

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 528.854.2:528.852.3

DOI: 10.22389/0016-7126-2018-937-7-57-64

Алгоритм адаптивной коррекции структурных форм глобальных цифровых моделей высот

©¹Жданов А. Ю., ²Панкин А. В., ³Рентель А. В., 2018

^{1,3}Научно-исследовательский институт точных приборов
127490, Россия, г. Москва, ул. Декабристов, д. 51

²Научный центр оперативного мониторинга
Земли АО «Российские космические системы»
127490, Россия, г. Москва, ул. Декабристов, д. 51, строение 25

¹alexzhdanov1003@gmail.com ²apcrit@yandex.ru ³progress75@yandex.ru

В связи с различными факторами, такими как шаг интерполяции или особенности работы автоматических корреляторов, глобальные цифровые модели высот часто имеют эффект занижения высоты, что приводит к неточному отображению на них структурных форм рельефа, например хребтов. В статье предложен алгоритм адаптивной коррекции высотного положения структурных форм рельефа на цифровых моделях высот, состоящий из двух этапов. На первом этапе проводится автоматическая классификация структурных форм на основе анализа разности высот между соседними элементами цифровой модели. На втором этапе на основании присвоенных классов выбираются элементы цифровой модели высот, подлежащие коррекции, и рассчитываются новые значения высоты. Работа алгоритма протестирована на данных глобальной цифровой модели высот ALOS World 3D, результаты оценены по пунктам государственной геодезической сети и данным миссии ICESat. Разработанный алгоритм показал улучшение точности цифровой модели высот, особенно в высокогорных районах, а также позволил выявить участки, требующие дополнительной проверки.

Автоматический поиск хребтов, коррекция цифровой модели высот, цифровые модели высот.

Для цитирования: Жданов А. Ю., Панкин А. В., Рентель А. В. Алгоритм адаптивной коррекции структурных форм глобальных цифровых моделей высот // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79. – № 7. – С. 57–64. DOI: 10.22389/0016-7126-2018-937-7-57-64

Введение

В настоящее время глобальные цифровые модели высот нашли широкое применение в приложениях геоинформационных систем для решения различных расчётных задач. В качестве информации о высотах на обширных по площади территориях используют данные глобальных моделей ALOS World 3D (ALOS W3D30) [5], SRTM и др., находящихся в открытом доступе.

Формально ALOS W3D30 – цифровая матрица поверхности; далее для удобства

будем использовать термин «цифровая модель высот» (ЦМВ). При оценке точности данной модели высот на территории постсоветского пространства в качестве планово-высотной основы использованы сведения о пунктах государственной геодезической сети (ГГС), данные, полученные с помощью лазерного высоотомера космического аппарата ICESat [1], и другая контрольная топогеодезическая информация. Точность координат и высот пунктов ГГС регламентирована нормативно-техниче-

ской документацией. Заявляемая оператором данных ICESat субметровая точность высот проверена и подтверждена другими видами геопространственной информации, характеризующейся заведомо более высокими точностными параметрами в разных районах, в том числе спутниковыми геодезическими измерениями и данными воздушного лазерного сканирования. Дискретность цифровой матрицы поверхности ALOS W3D30 составляет 1", что соответствует на местности приблизительно 30 м на север и значению, пропорциональному косинусу широты, на восток. Точки лазерных отражений (ТЛО) ICESat, как и данные цифровых моделей высот, представлены в общеземной системе координат.

Если на равнинных участках местности расхождения высот цифровой модели с высотами пунктов ГГС и ТЛО ICESat находятся в узком диапазоне, что указывает на согласованность эталонной информации (ГГС и ICESat) с ЦМБ через модель квазигеоида, а значит, и на надёжность оценки точностных параметров, то в условиях горного и высокогорного рельефа значения высот ЦМБ и эталонной информации существенно расходятся. При выполнении оценки точности относительно пунктов ГГС отмечается увеличение систематической составляющей ошибки, значение которой растёт вместе с абсолютными значениями высот рельефа и значениями уклонов.

В основном ТЛО ICESat лежат на ледниках, склонах, равнинных участках, а на вершинах почти отсутствуют. Пункты ГГС, наоборот, расположены на вершинах возвышенностей, на господствующих высотах хребтов.

