

УДК 004.932

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ВЫСОТЕ ОБЪЕКТОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Егошкин Н.А., к.т.н., в.н.с. НИИ «Фотон» Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ), e-mail: foton@rsreu.ru;

Ушенкин В.А., м.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, e-mail: foton@rsreu.ru.

DEM FUSION TO IMPROVE THE ACCURACY OF REFERENCE EARTH SURFACE ELEVATION DATA

Egoshkin N.A., Ushenkin V.A.

Artifacts in existing global DEMs are analyzed in this paper. The problem of reference elevation data accuracy improving by collation and combination of existing DEMs, obtained from different sources and containing different errors, is considered. The algorithm of DEM fusion designed to improve the accuracy of elevation data is proposed. The examples of the algorithm results are given.

Keywords: fusion, DEM, interferometric processing, stereophotogrammetric processing, reference data.

Ключевые слова: комплексирование, цифровая модель рельефа, интерферометрическая обработка, стереофотограмметрическая обработка, опорная информация.

Введение

Опорная информация о высоте рельефа земной поверхности требуется при решении широкого класса задач, связанных с обработкой данных дистанционного зондирования Земли. Априорное знание рельефа требуется при геодезической привязке и геометрической коррекции спутниковых снимков, а также при построении цифровых моделей рельефа и карт смещений земной поверхности путем интерферометрической обработки радиолокационных изображений [1].

В настоящее время в качестве опорной информации о высоте используется ряд глобальных низкодетальных цифровых моделей рельефа (ЦМР), содержащих только высоты естественных неживых элементов ландшафта, и цифровых моделей местности (ЦММ), включающих также искусственные строения и растительность. В дальнейшем для простоты изложения все глобальные низкодетальные трехмерные модели будем называть ЦМР, подразумевая, что часть из них на самом деле является ЦММ.

Все глобальные ЦМР получены одним из двух способов: путем стереофотограмметрической [2] или интерферометрической [1] обработки материалов оптической или радиолокационной космической съемки Земли. Глобальный характер указанных ЦМР заключается в том, что они покрывают большую часть земной суши. При этом для каждой из ЦМР имеется ряд регионов, в которых нет данных о высоте. На стереофотограмметрических ЦМР пропуски вызваны наличием облачности и засветкой льдов, снега и песков при оптической съемке. На интерферометрических ЦМР пропуски вызваны низкой когерентностью сигнала радиолокационных изображений на льдах, в песках и лесах. Кроме того, накло-

Анализируются на наличие артефактов существующие глобальные низкодетальные цифровые модели рельефа земной поверхности. Рассматривается задача повышения точности опорной информации о высоте объектов земной поверхности за счет сопоставления и объединения существующих цифровых моделей рельефа, полученных из различных источников и содержащих разные ошибки. Предлагается алгоритм комплексирования цифровых моделей рельефа, направленный на повышение точности данных о высоте. Приводятся примеры результатов предложенного алгоритма.

нение орбиты космических аппаратов не позволяет получить данные для построения ЦМР в полярных и приполярных областях.

Перечисленные причины возникновения пропусков могут также приводить к ошибкам высоты, если они не были выявлены при формировании ЦМР. Дополнительными источниками ошибок являются:

1) невыявленные участки водной поверхности и прочие малоконтрастные объекты, на которых могут возникнуть значительные ошибки корреляционного совмещения при стереофотограмметрической обработке;

2) неправильное развертывание фазы при интерферометрической обработке [3].

Ошибки высоты и пропуски на глобальных ЦМР располагаются на локальных участках. Локальный характер ошибок обусловлен тем, что глобальная ЦМР формируется в виде мозаики, состоящей из ЦМР, построенных по одной паре маршрутов. Поэтому даже на интерферометрических ЦМР, в которых возможно значительное распространение ошибки из-за неправильного развертывания фазы, это распространение ограничивается краями маршрута. Благодаря тому, что все ЦМР получены из разных источников двумя принципиально отличающимися способами (интерферометрией и стереофотограмметрией), расположение ошибок и пропусков на них в целом не совпадает. Следовательно, появляется возможность повышения точности данных о высоте объектов участка земной поверхности путем комплексирования нескольких ЦМР.



