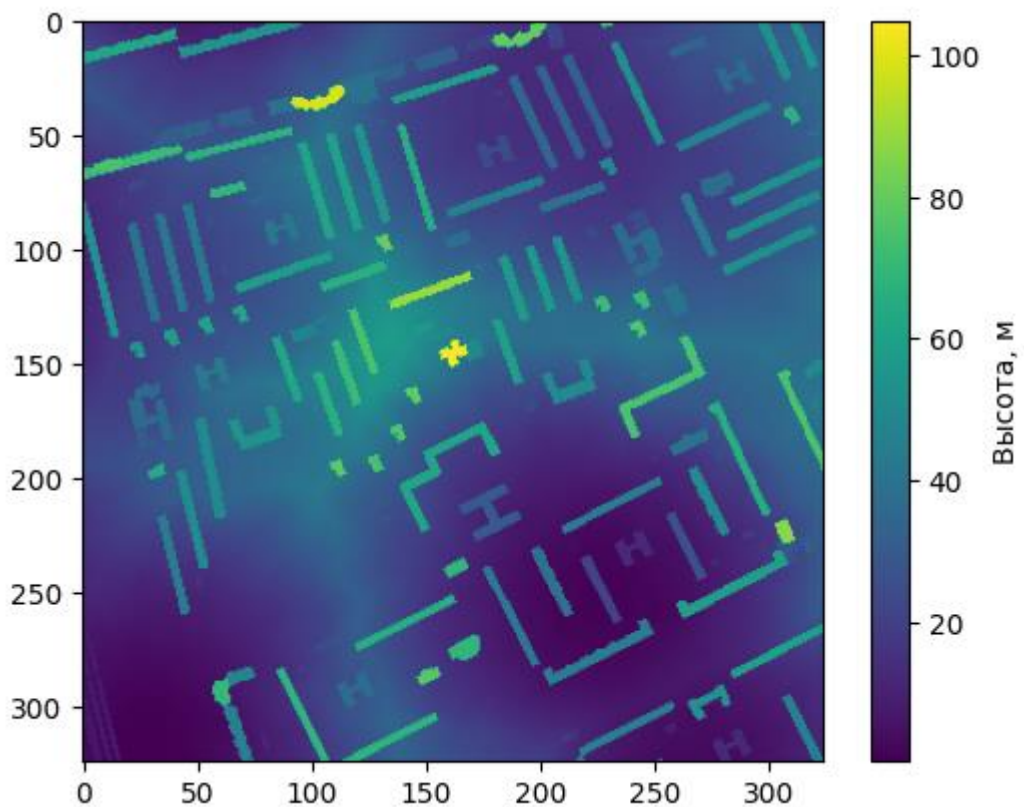


Рисунок 32 – Эталонная карты высот

1.14 Оценка работы алгоритма

С помощью эталонной карты высот, полученной при помощи процедурной генерации, была произведена проверка и оценка работы

алгоритма. На рисунке 33 приведены исходная карты высот, карта высот с уменьшенной точностью и карты высот, полученные из неё тремя методами:

- Классическим методом бикубической интерполяции (Bicubic), с которым часто производят сравнения[13, 22, 29, 41];
- Разработанный алгоритм без шагов удаления и восстановления зданий, то есть метод для увеличения карт высот природного ландшафта (SRGAN + бикубическая интерполяция);
- Разработанный алгоритм.