Установлено, что ЦМБ ALOS W3D30 имеет эффект занижения высот вершин, хребтов, «смазывания» бровок обрывов, осыпей, наиболее заметно проявляющийся в условиях высокогорья. Причины этого явления предположительно следующие:

увеличение дискретности регулярной сетки при создании производителями открытых версий ЦМБ путём интерполяции детальных коммерческих данных;

специфика алгоритмов работы автоматического коррелятора при построении поверхности рельефа по материалам космической стереосъёмки;

условия выполнения съёмок и свойства подстилающей поверхности.

Наиболее корректный способ устранения этого эффекта – «достраивание» рельефа на всех остроконечных вершинах и водоразделах по стереоизмерениям. Однако при реализации этого подхода на обширных территориях затраты (трудовые и финансовые) будут неоправданно большими.

В сложившейся ситуации целесообразно применить математический аппарат адаптивной коррекции, учитывающий характер рельефа, но не зависящий от контрольной информации.

Описание существующих алгоритмов

Из рассмотренных методов детектирования хребтов и вершин были выбраны наиболее удачные с точки зрения функциональности, скорости расчёта и независимости от абсолютных высот [2, 3]. Оптимальным вариантом оказался алгоритм классификации форм рельефа, описанный в работе [2], основанный на сравнении высот рассматриваемого пикселя с окружающими соседними по четырём направлениям. Данный алгоритм сравнивает форму рельефа с 32 априорными образцами, разделёнными на шесть категорий, и по результату этого сравнения выносит решение об определении пикселя как хребта.

Предложенный в работе [2] алгоритм не зависит от абсолютной высоты пикселя, имеет вычислительную сложность $O(N)$. Это означает, для обработки каждого элемента множества необходимы максимум N обращений к его элементам, т. е. один полный обход, что считается одним из наилучших вариантов в обработке изображений. Алгоритм не требует экспериментально определяемого порога распознавания, но обладает сложным правилом принятия решений, которое не лишено конфликтных ситуаций, когда одна категория принимает положительное решение, другая – отрицательное. Авторы алгоритма решили эту

проблему, выстроив каскад решений, в котором категории опрашиваются по очереди, и первая категория, вынесшая положительное решение, прерывает опрос каскада. Следует отметить, что описанные шесть категорий являются, по сути, описанием применения трёх бинарных поворачиваемых фильтров размером 3×3 . Это уменьшает возможности улучшения алгоритма при использовании оригинального изложения или увеличивает сложность изначальной реализации при точном исполнении метода классификации поворачиваемыми фильтрами.

Отметим, что авторы работы [4] также описывают различные принципиальные характеристики для формализации понятий «хребет» и «долина» в контексте задач анализа изображений.

Описание разработанного алгоритма

После анализа найденных алгоритмов разработан собственный вариант, основанный на алгоритме классификации форм рельефа (shape classification method) [2], но с устранением основных проблем и сложностей данного решения. Алгоритм базируется на классификации форм рельефа на основании разницы превышений высот с соседними значениями. Он разделён на два этапа: классификация форм рельефа и выделение хребтов. На первом этапе всем пикселям цифровой модели присваивается индекс класса, зависящий от сравнения высоты пикселя с высотами соседних пикселей. На втором этапе выносится решение о том, какие из обнаруженных классов причислять к хребтам, а какие к другим формам рельефа, и исходя из этого к ним применяется коррекция высот.

Данное решение, по сути, обобщает алгоритм классификации форм рельефа с использованием локальных бинарных шаблонов, предложенный в работе [2]. Это обобщение открывает широкие возможности для дальнейшего развития алгоритма в части распознавания различных форм рельефа с использованием широкого набора методов машинного обучения, разработанных в последние годы.

Форма рельефа определяется кодом, основанным на разности превышений:

$$\text{Class}_{(x,y)} = \sum_{i=-r, j=-r}^{r, r} \begin{cases} -1, & \text{DEM}_{(x,y)} > \text{DEM}_{(x+i, y+j)}; \\ 0, & \text{DEM}_{(x,y)} = \text{DEM}_{(x+i, y+j)}; \\ 0, & i = 0, j = 0; \\ 1, & \text{DEM}_{(x,y)} < \text{DEM}_{(x+i, y+j)}, \end{cases}$$

где $\text{Class}_{(x,y)}$ – индекс класса формы рельефа; x, y – координаты пикселя; r – радиус окна сканирования; i, j – индекс элемента в окне сканирования; $\text{DEM}_{(x,y)}$ – высота ЦМБ в точке с координатами (x, y) .