Цель настоящей работы – построение алгоритма комплексирования ЦМР, который для каждой точки земной поверхности сопоставляет имеющиеся различные данные о высоте и выбирает из них наиболее достоверные, тем самым повышая среднюю точность результата комплексирования по сравнению с каждой из исходных ЦМР.

Анализ существующих глобальных ЦМР

Среди всех существующих глобальных ЦМР можно выделить три, отличающиеся наилучшей детальностью и точностью высоты: Alos World 3D 30, SRTM1 версии 3 и ASTER GDEM версии 2. Указанные ЦМР имеют проекцию пикселя в одну угловую секунду, что соответствует примерно 30 м на экваторе. Пространственное разрешение указанных ЦМР лежит в диапазоне от 30 до 90 м, а среднеквадратичная ошибка высоты – от 5 до 20 м.

Alos World 3D 30 представляет собой ЦММ, полученную путем стереофотограмметрической обработки троек оптических изображений с космического аппарата Alos, снятых при визировании вперед, в надиры и назад [4]. За счет такой организации съемки на ЦММ не образуются пропусков, вызванных затенением. Исходная версия Alos World 3D имеет пространственное разрешение 5 м и распространяется Японским космическим агентством на коммерческой основе, а в открытом доступе начиная с 2016 г. представлена версия с пространственным разрешением, закругленным до 30 м. Среднеквадратичная погрешность высоты на Alos World 3D 30 составляет 5 м. Очень редко на ЦММ встречаются грубые ошибки высоты на невыявленной облачности или водной поверхности, а также ошибочное выявление водной поверхности. ЦММ покрывает всю сушу от 82° ю.ш. до 82° с.ш., за исключением регионов с постоянной облачностью и ледниками.

ЦМР SRTM1 получена путем интерферометрии с жесткой базой в результате топографической миссии шаттла «Индевор» в 2000 г. [5]. Пространственное разрешение ЦМР колеблется в различных регионах от 40 до 60 м. При этом из-за особенностей геометрии интерферометрической радиолокационной съемки может происходить значительное снижение детальности на горных склонах. Среднеквадратичная погрешность высоты на SRTM1 составляет 10 м, причем большая часть этой погрешности вызвана шумами, не полностью подавленными при фильтрации интерферограммы. В первых версиях ЦМР наблюдалось значительное количество ошибок из-за неправильного развертывания фазы в горной местности, однако в третьей версии практически все они скорректированы по данным из альтернативных источников. ЦМР покрывает земную поверхность от 56° ю.ш. до 60° с.ш.

ЦММ ASTER GDEM получена путем стереофотограмметрической обработки пар оптических изображений, снятых в ближнем инфракрасном диапазоне космическим аппаратом Terra [6]. Пространственное разрешение исходных изображений составляло всего 20 м, из-за чего на ЦММ наблюдается сильный шум, вызванный субпиксельной погрешностью корреляционного совмещения исходных стереопар изображений. При этом среднеквадратичная погрешность высоты составляет 20 м. Кроме того, при формировании ЦММ была некачественно построена маска облачности и водной поверхности, что привело к локаль-

ным ошибкам высоты величиной до нескольких сотен метров, особенно часто встречающимся в приполярных и полярных областях. Пространственное разрешение ASTER GDEM версии 2 составляет порядка 80 м. ЦММ покрывает земную поверхность от 83° ю.ш. до 83° с.ш., за исключением небольших участков с облачностью и ледниками.

Комплексирование цифровых модулей

Ключевая идея комплексирования

Поскольку все существующие глобальные ЦМР характеризуются разной точностью высоты и пространственным разрешением, среди них можно выбрать наиболее точную и детальную в качестве базовой. Результат комплексирования совпадает с базовой ЦМР во всех участках, кроме тех, где выявлены локальные ошибки путем сравнения с другими ЦМР. Участки с локальными ошибками следует заполнять данными из других источников. При этом необходимо обеспечить отсутствие нестыковок на границе этих участков, вызванных несогласованностью данных на разных ЦМР.