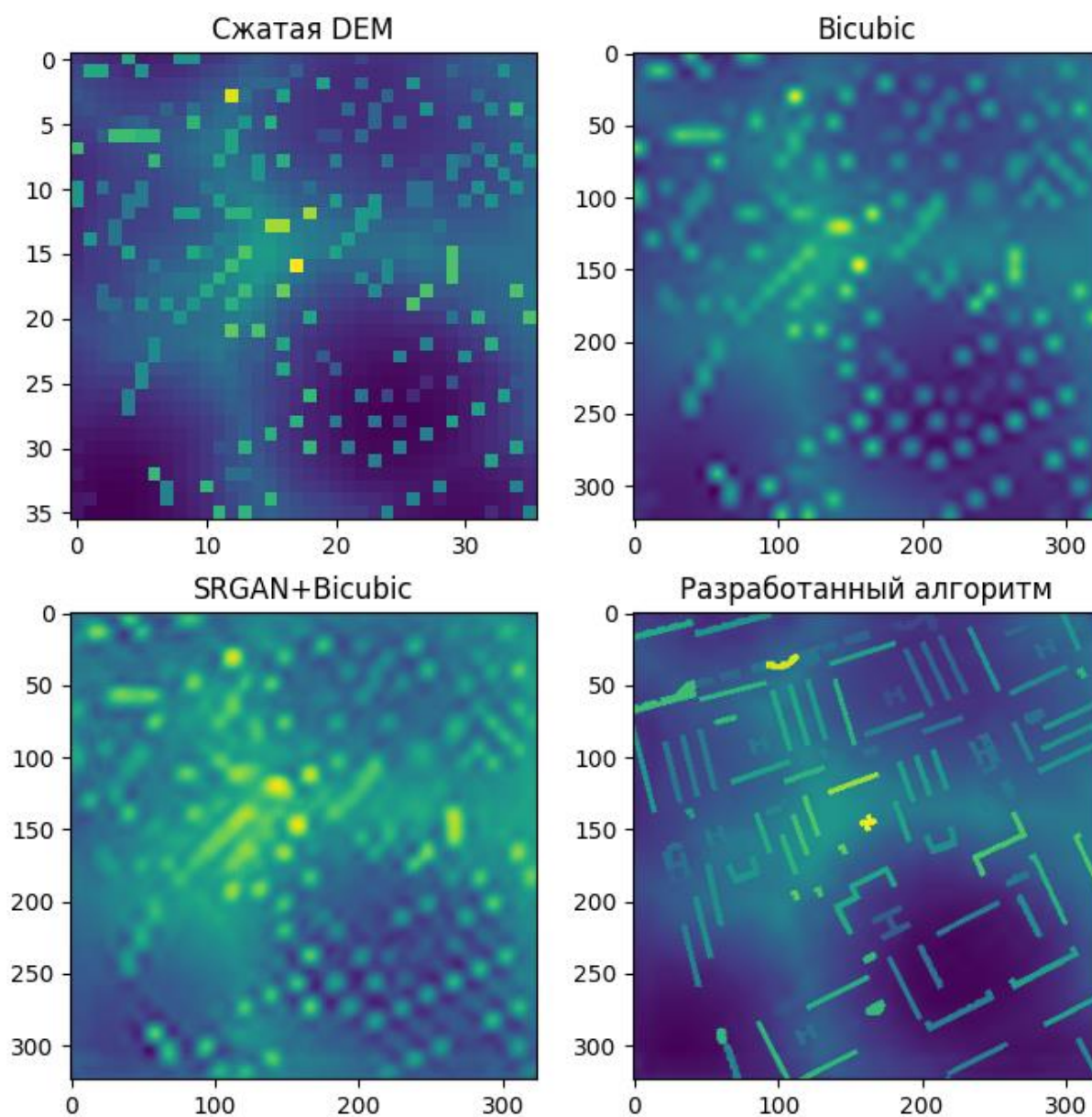


Рисунок 33 – Результаты работы алгоритмов по увеличению карты высоты городской застройки

Также были вычислены среднеквадратическая ошибка (MSE) и пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR) нормализованных значений карт, приведённые в таблице 3.

Таблица 3 – Оценка точности алгоритмов интерполяции.

	Бикубическая интерполяция	SRGAN + бикубическая интерполяция	Разработанный алгоритм
MSE	0,013144	0,044859	0,004231
PSNR, дБ	18,812723	13,481476	23,73585

На основе приведённых вычислений видно, что разработанный метод увеличения разрешения карт высот городской застройки имеет наименьшую среднеквадратическую ошибку и наибольшее пиковое отношение сигнала к шуму, из чего можно сделать вывод, что алгоритм справляется с поставленной задачей лучше классического метода бикубической интерполяции и метода для увеличения разрешения DEM природного ландшафта. Стоит заметить, что алгоритма обученный природном ландшафте справился хуже, чем бикубическая интерполяция, это также показывается, что карты высот городского ландшафта сильно отличаются от карт высот природного ландшафта, поэтому при исследовании и разработке алгоритмов, необходимо обучать и проверять их на одном и том же типе карт.