Если высота соседнего пикселя превышает высоту текущего пикселя, то к индексу класса необходимо прибавить 1, если же высота текущего пикселя превышает высоту соседнего – вычесть 1, если высоты текущего пикселя и соседнего одинаковы, то индекс остаётся неизменным. Итоговая сумма по всем соседям в радиусе сканирования – индекс класса текущего пикселя (рис. 1). Таким образом, все точки ЦМБ разделяются на n классов: $n = 2[(2r+1)^2 - 1] + 1$; в базовом случае $r = 1$, следовательно, $n = 2 \cdot 8 + 1 = 17$ классов, от -8 до $+8$.

В полученном множестве классов существуют классы относительных возвышений, требующие коррекции занижения данных ЦМБ. В предложенной методике предлагается отфильтровать классы локальных возвышенностей от классов локальных низин и классов склонов методом пороговой бинаризации. Преимущество такого подхода – простота реализации, а недостаток – необходимость опытного (экспериментального) подбора порога локальных возвышенностей K . Пороговый

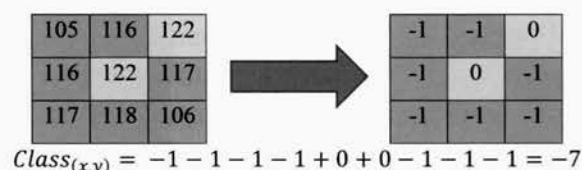


Рис. 1. Пример расчёта значения класса формы рельефа в ячейке ЦМБ
Fig. 1. Determination of landform class for DEM cell

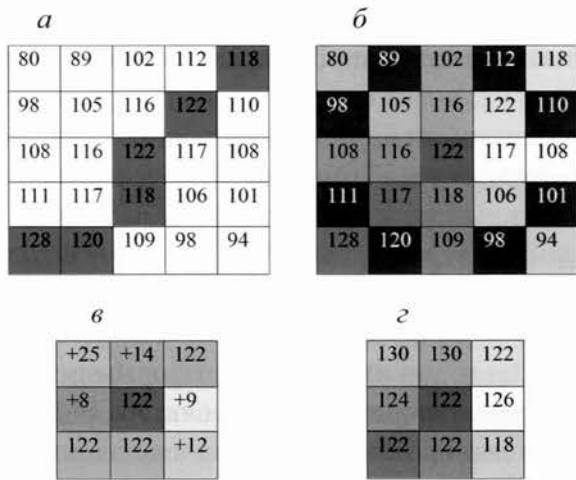


Рис. 2. Расчёт прогнозируемых значений для исправляемой ячейки ЦМВ
Fig. 2. Calculation of predicted values for corrected DEM cell

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 80 | 89 | 102 | 112 | 118 |
| 98 | 105 | 116 | 122 | 110 |
| 108 | 116 | 124 | 117 | 108 |
| 111 | 117 | 118 | 106 | 101 |
| 128 | 120 | 109 | 98 | 94 |

Рис. 3. Итоговое значение высоты в исправленной ячейке ЦМВ
Fig. 3. Final elevation value of corrected DEM cell

коэффициент может параметрически зависеть от общего числа классов, т. е. от радиуса сканирования, что позволяет изменять радиус сканирования, но всё равно оставляет необходимость определять коэффициент зависимости $K(n)$.

Выбранный порог становится пороговым индексом K интересующих классов, и проводится бинаризация матрицы классов по порог:

$$\text{Mask}_{(x,y)} = \begin{cases} 1, & \text{Class}_{(x,y)} \leq K, \\ 0, & \text{Class}_{(x,y)} > K. \end{cases}$$

Далее для всех пикселей цифровой модели, для которых $\text{Mask}_{(x,y)} = 1$, применяет-

ся коррекция, основанная на расчёте среднего значения линейной экстраполяции по соседям на восьми направлениях. Расчёт нового значения делится на несколько этапов, в ходе которых формируется матрица 3×3 (Prog) с прогнозируемыми значениями искомого пикселя. Новое значение пикселя рассчитывается как среднее арифметическое элементов матрицы прогнозов (Prog).

На первом этапе формируется окно 5×5 (рис. 2, а) из пикселей ЦМВ и маски (обозначены красным), в центре окна – текущий корректируемый пиксель.