Можно выделить два основных типа локальных ошибок:

- 1) ошибочное выделение водной поверхности на склоне рельефа с назначением фиксированной высоты;
- 2) ошибки большой величины из-за невыявления отдельного облака, участка ненадежной корреляции или неправильного развертывания фазы.

Ошибки первого типа могут быть выявлены на основе следующего правила: водная поверхность не может быть выше, чем берег. Области с ошибками второго типа, как правило, имеют ярко выраженные границы, на которых наблюдаются резкие изменения высоты величиной от нескольких десятков метров до нескольких километров. Это является основным признаком для их выявления. Однако при этом следует также учесть, что аналогичным признаком обладают высотные здания, которые присутствуют на ЦММ, но отсутствуют на ЦМР.

Критерии выявления ошибок на базовой ЦМР

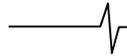
Критерий выявления ошибочно выделенной водной поверхности можно записать следующим образом:

$$N_{\sigma\sigma} > \varepsilon_{\sigma\sigma} N_{\sigma}, \quad (1)$$

где N_{σ} – количество пикселей ЦМР, расположенных вдоль границы (берега) выделенной водной поверхности, $N_{\sigma\sigma}$ – количество пикселей ЦМР, расположенных вдоль берега, в которых высота воды более чем на σ_h больше высоты берега, где σ_h – среднеквадратичная ошибка высоты на ЦМР, $\varepsilon_{\sigma\sigma}$ – порог, значительно меньший единицы.

Области с ошибками, связанными с облачностью, ненадежной корреляцией или неправильным развертыванием фазы, выявляются в два этапа.

На первом этапе находятся пиксели базовой ЦМР, значение высоты в которых значительно отличается от аналогичных значений на альтернативной ЦМР. При этом допустимая степень отличия выбирается в зависимости от типа рельефа. Для равнинной местности значения высоты должны быть максимально близки, а в горной местности следует допустить сильные расхож-



дения, которые могут быть связаны как с разной детальностью сравниваемых ЦМР, так и с погрешностями их геодезической привязки:

$$h_{\text{баз}} - h_{\text{мн}} \notin [-\Delta h_{\text{ниж}}, \Delta h_{\text{верх}}] \cup [-\varepsilon_{Gh} G_{h_{\text{макс}}}, \varepsilon_{Gh} G_{h_{\text{макс}}}] \quad (2)$$

где $h_{\text{баз}}$ – значение высоты на базовой ЦМР, h – значение высоты на альтернативной ЦМР, $\Delta h_{\text{ниж}}$ и $\Delta h_{\text{верх}}$ – пороги допустимых отличий высоты для равнинной местности, $G_{h_{\text{макс}}}$ – максимум модуля градиента высоты в малой окрестности m -го пикселя альтернативной ЦМР, ε_{Gh} – коэффициент учета градиента высоты.

В результате применения критерия (2) образуется некоторое количество кандидатов в области с ошибками высоты, часть из которых отбраковывается на втором этапе выявления. Области с ошибками высоты признаются только те из кандидатов, которые удовлетворяют следующему условию:

$$\frac{1}{N_{\text{эп}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{эп}}} |G_{h_{\text{эп}} \text{баз}i} - |G_{h_{\text{эп}}i}| > \varepsilon_{\text{эп}}, \quad (3)$$

где $G_{h_{\text{эп}} \text{баз}i}$ и $G_{h_{\text{эп}}i}$ – градиент высоты в i -м пикселе границы области-кандидата, направленный по внешней нормали к линии границы, на базовой и альтернативной ЦМР, $N_{\text{эп}}$ – периметр области-кандидата в пикселях, $\varepsilon_{\text{эп}}$ – неотрицательный порог, подбираемый эмпирическим путем.

Если кандидат не удовлетворяет условию (3), то предполагается, что в данной области ошибка содержится не на базовой ЦМР, а на альтернативной ЦМР.

Заполнение пропусков и областей с ошибками на базовой ЦМР

Пропуски и выделенные ошибочные области на базовой ЦМР требуют заполнения по альтернативной методике с обеспечением стыковки значений высоты на границах этих областей. Стыковку можно обеспечить с использованием корректирующей высотной поверхности $h_{\text{корр}}$, применяемой к значениям высоты на альтернативной ЦМР. В пикселях с корректными значениями высоты на базовой ЦМР корректирующая поверхность определяется как $h_{\text{корр}mn} = h_{\text{баз}mn} - h_{\text{мн}}$.