Также для более наглядного сравнения результатов были сделаны трёхмерные модели ландшафтов на основе полученных карт высот рисунки 34–38. На них особенно видно, что реализация на основе разработанного метода смогла восстановить большинство зданий и их высот, в отличие от сглаженных холмов, которые получились у двух других алгоритмов.

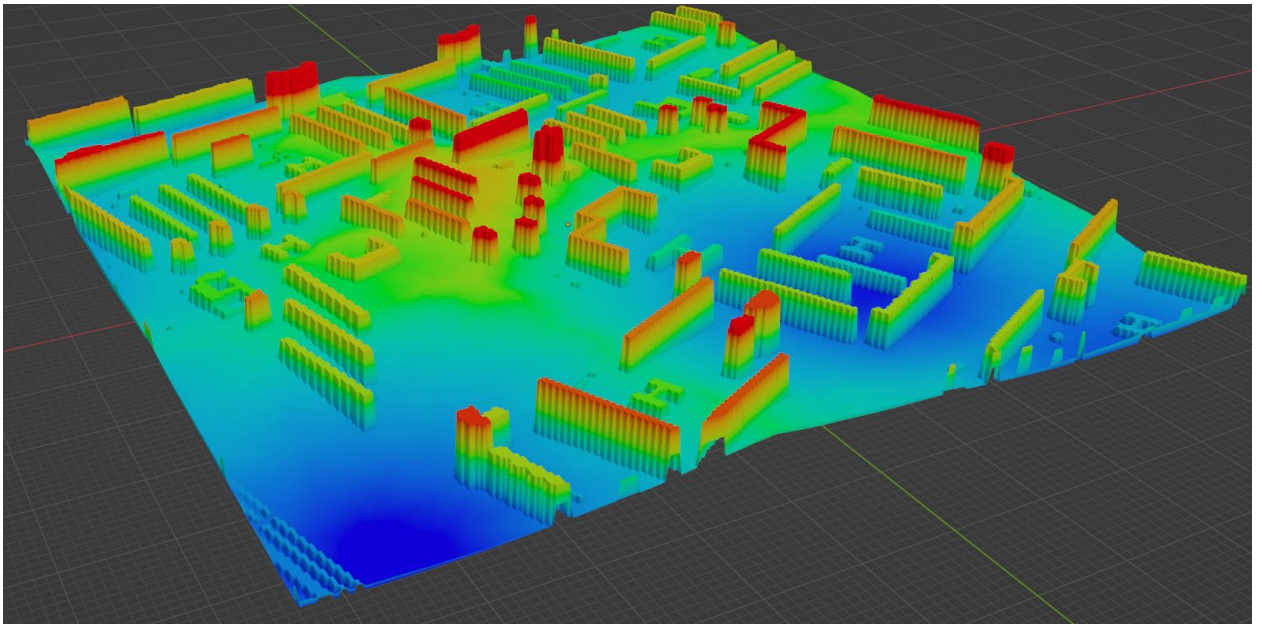


Рисунок 34 – Эталонная карта высот

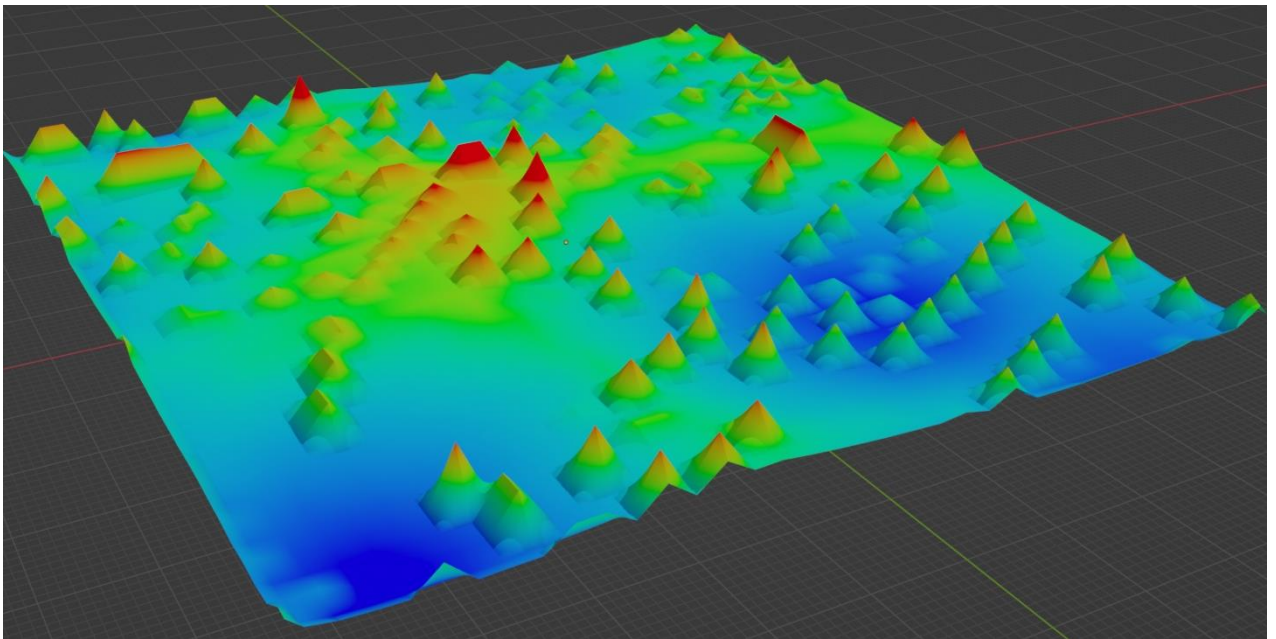


Рисунок 35 – Сжатая карта эталонная высот

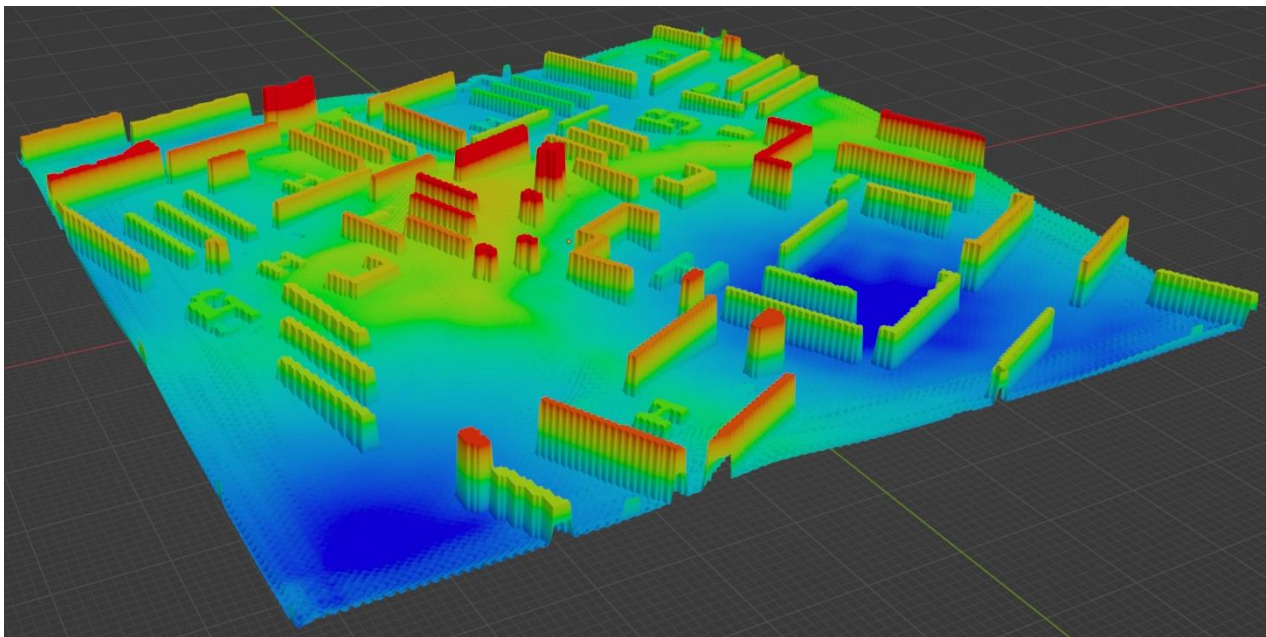


Рисунок 36 – Результирующая карта высот разработанного алгоритма

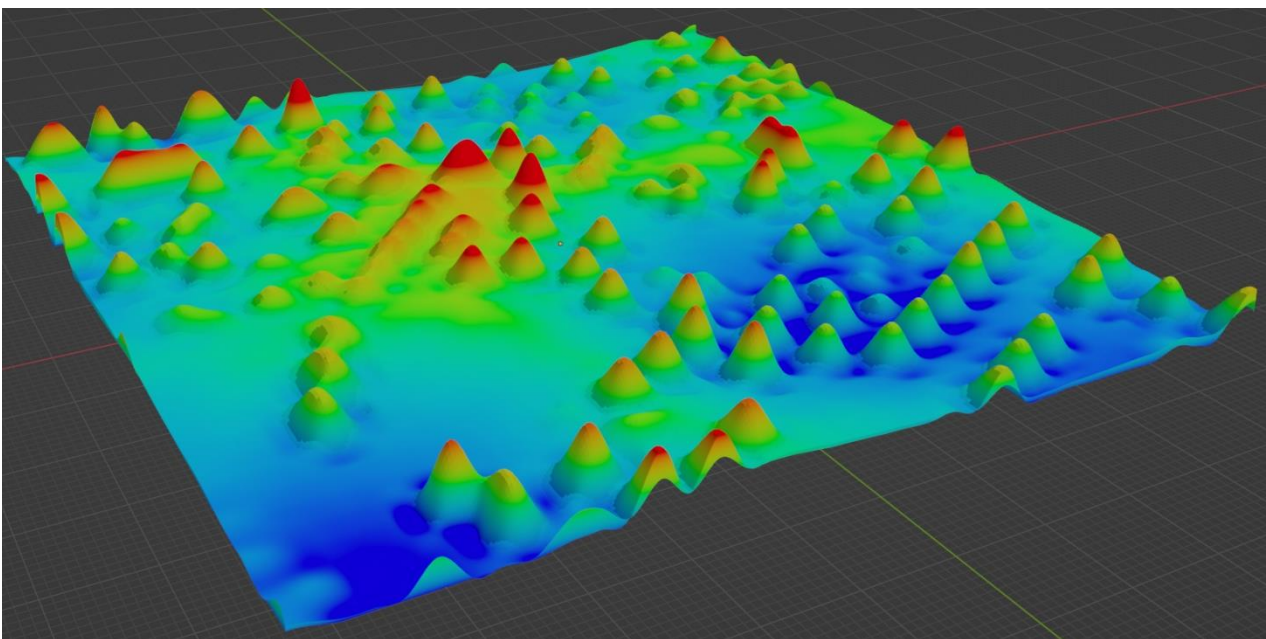


Рисунок 37 – Результирующая карта высот бикубической интерполяции

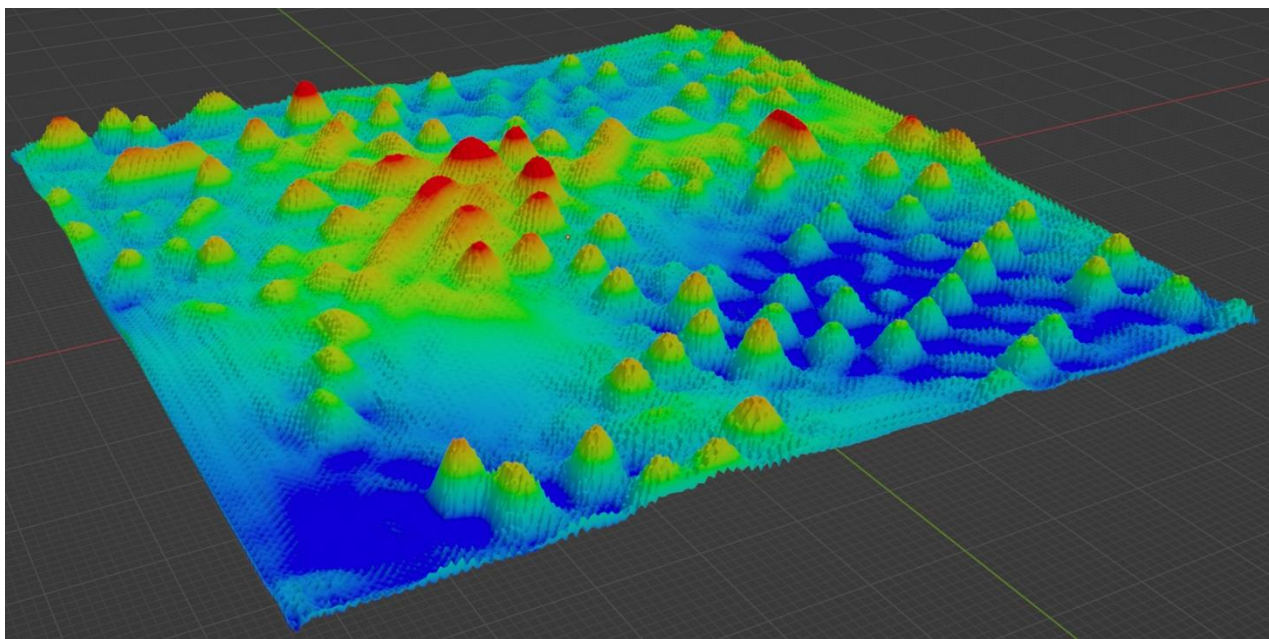


Рисунок 38 – Результирующая карта высот SRGAN

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были выполнены следующие задачи:

- 1) Исследованы существующих методов интерполяции;
- 2) Произведены поиск и анализ карт высот;
- 3) Сформирован набор данных для обучения и проверки разработанного метода;
- 4) Разработан метод увеличения разрешения карт высот городской застройки;