Далее, на втором этапе, формируются вектора на восьми направлениях, по данным которых будет высчитываться коррекция пикселя (см. рис. 2, б), – каждый вектор окрашен в собственный цвет, чёрные ячейки не участвуют в расчёте. Если на пути вектора попадает пиксель, значение маски которого равно 1, то весь вектор отбрасывается, а его вклад в коррекцию заменяется начальным значением корректируемого пикселя, то же происходит на краю цифровой модели. Полученные вектора используются для вычисления ожидаемого значения корректируемого пикселя.

Третий этап (см. рис. 2, в) – вычисление превышения высот для каждого вектора i : $\Delta h = h_{i,1} - h_{i,2}$, где $h_{i,j}$ – высота элемента вектора, удалённого от корректируемого пикселя на j . Если на втором этапе не был сформирован вектор, то превышение не рассчитывается, пиксели обозначены ярко-оранжевым цветом (см. рис. 2, в). Полученные значения превышений прибавляются к ближайшему соседу корректируемого пикселя, записанному в векторе, так вычисляется прогнозируемое новое значение корректируемого пикселя.

На четвёртом этапе формируется матрица прогнозов корректированных значений (см. рис. 2, г) по правилам, описанным на третьем этапе. Вычисляется среднее арифметическое всех элементов этой матрицы (рис. 3), которое и становится новым значением высоты корректируемого пикселя:

$$\text{Cor}_{(x,y)} = \frac{1}{9} \sum_{i,j=0}^2 \text{Prog}_{(i,j)}.$$

Результаты эксперимента

Работа алгоритма, реализованного в разработанном авторами программном обеспечении, апробирована на ЦМБ ALOS3D30 (дискретность сетки $0,000277778^\circ$, площадь территории около $200\,000\text{ км}^2$, диапазон изменения абсолютных высот от 218 до 7844 м). Опытный участок характеризуется наличием различных типов рельефа, а также почти полным отсутствием сплошной древесной растительности и низкой плотностью населённых пунктов.

Контрольной информацией, используемой для проверки результатов применения к исходной ЦМБ адаптивного алгоритма, стали 4874 пункта ГГС, данные лазерного высотомера КА ICESat – 282 397 ТЛО (рис. 4), а также 2169 пикетов, измеренных по триплету SPOT6 в стереорежиме на возвышенностях и структурных линиях хребтов (рис. 5). Стереоизображение покрывало высокогорный участок выбранного региона.

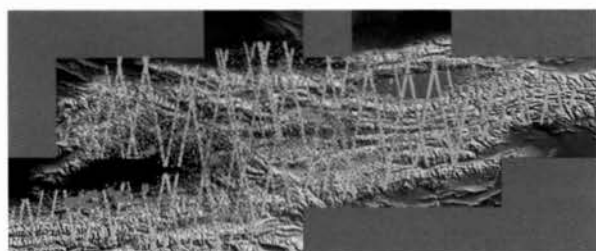


Рис. 4. Покрывание территории района данными высотной основы:
красные точки – пункты ГГС; голубые – данные ICESat

Fig. 4. Reference elevation data coverage:
red dots are State geodetic network points;
blue – ICESat data

Взаимное ориентирование снимков стереопары проводили с применением связующих точек и исходных коэффициентов полиномов (RPC). Среднее квадратическое отклонение (СКО) на связующих точках составило менее 0,5 пикселя. Прежде чем приступить к набору контрольных точек, точность стереомодели проверили по стереоизмерениям на пунктах ГГС, равномерно покрывающих область стерео. Точность определения высот по стереомодели: СКО составило 2,13 м, максимальное значение СКО 4,7 м.

Сравнение исходных высот пунктов ГГС и высот, измеренных на этих пунктах оператором в стереорежиме, характеризуется СКО расхождения высот 2,1 м (максимальное расхождение 4,7 м, систематическая ошибка $-0,4\text{ м}$).