В выделенных ошибочных областях и пропусках на базовой ЦМР значения корректирующей поверхности определяются с помощью интерполяции по методу обратных взвешенных расстояний [7]:

$$h_{\text{корр}mn} = \frac{\sum_k \sum_l h_{\text{корр}m+k, n+l} \omega_{\text{корр}m+k, n+l} \left(\sqrt{k^2 + l^2} \right)^{-p}}{\sum_k \sum_l \omega_{\text{корр}m+k, n+l} \left(\sqrt{k^2 + l^2} \right)^{-p} + \varepsilon} \quad (4)$$

где $0 < \sqrt{k^2 + l^2} \leq D$; k, l – целые; $\omega_{\text{корр}mn} = 1$ в пикселях с корректными значениями высоты на базовой ЦМР и $\omega_{\text{корр}mn} = 0$ в ошибочных областях и пропусках на

базовой ЦМР; D и p – радиус и показатель фильтра обратных расстояний, ε – малая величина, используемая для регуляризации.

В результате пропуска и ошибочные области на базовой ЦМР заполняются значениями $h_{\text{мн}} + h_{\text{корр}mn}$.

Алгоритм комплексирования нескольких ЦМР

При описании критериев выявления ошибок и заполнения ошибочных областей рассматривался простейший частный случай, когда комплексуются только две ЦМР. В общем случае комплексирование осуществляется следующим образом.

Комплексируемые ЦМР упорядочиваются по интегральному критерию точности и детальности. Сначала в качестве альтернативной выбирается худшая ЦМР, а в качестве базовой – предпоследняя по качеству, и осуществляется их комплексирование. Затем комплексуются ЦМР, третья от конца по качеству, выбранная как базовая, и результат объединения двух худших ЦМР. Последовательное комплексирование осуществляется до тех пор, пока в качестве базовой не будет выбрана лучшая ЦМР.

Экспериментальные исследования

С учетом имеющихся в настоящее время глобальных низкодетальных ЦМР и их точности и детальности, на практике может быть реализовано комплексирование следующих из них: ALOS World 3D 30, SRTM1 версии 3, ASTER GDEM версии 2 и GMTED2010. ЦМР упорядочены в порядке убывания качества. GMTED2010 имеет низкое пространственное разрешение, варьирующееся в различных регионах от 250 м до нескольких километров, но покрывает абсолютно всю сушу на Земле, поэтому заполнение пропусков на ней не требуется.

Ввиду отсутствия точных сведений о высоте рельефа качество результатов комплексирования ЦМР оценивалось на основе визуального выявления ошибок путем сопоставления ЦМР и спутниковых снимков на тот же регион. Оценка производилась не по всему земному шару, а по небольшой выборке отдельных регионов. Примеры таких регионов представлены на рис. 1–3.

Результаты оценки показали, что в пределах покрытия ЦМР SRTM все крупные ошибки на ALOS World 3D устраняются при комплексировании, а остаются лишь небольшие ошибки, которые трудно отличить от сюжета или временных изменений рельефа. Количество ошибочных пикселей на результате комплексирования в среднем оказывается примерно на три десятичных порядка меньше, чем на базовой ЦМР. Среднее значение абсолютной погрешности высоты в ошибочных пикселях уменьшается после комплексирования примерно в 12 раз.

В полярных и приполярных регионах точность результата комплексирования снижается. Это связано с тем, что ALOS World 3D приходится сравнивать с более грубыми ЦМР ASTER GDEM и GMTED2010. Следовательно, возрастает вероятность содержания ошибки одновременно на всех сравниваемых ЦМР, что иллюстрирует рис. 3.

