

## Экспериментальные объединения методики объединения цифровых моделей рельефа с нейтрализацией систематических ошибок разнородных матриц высот

### Experimental combination of techniques for combining digital elevation models with neutralization of systematic errors of heterogeneous elevation matrices

#### **Алексеев / Alekseev V.**

Виктор Федорович

(vka@mil.ru)

доктор технических наук, профессор.  
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ (ВКА им. А. Ф. Можайского), старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела.  
г. Санкт-Петербург

#### **Астапович / Astarovich A.**

Анатолий Владимирович

(vka@mil.ru)

кандидат технических наук, доцент.  
ВКА имени А. Ф. Можайского, доцент кафедры высшей геодезии.  
г. Санкт-Петербург

#### **Ермаков / Ermakov N.**

Николай Николаевич

(vka@mil.ru)

ВКА имени А. Ф. Можайского, адъюнкт научно-исследовательского отдела.  
г. Санкт-Петербург

#### **Жбанов / Zhbanov K.**

Константин Константинович

(vka@mil.ru)

кандидат технических наук.  
ВКА имени А. Ф. Можайского, начальник лаборатории научно-исследовательского отдела.  
г. Санкт-Петербург

#### **Морозов / Morozov E.**

Егор Борисович

(vka@mil.ru)

ВКА имени А. Ф. Можайского, младший научный сотрудник лаборатории научно-исследовательского отдела.  
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли – remote sensing of the Earth; космические лазерные высотомеры – space laser altimeters; матрица высот – height matrix; метод наименьших квадратов – least squares method; оптико-электронная стереосъемка – optoelectronic stereo survey; радиолокационная интерферометрия – radar interferometry; точки лазерного отражения – laser reflection points; цифровая модель рельефа – digital elevation model.

Рассмотрена методика построения цифровых моделей рельефа, основанная на совместной обработке топогеодезической информации, получаемой в результате фотограмметрической обработки оптико-электронных стереоснимков и интерферометрической обработки радиолокационных изображений, а также точек лазерного отражения, полученных по материалам съемки космическими лидарами. Экспериментальная апробация методики подтвердила повышение точности построенных цифровых моделей рельефа.

The technology for constructing digital elevation models is selected, based on the joint processing of topogeodesic information obtained as a result of photogrammetric processing of optical-electronic stereo images and interferometric processing of radar images, as well as laser reflection points obtained from survey materials by space lidars. The results of the experiment on the territory of the Novgorod region confirmed the increase in the number of digital elevation models built using the proposed technology.

## Введение

Выполнение дистанционного зондирования Земли средствами космического базирования позволяет решать задачи картографирования недоступных континентальных районов земного шара. К одной из таких задач относится построение цифровых моделей рельефа (ЦМР).

В результате динамичного развития группировок космических аппаратов картографического назначения на большую часть территорий земного шара накопились космические оптико-электронные стереоснимки и радиолокационные изображения, по которым можно создавать фотограмметрические и интерферометрические ЦМР сопоставимой точности для картографирования территорий.

При совместной обработке таких ЦМР становится возможным повысить точность и достоверность результирующей модели рельефа за счёт привлечения альтернативного набора данных. Понятно, что при решении задачи совместной обработки разнородных моделей рельефа необходимо использовать такой метод построения ЦМР, который бы нивелировал недостатки отдельных методов получения моделей рельефа.

Задачей данной статьи является изложение методики построения ЦМР на основе нейтрализации систематических ошибок разнородных матриц высот по данным космических лазерных высотомеров и описание эксперимента для её проверки.

## Применение метода наименьших квадратов для нейтрализации систематических ошибок разнородных матриц высот

При наличии на район картографирования нескольких независимых ЦМР для получения в узлах регулярной сетки наиболее точного и достоверного значения высот выполняется совместная обработка информации альтернативных моделей рельефа местности. Простое осреднение не учитывает спектры погрешностей данных, а значит, такая совместная обработка результатов будет выполнена не вполне корректно. Наибольший эффект учёта пространственного спектра погрешностей моделей рельефа достигается применением метода наименьших квадратов (МНК) [1].