В таблице приведены результаты оценки точности исходной ЦМБ до применения алгоритма коррекции. Под средним квадратическим значением (СКЗ) в данном случае понимается разновидность средней квадратической погрешности, включающая и случайную и систематическую составляющие отклонения высот ЦМБ от эталонных значений. Находили СКЗ по формуле

$$\text{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2}.$$

С учётом систематического сдвига СКО рассчитывали по формуле

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \overline{\Delta h})^2},$$

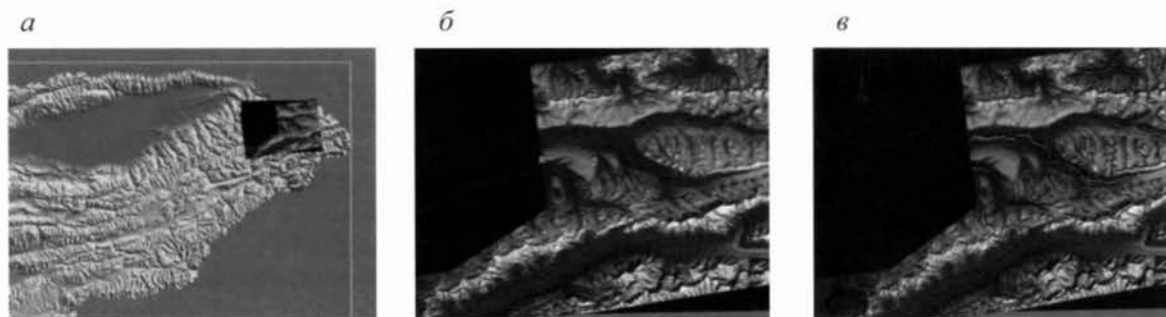


Рис. 5. Контрольные данные, полученные по материалам стереосъёмки:
а – расположение триплета; б – пункты ГГС; в – пикеты по SPOT6

Fig. 5. Reference elevation data derived from satellite stereo imagery:
а – location of the triplet; б – State geodetic network points; в – pickets on SPOT6

Результаты оценки точности исходной ЦМБ по всем видам контрольной информации

Results of source DEM accuracy assessment by all types of reference data

| Показатели | ГГС | ICESat | SPOT6 |
|-----------------------|---------|----------|----------|
| Число точек | 4874 | 282 437 | 2169 |
| СКО, м | 6,266 | 5,693 | 15,985 |
| СКЗ, м | 7,982 | 5,693 | 16,686 |
| Δh , м | 4,945 | -0,001 | 4,784 |
| Отклонение высоты, м: | | | |
| минимальное | -28,703 | -268,752 | -112,582 |
| максимальное | 67,306 | 744,127 | 225,289 |

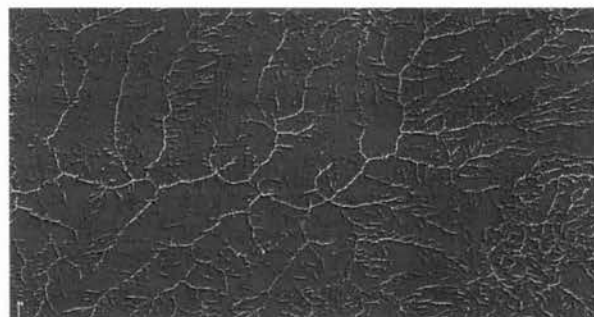


Рис. 6. Результат автоматического поиска хребтов на ЦМБ
Fig. 6. Results of automatic ridge detection on DEM

где Δh – систематическое отклонение по высоте, рассчитанное по формуле

$$\Delta h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i.$$

В рамках эксперимента, изменяя пороговое значение рассчитанного класса от 0 до -8 (см. рис. 1), выполнена оценка точностных параметров всех девяти откорректированных вариантов моделей высот. Результат автоматического поиска хребтов