- 5) Создана реализация разработанного алгоритма;
- 6) Произведено исследование точности алгоритма в сравнении с классическим методом интерполяции и методом на основе машинного обучения.

В результате был разработан и реализован метод для увеличения разрешения карт высот городской застройки.

Для оценки точности метода была сгенерирована трёхмерная модель ландшафта городской застройки, на её основе была получена эталонная карта высот. С помощью этой карты было проведено исследование точности алгоритма и её сравнение с классическим методом интерполяции и с методом интерполяции природного ландшафта на основе глубокого машинного обучения.

Алгоритм показал наилучшее пиковое отношение сигнала к шуму равное 23,73 дБ, что не является пределом, так как саму реализацию метода ещё можно улучшать и оптимизировать. А именно разработанный метод может быть улучшен посредством:

- увеличения количества эпох обучения SRGAN,
- использования других методов интерполяции для увеличения разрешения,
- использования других методов интерполяции для заполнения удалённых данных зданий,

- использования данных о высоте зданий из OSM при их восстановлении,
- использования данных из карт озеленения для лучшей фильтрации высот деревьев.

Также в дальнейшем работе над улучшением метода можно произвести сравнение с обученной SRGAN, которая дополнительно принимала бы на вход маски OSM и WSF-2019, для чего необходимо сгенерировать соответствующий набор данных для обучения.

Результаты проделанной работы и исходные коды, текст, пример с инструкциями к запуску опубликованы в репозитории на GitHub, получить доступ к ним можно по ссылке <https://github.com/4yvakZ/City-DEM-Superresolution>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баумана С. О. С. Э. Обзор свёрточных нейронных сетей для задачи классификации изображений // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2017. (20). С. 37–42.
2. К.А. Мальцев, С.С. Мухарамова ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ (с применением пакета SURFER) учебное пособие / К.А. Мальцев, С.С. Мухарамова, 2014.
3. Щеглов Д.И., Громовик А.И. ОСНОВЫ ГЕОМОРФОЛОГИИ Учебное пособие для вузов Воронеж Издательский дом ВГУ. 2017.
4. Arun P. v. A comparative analysis of different DEM interpolation methods // Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2013. Т. 16. № 2. С. 133–139.
5. Azpurua M., Ramos K. dos A comparison of spatial interpolation methods for estimation of average electromagnetic field magnitude // Progress In Electromagnetics Research M. 2010. Т. 14. С. 135–145.
6. Baba M. W. [и др.]. Effect of Digital Elevation Model Resolution on the Simulation of the Snow Cover Evolution in the High Atlas // Water Resources Research. 2019. № 7 (55). С. 5360–5378.
7. Beutel A., Mølhave T., K. Agarwal P. Natural Neighbor Interpolation Based Grid DEM Construction Using a GPU / Beutel A., Mølhave T., K. Agarwal P., ACM, 2010. 274 с.
8. Buhmann M. D. Radial basis functions // Acta Numerica. 2000. (9). С. 1–38.
9. Chaplot V. [и др.]. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density // Geomorphology. 2006. № 1–2 (77). С. 126–141.
10. Chen C. [и др.]. A robust interpolation method for constructing digital elevation models from remote sensing data // Geomorphology. 2016. (268). С. 275–287.
11. Chen Z. [и др.]. Convolutional neural network based dem super resolution International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016.С. 247–250.