Обработка данных методом наименьших квадратов основана на минимизации квадратичной формы  $v^T P v$ , где  $v$  – вектор поправок к данным,  $P$  – весовая матрица данных. Поэтому определяющее значение для построения оптимальной модели рельефа имеет процедура установления весовых матриц. Понятно, что веса обратно пропорциональны дисперсиям ошибок совместно обрабатываемых данных. В этой связи задача установления весовой матрицы сводится к сравнению наиболее адекватных действительности

характеристик точности исходных материалов оптико-электронной стереосъёмки и радиолокационной интерферометрии.

Установление весовой матрицы  $P$  должно осуществляться на основе ковариационных матриц  $K^I$  и  $K^{II}$  ошибок двух наборов данных  $H_{1...k}^I$  и  $H_{1...k}^{II}$ .

Высоты точек местности  $H_{1...k}^I$  и  $H_{1...k}^{II}$  в узлах регулярной сетки представляют собой дискретные значения функций непересекающихся параметров моделей поверхности картографируемой территории. По этой причине весовая матрица высот будет иметь блочно-диагональный вид

$$P = \begin{bmatrix} (K^I)^{-1} & O \\ O & (K^{II})^{-1} \end{bmatrix},$$

где  $O$  – нулевая матрица,  $K^I = K_{\Delta}^I + K_{g^I}^I$ ,  $K^{II} = K_{\Delta}^{II} + K_{g^II}^{II}$ .

Ковариационные матрицы  $K_{\Delta}^I$  и  $K_{\Delta}^{II}$  могут быть получены в процессе построения математических моделей по материалам оптико-электронной стереосъёмки и радиолокационной интерферометрии. Ковариационные матрицы  $K_{g^I}^I$  и  $K_{g^II}^{II}$  характеризуют систематические ошибки высот в узлах регулярной сетки, которые обусловлены несовпадением начала счёта высот используемых моделей и фактической поверхности картографируемой территории.

Можно показать, что структура матриц  $K_{g^I}^I$  и  $K_{g^II}^{II}$  имеет вид

$$K_{g^I}^I = \delta^{I^2} \Pi^T,$$

$$K_{g^II}^{II} = \delta^{II^2} \Pi^T,$$

где  $\delta^I$  и  $\delta^{II}$  – параметры, характеризующие погрешности задания начала счёта высот в моделях  $I$  и  $II$  соответственно.

Таким образом, для назначения весовых матриц наборов данных  $H_{1...k}^I$  и  $H_{1...k}^{II}$  должны использоваться ковариационные матрицы

$$K^I = K_{\Delta}^I + \delta^{I^2} \Pi^T,$$

$$K^{II} = K_{\Delta}^{II} + \delta^{II^2} \Pi^T.$$

Совместная обработка наборов данных  $H_{1...k}^I$  и  $H_{1...k}^{II}$  состоит в решении методом наименьших квадратов системы параметрических уравнений поправок

$$v = B \tau + l, \tag{1}$$

где  $B = \begin{bmatrix} E_k \\ E_k \end{bmatrix}$  – матрица коэффициентов,  $E_k$  – единичная матрица порядка  $k$ ,  $\tau$  – вектор поправок к приближённым значениям высот в узлах регулярной сетки,  $l$  – вектор свободных членов, равный разности между приближёнными значениями высот в узлах регу-

лярной сетки и значениями высот частных моделей рельефа в соответствующих узлах.

$$l = \begin{bmatrix} H_{1...k}^0 - H_{1...k}^I \\ H_{1...k}^0 - H_{1...k}^{II} \end{bmatrix},$$

где  $H_{1...k}^0$  – приближённые значения высот.