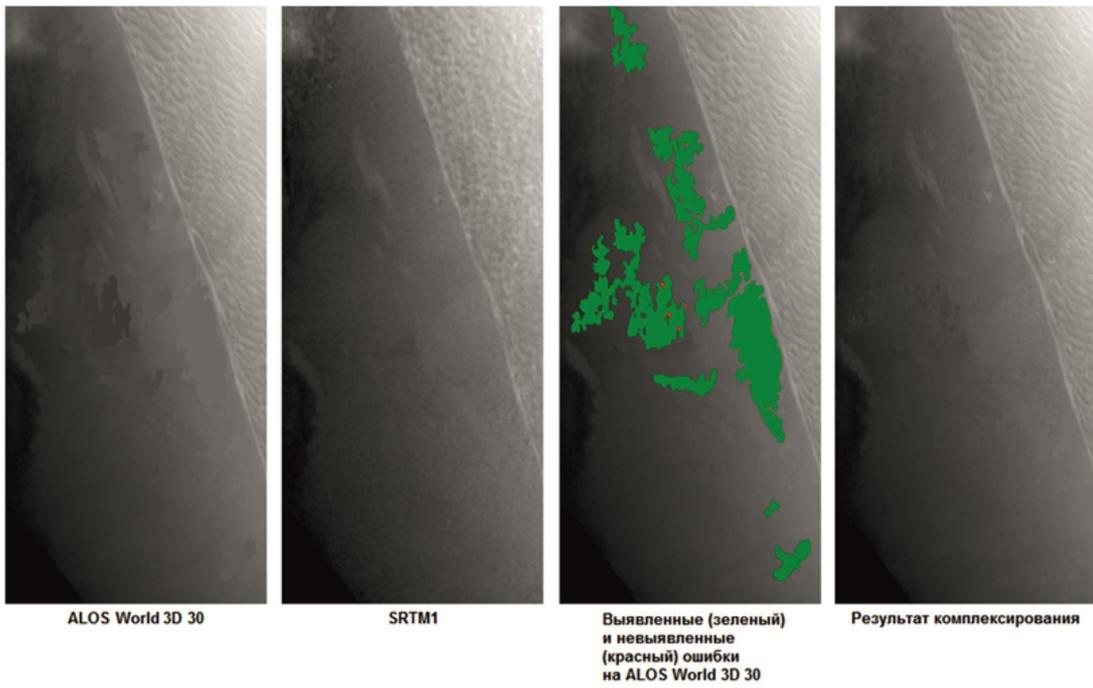


Рис. 1. Пример выявления и устранения при комплексировании ошибочно примененной маски водной поверхности