12. Creswell A. [и др.]. Generative Adversarial Networks: An Overview // IEEE Signal Processing Magazine. 2018. № 1 (35). С. 53–65.
13. Demiray B. Z., Sit M., Demir I. D-SRGAN: DEM Super-Resolution with Generative Adversarial Networks // SN Computer Science. 2021. № 1 (2).
14. Fadnavis S. Image Interpolation Techniques in Digital Image Processing: An Overview // Shreyas Fadnavis Int. Journal of Engineering Research and Applications www.ijera.com. 2014. (4). С. 70–73.
15. Gavriil K., Muntingh G., Barrowclough O. J. D. Void Filling of Digital Elevation Models with Deep Generative Models // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2019. № 10 (16). С. 1645–1649.
16. Grömping U. Variable Importance Assessment in Regression: Linear Regression versus Random Forest // The American Statistician. 2009. № 4 (63). С. 308–319.
17. Gu J. [и др.]. Recent advances in convolutional neural networks // Pattern Recognition. 2018. (77). С. 354–377.
18. Habib M. [и др.]. Impact of interpolation techniques on the accuracy of large-scale digital elevation model // Open Geosciences. 2020. № 1 (12). С. 190–202.
19. Hashemi-Beni L. [и др.]. Challenges and opportunities for UAV-based digital elevation model generation for flood-risk management: A case of princeville, north carolina // Sensors (Switzerland). 2018. № 11 (18).
20. Hawker L. [и др.]. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environmental Research Letters. 2022. № 2 (17).
21. Hutchinson M. F. ANUDEM VERSION 5.3. Canberra, 2011.
22. Jiang L. [и др.]. A multi-scale mapping approach based on a deep learning CNN model for reconstructing high-resolution urban DEMs // Water (Switzerland). 2020. № 5 (12).
23. Keeratikasikorn C., Trisirisatayawong I. RECONSTRUCTION OF 30M DEM FROM 90M SRTM DEM WITH BICUBIC POLYNOMIAL INTERPOLATION METHOD.

24. Kent C. W. [и др.]. Urban morphology parameters from global digital elevation models: Implications for aerodynamic roughness and for wind-speed estimation // Remote Sensing of Environment. 2019. (221). С. 316–339.
25. Lazebnik L. Convolutional Neural Network Architectures: from LeNet to ResNet. 2018.
26. Lee J. Comparison of existing methods for building triangular irregular network, models of terrain from grid digital elevation models // International Journal of Geographical Information Systems. 1991. № 3 (5). С. 267–285.
27. Li S. [и др.]. Integrating topographic knowledge into deep learning for the void-filling of digital elevation models // Remote Sensing of Environment. 2022. (269).
28. Marconcini M. [и др.]. Outlining where humans live, the World Settlement Footprint 2015.
29. Moon S. H., Choi H. L. Super-resolution based on deep learning technique for constructing digital elevation model American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA, 2016.
30. O'Shea K., Nash R. An Introduction to Convolutional Neural Networks 2015.
31. Pavlova A. I. Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2017. № 2 (53). С. 171–177.
32. Qiu Z., Yue L., Liu X. Void filling of digital elevation models with a terrain texture learning model based on generative adversarial networks // Remote Sensing. 2019. № 23 (11).
33. Roostae M., Deng Z. Effects of Digital Elevation Model Resolution on Watershed-Based Hydrologic Simulation // Water Resources Management. 2020. № 8 (34). С. 2433–2447.
34. Salekin S. [и др.]. A comparative study of three non-geostatistical methods for optimising digital elevation model interpolation // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2018. № 8 (7).