Минимизация квадратичной формы  $v^T P v$  приводит к системе нормальных уравнений

$$B^T P B \tau + B^T P l = 0,$$

из решения которой находят поправки  $\tau$

$$\tau = -(B^T P B)^{-1} B^T P l,$$

для объединения математических моделей рельефа

$$H_{1...k} = H_{1...k}^0 + \tau.$$

Поскольку в наборах данных  $H_{1...k}^I$  и  $H_{1...k}^{II}$  присутствуют систематические ошибки  $\vartheta_H^I$  и  $\vartheta_H^{II}$ , то свободные члены  $l$  будут подвержены систематическому влиянию и, как следствие, поправки  $\tau$  будут искажены на величину [2]

$$\vartheta_\tau = -(B^T P B)^{-1} B^T P \vartheta_H,$$

где  $\vartheta_H = \begin{bmatrix} 1\delta^I \\ 1\delta^{II} \end{bmatrix}$  – составной вектор систематических ошибок высот в узлах регулярной сетки моделей рельефа.

Если систематические ошибки в наборах данных  $H_{1...k}^I$  и  $H_{1...k}^{II}$  не равны между собой, то их влияние на поправку  $\tau$  в некоторой степени компенсируется.

Оценить величину погрешности задания начала счёта высот  $\delta^I$  и  $\delta^{II}$  в моделях  $I$  и  $II$  без привлечения дополнительной информации не представляется возможным, поэтому ковариационные матрицы  $K^I$  и  $K^{II}$ , на основе которых должна определяться весовая матрица, могут быть получены только приближённо, что будет оказывать дополнительное влияние на решение уравнений (1).

Для исключения влияния систематических ошибок методом наименьших квадратов оцениваются отметки средних горизонтов в объединяемых моделях рельефа

$$\overline{H^I} = \frac{\sum_i^k ([P^I]_i \cdot H_i^I)}{\sum_i^k [P^I]_i}, \quad \overline{H^{II}} = \frac{\sum_i^k ([P^{II}]_i \cdot H_i^{II})}{\sum_i^k [P^{II}]_i}, \quad (2)$$

где  $[P^I]_i$ ,  $[P^{II}]_i$  – суммы элементов  $i$ -го столбца в весовых матрицах  $P^I = (K_\Delta^I)^{-1}$  и  $P^{II} = (K_\Delta^{II})^{-1}$  соответственно.

Если из  $H_{1...k}^I$  и  $H_{1...k}^{II}$  вычесть соответственно  $\overline{H^I}$  и  $\overline{H^{II}}$ , то в редуцированных данных  $\Delta H_{1...k}^I = H_{1...k}^I - \overline{H^I}$  и  $\Delta H_{1...k}^{II} = H_{1...k}^{II} - \overline{H^{II}}$  систематических ошибок, обусловленных началом счёта высот, не будет.

Примем в параметрических уравнениях (1) вектор свободных членов равным

$$l = \begin{bmatrix} \Delta H_{1...k}^I \\ \Delta H_{1...k}^{II} \end{bmatrix}.$$

Тогда

$$\tau = -(B^T \overline{P} B)^{-1} B^T \overline{P} l, \quad (3)$$

где  $\overline{P} = \begin{bmatrix} P^I & O \\ O & P^{II} \end{bmatrix}$  – весовая матрица редуцированного набора данных  $\Delta H_{1...k}^I$ ,  $\Delta H_{1...k}^{II}$ .

Систематические ошибки, которые обусловлены началом счёта высот, не оказывают влияния на решение (3). Полученный таким образом вектор  $\tau$  определяет поверхность модели рельефа местности относительно условного начала счёта высот.

Оценка МНК условного нуля полученной поверхности рельефа в системе высот принятой для картографирования территории равна

$$\overline{H}_0 = \frac{\sum_i^k ([P^I]_i \cdot H_i^I + [P^{II}]_i \cdot H_i^{II})}{\sum_i^k ([P^I]_i + [P^{II}]_i)}. \quad (4)$$

Тогда объединённая ЦМР в узлах регулярной сетки будет задаваться высотами

$$H_{1...k} = \overline{H}_0 + \tau_{1...k}.$$

Стохастические свойства данных  $H_{1...k}^I$  и  $H_{1...k}^{II}$  при создании ЦМР обычно задаются средними квадратическими ошибками. В этом случае решение (3) будет приближённым, поскольку в весовых матрицах  $P^I$  и  $P^{II}$  информации о корреляции ошибок данных  $H_{1...k}^I$  и  $H_{1...k}^{II}$  нет.