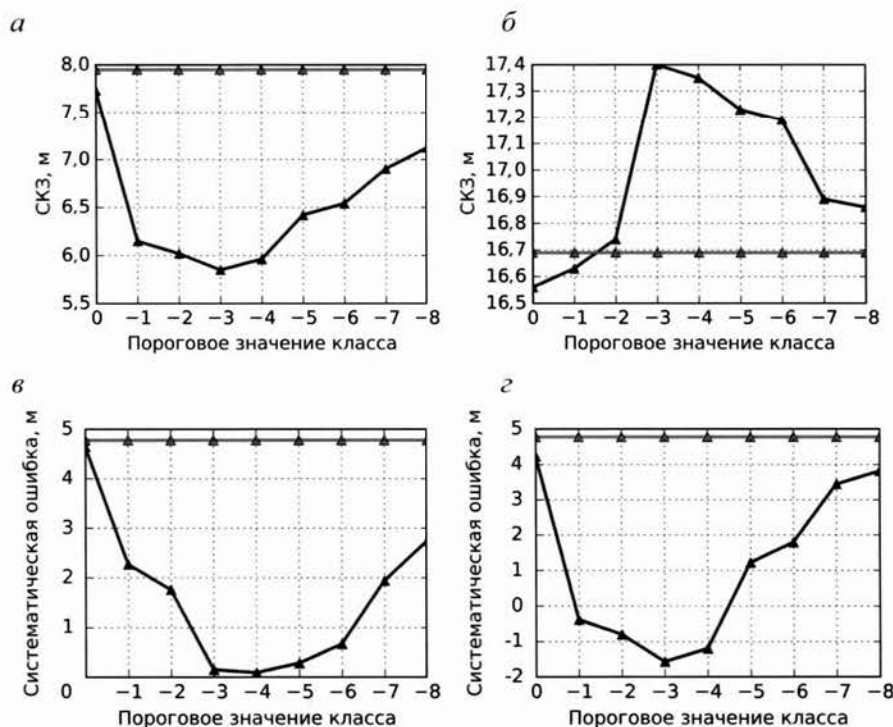


Рис. 7. Зависимость СКЗ и систематической составляющей ошибки определения высот от порогового значения класса:

а, б – СКЗ по порогам классов коррекции соответственно для пунктов ГГС, пикетов по хребтам (SPOT6); в, г – систематическая ошибка по порогам классов коррекции соответственно для пунктов ГГС, пикетов по хребтам (SPOT6)

Fig. 7. Dependence of root mean square value and systematic error from class value threshold:

а, б – Root mean square value for the thresholds of correction classes for State geodetic network points and pickets on ridges (SPOT6) respectively; в, г – the systematic error for the thresholds of correction classes for State geodetic network points and pickets on ridges (SPOT6) respectively

показан на рис. 6. Отклонения СКЗ и систематической составляющей ошибки определения высот от исходных показателей приведены на рис. 7.

Следует отметить, что результаты оценки точности откорректированной модели высот по данным ТЛО ICESat остались почти неизменными в связи с малым числом ТЛО на корректируемых участках, что свидетельствует об аккуратности работы алгоритма (как было упомянуто выше, ТЛО ICESat почти отсутствуют на вершинах хребтов, подвергаемых коррекции).

Полученные результаты показали максимальную эффективность работы алгоритма в диапазоне изменения порогового значения класса от -1 до -4 . Такой вывод сделан по результатам сравнения СКЗ и систематической составляющей ошибки определения высот до и после применения алгоритма.

Для экспериментального участка наиболее удачное пороговое значение корректируемых классов соответствует -2 . Чем ближе пороговое значение класса к -8 , тем меньшая доля пикселей подвергается корректировке. Статистика, характеризующая процесс коррекции для данного условия, выглядит следующим образом: 91 % пикселей не получили изменений; 7,5 % получили коррекцию по высоте от 0 до 5 м; 1 % – от 5 до 10 м. Оставшееся число пикселей (0,5 %) откорректировано в диапазоне, м:

| | |
|----------------|-----------|
| 10 – 30... | 3 019 870 |
| 30 – 51..... | 11 037 |
| 51 – 100..... | 544 |
| 100 – 200..... | 151 |
| 200 – 300..... | 10 |
| 300 – 364..... | 5 |

Выводы

Изначально, перед разработкой алгоритма, авторы ставили задачу привести цифровую модель в область нормального распределения ошибок относительно контрольных данных. Факт улучшения точности определения высот по модели

относительно пунктов ГГС был расценён, скорее, как дополнительный, но не основной положительный эффект от применения математического аппарата коррекции.

Адаптивный подход к разработке математического аппарата коррекции ЦМВ обеспечил возможность его применения на всех диапазонах высот, для любого рельефа. Наибольший эффект от применения разработанного алгоритма наблюдается на высокогорных участках.

Алгоритм позволяет на основании анализа величин коррекции выявлять участки ЦМВ, требующие дополнительной проверки. Он эффективен в местах наличия непосредственных измерений и бесполезен при заполнении пустот данными, заведомо более низкой точности, либо на некачественных фрагментах. Алгоритм адаптивной коррекции даёт эффект, подтверждаемый полностью независимой высотной информацией, равномерно и плотно покрывающей тестируемый район.

По статистике алгоритм коррекции в подавляющем большинстве случаев «вытягивает» идентифицированные пиксели на значения в пределах не более 10–15 м. Аномальные значения отслеживаются по матрице разностей исходной и откорректированной моделей и могут быть исключены.