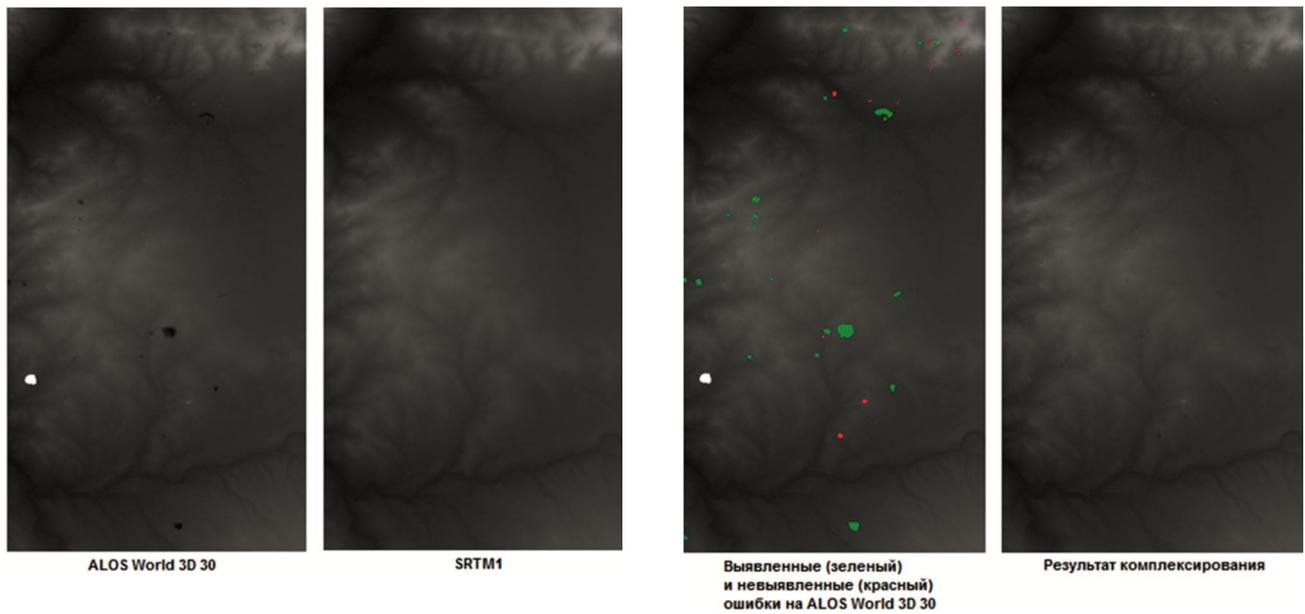


Рис. 2. Пример выявления и устранения при комплексировании крупных артефактов, вызванных наличием облачности при съемке

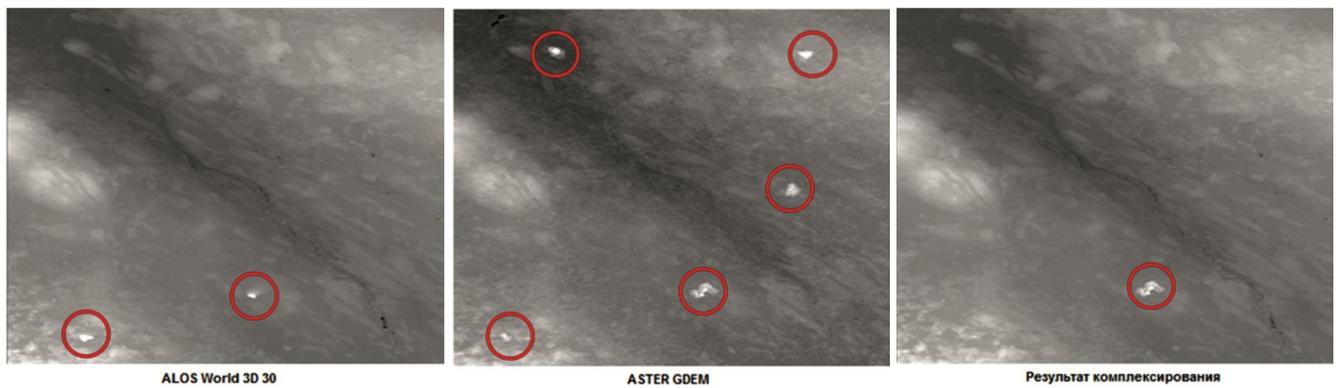


Рис. 3. Пример остаточной ошибки на результате комплексирования

Заключение

Предложенный алгоритм комплексирования ЦМР позволяет получить опорные данные о высоте рельефа для всей земной поверхности, предоставляющие для каждого локального участка наиболее точную из имеющейся информации. Результат комплексирования может содержать редкие локальные ошибки, либо неотделимые в автоматическом режиме от сюжета, либо вызванные тем, что на всех комплексируемых ЦМР в данном локальном участке нет правильных значений высоты.

Литература

1. Ушенкин В.А., Егошкин Н.А. Использование априорной информации при интерферометрической обработке высокодетальной радиолокационной информации // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15. № 2. – С. 208–219.
2. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Информационная технология стереофотограмметрической обработки ви-

деоданных от многоматричных сканирующих устройств // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 3. – С. 44–49.

3. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка радиолокационной информации на основе комбинации методов развертывания фазы // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54-2.– С. 21–31.

4. Tadono T., Nagai H., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Generation of the 30 m-mesh global digital surface model by Alos PRISM // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. 41. Part B4. – P. 157–162.

5. Farr T.G., Kobrick M. The Shuttle Radar Topography Mission // RTO Meeting Proceedings 61: Space-Based Observation Technology. 2000. – P. 33-1–33-3.

6. Cuartero A., Felicísimo A.M., Ariza F.J. Accuracy of DEM generation from Terra-ASTER stereo data // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2004. Vol. 35. Part B2. – P. 559–563.

7. Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data // Proc. of the 1968 ACM National Conference. 1968. P. 517–524.