Если в решении (3) выразить  $\overline{P}$  с учетом обратной суммы матриц [3] в виде

$$\overline{P} = (D_\Delta + \Delta_K)^{-1} = D_\Delta^{-1} - (E_{2k} + D_\Delta^{-1} \Delta_K)^{-1} D_\Delta^{-1} \Delta_K D_\Delta^{-1} = \tilde{P} - \Delta_{\tilde{P}},$$

где  $D_\Delta = \begin{bmatrix} D_\Delta^I & O \\ O & D_\Delta^{II} \end{bmatrix}$  – диагональная матрица, элементами которой являются дисперсии ошибок  $H_{1...k}^I$  и  $H_{1...k}^{II}$ ;

и  $\Delta_K = \begin{bmatrix} K_\Delta^I - D_\Delta^I & O \\ O & K_\Delta^{II} - D_\Delta^{II} \end{bmatrix}$ ;  $\tilde{P} = D_\Delta^{-1}$  – приближённая весовая матрица;  $O$  – нулевая матрица;  $\Delta_{\tilde{P}} = \tilde{P} - \overline{P} = (E_{2k} + D_\Delta^{-1} \Delta_K)^{-1} D_\Delta^{-1} \Delta_K D_\Delta^{-1}$  ( $E_{2k}$  – единичная матрица порядка  $2k$ ), то влияние приближённой весовой матрицы на вектор  $\tau$  можно представить в виде

$$\tau = \tilde{\tau} + \Delta_\tau + \delta_\tau + \varepsilon_\tau \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{\tau} &= -\tilde{N}^{-1} B^T \tilde{P} l; \\ \Delta_{\bar{\tau}} &= -\Delta_{N^{-1}} B^T \tilde{P} l; \quad \delta_{\bar{\tau}} = \tilde{N}^{-1} B^T \Delta_{\tilde{P}} l; \\ \varepsilon_{\bar{\tau}} &= \Delta_{N^{-1}} B^T \Delta_{\tilde{P}} l; \quad \tilde{N} = B^T \tilde{P} B; \\ \Delta_{N^{-1}} &= (E_k - \tilde{N}^{-1} \Delta_N)^{-1} \tilde{N}^{-1} \Delta_N \tilde{N}^{-1}; \quad \Delta_N = B^T \Delta_{\tilde{P}} B. \end{aligned}$$

Формула (5) позволяет, при невозможности получения в полном объёме ковариационных матриц  $K_{\Delta}^I$  и  $K_{\Delta}^{II}$ , обосновать применение приближённой весовой матрицы для решения поставленной задачи.

Для уточнения отметки условного нуля ЦМР необходимо иметь независимые значения высот точек местности картографируемой территории. Необходимые данные для коррекции ЦМР могут быть получены космическими лазерными высотомерами, которые позволяют измерять высоту с точностью единиц дециметров [4]. До недавнего времени обеспечивать измерения рельефа данными космического лазерного высотомера могла космическая миссия ICESAT, находившаяся на орбите Земли в течении 7 лет, с 2003 по 2010 годы [5]. Хотя основной задачей ICESAT являлось изучение атмосферы и движения ледников, за долгую службу аппарата имелись случаи использования результатов его работы в целях изучения рельефа местности [6]. Результаты исследований показали, что высокоточный космический лазерный высотомер может успешно использоваться в качестве одного из подходов по коррекции ЦМР.

Такой подход основан на объединении независимых цифровых моделей рельефа и включает следующие этапы:

1. Подбор исходных данных.
2. Формирование весовой матрицы.
3. Компенсация систематических ошибок в исходных данных.
4. Построение цифровой модели поверхности рельефа местности.
5. Оценка ошибок цифровой модели рельефа.
6. Исключение систематических ошибок в объединённой цифровой модели рельефа.

Исходными данными для реализации методики являются район построения ЦМР, наборы данных о рельефе местности в узлах интерполяционных сеток, стохастические характеристики их ошибок, а также ограниченный массив контрольных точек.