35. Schlögel R. [и др.]. Optimizing landslide susceptibility zonation: Effects of DEM spatial resolution and slope unit delineation on logistic regression models // *Geomorphology*. 2018. (301). С. 10–20.
36. Segal M. R. UCSF Recent Work Title Machine Learning Benchmarks and Random Forest Regression Publication Date Machine Learning Benchmarks and Random Forest Regression. 2003.
37. Shin D., Spittle S. LoGSRN: Deep super resolution network for digital elevation model // *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2019. (2019-October). С. 3060–3065.
38. Szypuła B. Geomorphometric comparison of DEMs built by different interpolation methods // *Landform Analysis*. 2017. (32). С. 45–58.
39. Watson D. The natural neighbor series manuals and source codes.
40. Žabota B., Repe B., Kobal M. Influence of digital elevation model resolution on rockfall modelling // *Geomorphology*. 2019. (328). С. 183–195.
41. Zhang Y., Yu W., Zhu D. Terrain feature-aware deep learning network for digital elevation model superresolution // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2022. (189). С. 143–162.
42. Zhang Z. [и др.]. Complex spatial morphology of urban housing price based on digital elevation model: A case study of Wuhan City, China // *Sustainability (Switzerland)*. 2019. № 2 (11).
43. Как работает метод обратных взвешенных расстояний—Справка | Документация [Электронный ресурс]. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.7/extensions/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm> (дата обращения: 25.11.2022).
44. Как работает инструмент Сплайн—ArcGIS Pro | Документация [Электронный ресурс]. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-spline-works.htm> (дата обращения: 25.11.2022).
45. Как работает инструмент Кригинг (Kriging)—Справка | ArcGIS for Desktop [Электронный ресурс]. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm> (дата обращения: 25.11.2022).

46. Как работает инструмент Топо в растр—ArcMap | Документация [Электронный ресурс]. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-topo-to-raster-works.htm> (дата обращения: 01.12.2022).
47. Как работает интерполяция по методу глобального полинома—Справка | Документация [Электронный ресурс]. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.7/extensions/geostatistical-analyst/how-global-polynomial-interpolation-works.htm> (дата обращения: 01.12.2022).
48. Как работает интерполяция по методу локального полинома—Справка | Документация [Электронный ресурс]. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.7/extensions/geostatistical-analyst/how-local-polynomial-interpolation-works.htm> (дата обращения: 01.12.2022).
49. Что такое TIN поверхность?—Справка | ArcGIS for Desktop [Электронный ресурс]. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm> (дата обращения: 01.12.2022).
50. Как работают радиальные базисные функции—ArcGIS Pro | Документация [Электронный ресурс]. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/2.9/help/analysis/geostatistical-analyst/how-radial-basis-functions-work.htm> (дата обращения: 01.12.2022).
51. OpenStreetMap [Электронный ресурс]. URL: <https://www.openstreetmap.org/#map=13/59.9417/30.2763&layers=H> (дата обращения: 09.06.2023).
52. 1 meter Digital Elevation Models (DEMs) - USGS National Map 3DEP Downloadable Data Collection | USGS Science Data Catalog [Электронный ресурс]. URL: <https://data.usgs.gov/datacatalog/data/USGS:77ae0551-c61e-4979-aedd-d797abdcde0e> (дата обращения: 10.01.2024).
53. Houdini | 3D Procedural Software for Film, TV & Gamedev | SideFX [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sidefx.com/products/houdini/> (дата обращения: 20.04.2024).

54. Процедурный генератор 3D-города | 3D-Дизайн города для городской среды [Электронный ресурс]. URL: <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-cityengine/overview> (дата обращения: 10.01.2024).
55. QGIS Main Page [Электронный ресурс]. URL: <https://qgis.org/ru/site/> (дата обращения: 10.09.2023).
56. CloudCompare - home [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cloudcompare.org/main.html> (дата обращения: 20.04.2024).