Побочные эффекты применения алгоритма, выявленные по результатам сравнения со стереоизмерениями (незначительное ухудшение точности относительно пикетов, измеренных в стереорежиме по триплетам SPOT6):

появление в отдельных местах неоправданного роста высот на бровках оврагов (обрывов);

завышение высот на участках, описывающих поверхность объектов местности.

Глобальные ЦМВ в исходном виде содержат данные о высотах объектов местности, не позволяющие считать их «чистым» рельефом. Процесс выделения рельефа кропотлив, и его результат не исключает потерь корректных значений, поэтому указанные побочные эффекты

не оказывают существенного влияния на общую точность корректируемой модели высот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Data Sets*. Standard GLAS Data Products (HDF5). URL: <https://nsidc.org/data/icesat/data.html> (дата обращения: 13.04.2018).

2. Koka S., Anada K., Nakayama Y., Sugita K., Yaku T., Yokoyama R. (2012) A comparison of ridge detection methods for DEM data. Software Engineering, Artificial

Intelligence, Networking and Parallel & Distributed Computing (SNPD). 13th ACIS International Conference on, pp. 513–517.

3. Koka S., Anada K., Nomaki K., Sugita K., Tsuchida K., Yaku T. (2011) Ridge detection with the steepest ascent method. *Procedia Computer Science*, 4, pp. 216–221.

4. Lopez A., Lumbreras F., Serrat J., Villanueva J. J. (1999) Evaluation of methods for ridge and valley detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21, 4, pp. 327–335.

5. *Precise Global Digital 3D Map "ALOS World 3D"* Homepage. URL: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d/index_e.htm (дата обращения: 13.04.2018).

Algorithm of adaptive correction of structural landforms on global digital elevation models

¹ Zhdanov A. Yu., ² Pankin A. V., ³ Rentel A. V.

^{1,3} The Research Institute of Accuracy Devices
127490, Russia, Moscow, Dekabristov st., 51

² Research Center for Earth Operative Monitoring
127490, Russia, Moscow, Dekabristov st., 51, building 25

¹ alexzhdanov1003@gmail.com ² apcrit@yandex.ru ³ progress75@yandex.ru

Due to various factors, such as the interpolation step or automatic correlators specifics, global digital elevation models (DEM) often have an effect of understating the heights, which leads to inaccurate display of structural landforms e.g. ridges. The algorithm of adaptive correction of structural landforms elevation on DEM is proposed in this article. The algorithm consists of two stages. In the first stage, an automatic classification of structural forms is performed based on height difference between neighboring DEM elements. In the second stage, the DEM elements are corrected based on the assigned classes. Adaptivity of the algorithm allows to use it for any kind of terrain and elevation ranges. The algorithm was tested on the global DEM ALOS World 3D (ALOS W3D30); the accuracy was assessed by geodetic reference network and ICESat mission data. The developed algorithm shows an improvement of DEM accuracy, especially in high-altitude areas, and it also helps to reveal areas requiring additional verification.

Automatic ridge detection, DEM correction, digital elevation models.

For citations: Zhdanov A. Yu., Pankin A. V., Rentel A. V. (2018) Algoritm adaptivnoj korrekcii strukturnykh form global'nykh cifrovyykh modelej vysot [Algorithm of adaptive correction of structural landforms on global digital elevation models]. *Geodesy and Cartography = Geodezija i kartografija*, 79, 7, pp. 57–64 (In Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2018-937-7-57-64

REFERENCES

1. *Data Sets*. Standard GLAS Data Products (HDF5). URL: <https://nsidc.org/data/icesat/data.html> (accessed 13.04.2018).

2. Koka S., Anada K., Nakayama Y., Sugita K., Yaku T., Yokoyama R. (2012) A comparison of ridge detection methods for DEM data. Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel & Distributed Computing (SNPD). 13th ACIS International Conference on, pp. 513–517.

3. Koka S., Anada K., Nomaki K., Sugita K., Tsuchida K., Yaku T. (2011) Ridge detection with the steepest ascent method. *Procedia Computer Science*, 4, pp. 216–221.

4. Lopez A., Lumbreras F., Serrat J., Villanueva J. J. (1999) Evaluation of methods for ridge and valley detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21, 4, pp. 327–335.

5. *Precise Global Digital 3D Map "ALOS World 3D"* Homepage. URL: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d/index_e.htm (accessed 13.04.2018).