Границы прямоугольной области  $R$  района построения ЦМР определяются номенклатурой создаваемой топографической карты.

Наборы данных о рельефе картографируемой территории должны быть получены различными методами с примерно одинаковой точностью. Требования к данным и допустимая дискретность узловых точек обоснованы в [7].

Наборы данных о рельефе и массив контрольных точек должны быть представлены в идентичных системах координат и высот.

Для формирования весовой матрицы используются числовые характеристики стохастических свойств ошибок данных о рельефе в узлах интерполяционной сетки. Весовая матрица представляется в виде

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} (K_{\Delta}^I)^{-1} & O \\ O & (K_{\Delta}^{II})^{-1} \end{bmatrix}.$$

Если стохастические свойства ошибок данных  $H_{1..k}^I$  и  $H_{1..k}^{II}$  задаются дисперсиями, то для объединения независимых моделей рельефа используется приближённая весовая матрица

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} (D_{\Delta}^I)^{-1} & O \\ O & (D_{\Delta}^{II})^{-1} \end{bmatrix}.$$

Для исключения влияния систематических ошибок по формуле (2) вычисляются отметки средних горизонтов в объединяемых моделях рельефа. Если используется приближённая весовая матрица, то

$$\bar{H}^I = \frac{\sum_i (p_i^I \cdot H_i^I)}{\sum_i p_i^I}, \quad \bar{H}^{II} = \frac{\sum_i (p_i^{II} \cdot H_i^{II})}{\sum_i p_i^{II}},$$

где  $p_i^I$  и  $p_i^{II}$  – соответствующие веса отметок рельефа в узлах интерполяционной сетки.

Затем из данных  $H_{1..k}^I$  и  $H_{1..k}^{II}$  исключается систематическая ошибка, обусловленная началом счёта высот

$$\Delta H_{1..k}^I = \Delta H_{1..k}^I - \bar{H}^I,$$

$$\Delta H_{1..k}^{II} = \Delta H_{1..k}^{II} - \bar{H}^{II}.$$

Поверхность рельефа картографируемой территории по данным  $\Delta H_{1..k}^I$  и  $\Delta H_{1..k}^{II}$  определяется вектором (3).

Отметка условного нуля в требуемой для картографирования системе высот вычисляется по формуле (4). Для случая использования приближённой весовой матрицы будем иметь

$$\bar{H}_0 = \frac{\sum_i (p_i^I \cdot H_i^I + p_i^{II} \cdot H_i^{II})}{\sum_i (p_i^I + p_i^{II})}.$$

Отметки в узлах регулярной сетки объединённой ЦМР равны

$$H_{1..k} = \bar{H}_0 + \tau_{1..k}.$$

Для оценки ошибок ЦМР на недоступную территорию может использоваться ограниченный массив точек лазерного отражения, полученных с помощью

космических лидаров. По объединённой ЦМР выполняется интерполирование высот в точках лазерного отражения и вычисляются отклонения (ошибки) полученных результатов  $H_{1...S}$  от данных лидаров  $T_{1...S}$ .

$$\theta_{1...S} = H_{1...S} - T_{1...S}.$$

Систематическая составляющая ошибки объединённой ЦМР оценивается по формуле

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^S \theta_i}{S}. \quad (6)$$

Случайная составляющая ошибки объединённой ЦМР равна

$$m_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^S (\theta_i - \delta)^2}{S-1}}. \quad (7)$$

Вычитая из  $H_{1...k}$  систематическую составляющую  $\delta$ , получим исправленную ЦМР

$$\overline{H}_{1...k} = H_{1...k} - \delta.$$

### Экспериментальная часть

Практическое подтверждение разработанных теоретических положений выполнено в ходе экспериментальных исследований, целью которых была оценка точности предлагаемой методики объединения ЦМР относительно натурных измерений высот точек рельефа. Экспериментальные исследования выполнялись на территории Новгородской области.

На первом этапе эксперимента осуществлён выбор профиля местности, обладающего выраженным рельефом и не имеющего на своей протяжённости растительности, а также промышленных и социальных объектов. Такие требования к профилю обусловлены необходимостью максимально объективной оценки полученных результатов. Вид профиля местности представлен на рис. 1.

Статистические характеристики профиля местности представлены в таблице 1.

Представленные статистические характеристики профиля позволяют отнести его к холмистой местности.

На выбранном профиле с помощью спутниковой геодезической аппаратуры South Galaxy G1 Plus в режиме RTK выполнено определение пространственного положения 435 эталонных точек, равномерно расположенных по всему профилю на расстоянии в среднем 30 м друг от друга.

Определение эталонных точек выполнялось дважды от разных базовых станций. Первое определение точек выполнялось с использованием глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou. Средняя квадратическая погрешность определения высот точек составила не более 5 см – эти точки использовались в качестве эталонных для оценки точности ЦМР. Второе определение точек выполнялось с использованием глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Средняя квадратическая погрешность определения высот точек составила приблизительно 10 см – эти точки использовались как имитация точек лазерного отражения по причине отсутствия реальных измерительных данных.

Затем на район экспериментальных исследований были подобраны три общедоступных ЦМР (SRTM, Copernicus, AW3D30) и выполнена оценка их точности относительно 435 эталонных точек.

ЦМР SRTM (Shuttle radar topographic mission) создавалась по материалам радиолокационной интерферометрической съёмки с космического корабля Shuttle, выполненной в феврале 2000 года. В миссии SRTM использовались два радиолокационных сенсора, работающих с разными длинами волн: система С-диапазона (5,6 см, С-RADAR) и система X-диапазона (3,1 см, X-RADAR). Радары были разработаны для выполнения однопроходной интерферометрической съёмки, для чего каждый из радаров был оборудован дополнительной приёмной антенной, которые были размещены на выдвижной 60-метровой штанге.

ЦМР Copernicus создавалась по данным с радиолокационных космических аппаратов TanDEM-X и TerraSAR-X в синхронном режиме однопроходной интерферометрической съёмки. Сбор данных продол-

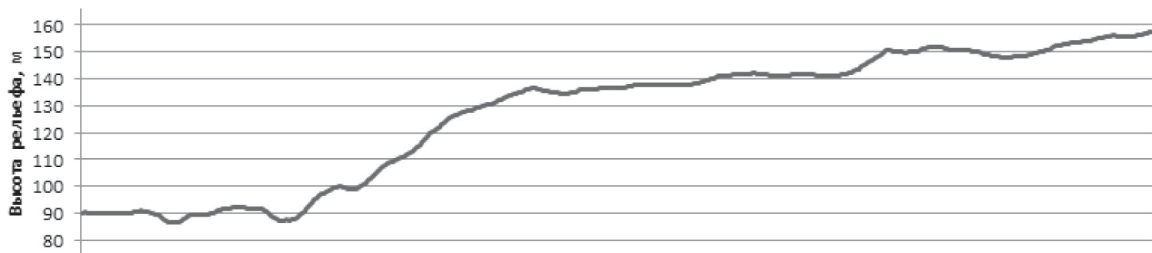


Рис. 1. Профиль выбранного участка местности

жался с декабря 2010 года по середину 2014 года. Обработка данных началась в декабре 2013 года и продолжалась до середины 2016 года. По завершении всех процессов обработки была создана ЦМР WorldDEM, которая распространялась на коммерческой основе. ЦМР Copernicus DEM представляет собой дальнейшее развитие модели WorldDEM. По сравнению с WorldDEM в модели Copernicus выполнено более тщательное редактирование сцен, которым присущи ошибки радиолокационного метода. В частности, убраны пропуски, отредактированы артефакты и береговая линия, уточнены высоты карьеров, горных вершин, озёр, рек, островов, взлётно-посадочных полос и т. п.

Для создания ЦМР AW3D30 были использованы снимки, полученные с помощью оптико-электронной съёмочной системы PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping), установленной на спутнике ALOS (Advanced Land Observing Satellite), который работал с 2006 по 2011 год. Инструмент PRISM состоял из трёх панхроматических радиометров, которые позволяли одновременно выполнять конвергентную стереосъёмку вдоль маршрута и съёмку в надир.

Из краткой характеристики представленных ЦМР понятно, что они получены различными методами и взаимная корреляция их ошибок отсутствует. Пространственное разрешение всех трёх моделей составляет 1 угл. сек.  $\approx 30$  м, этим фактом и объясняется выбор расстояния между эталонными точками в 30 м. Оценка точности ЦМР выполнялась по формулам (6) и (7). Результаты оценки точности моделей SRTM, Copernicus и AW3D30 представлены в таблице 2.

Оценка точности моделей показала оптимистичные результаты. Полученная СКО ЦМР оказалась в 2–3 раза лучше относительно заявленных производителей характеристик. Этот факт объясняется удачным расположением оцениваемого участка вследствие отсутствия на нём объектов, не относящихся к земной поверхности. Лучшими точностными характеристиками для оцениваемого участка обладает ЦМР Copernicus. Модель SRTM имеет ярко выраженный систематический сдвиг. Однако в целом оцениваемые ЦМР обладают сопоставимым уровнем случайной составляющей  $m_{\Delta}$  и поэтому их совместная обработка целесообразна.

На втором этапе эксперимента выполнена совместная обработка исходных ЦМР с оценкой точности полу-

Таблица 1

**Статистические характеристики выбранного профиля местности**

Характеристика	Значение
Протяжённость, м	$\approx 13000$
Максимальная высота, м	157,3
Минимальная высота, м	86,4
Перепад высот, м	70,9
Дисперсия, м <sup>2</sup>	571

Таблица 2

**Результаты оценки точности исходных ЦМР SRTM, Copernicus и AW3D30**

Параметры	ЦМР		
	SRTM	Copernicus	AW3D30
Систематическая составляющая ошибок ЦМР $\delta$ (м)	-0,76	-0,19	+0,17
Случайная составляющая ошибок ЦМР $m_{\Delta}$ (м)	1,18	0,94	1,31
Точность ЦМР $m_H = \sqrt{m_{\Delta}^2 + \delta^2}$ (м)	1,40	0,96	1,32

ченных совместных ЦМР. Результаты оценки точности представлены в таблице 3.

Различные комбинации исходных данных позволили получить следующие варианты обработки совместных ЦМР:

1) совместная ЦМР по результатам обработки исходных моделей SRTM и Copernicus (табличное обозначение – «S-C»);

2) совместная ЦМР по результатам обработки исходных моделей SRTM и AW3D30 (табличное обозначение – «S-A»);

3) совместная ЦМР по результатам обработки исходных моделей Copernicus и AW3D30 (табличное обозначение – «C-A»);

4) совместная ЦМР по результатам обработки исходных моделей SRTM, Copernicus и AW3D30 (табличное обозначение – «S-C-A»).

Совместная обработка всех ЦМР осуществлялась по приведенной выше методике. Оценка точности полученных результатов выполнялась по разным вариантам дискретности контрольных точек: 2Δ, 3Δ, 4Δ, 5Δ, 6Δ (≈ 60, 90, 120, 150, 180 м). Графическая интерпретация оценки точности различных вариантов совместной обработки исходных ЦМР представлена на рис. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 3 и на рис. 2, позволяет заключить, что:

1) ЦМР, полученные по результатам совместной обработки, точнее исходных ЦМР как минимум на 5–7 %;

2) точность совместных ЦМР зависит от точности исходных моделей – чем выше точность исходных ЦМР, тем выше точность совместных ЦМР;

3) точность совместных ЦМР зависит от количества исходных моделей – использование трёх исходных ЦМР вместо двух позволило повысить точность совместной ЦМР на 10 %;

4) систематические ошибки в объединённой ЦМР надёжно оцениваются по ограниченному числу контрольных точек (табл. 4).

Полученные результаты доказывают, что даже минимальное количество точек лазерного отражения позволяет надёжно определить значение систематической ошибки, а значит, появляется возможность её исключения.

Компенсация систематической ошибки позволила повысить точность ЦМР SRTM на 16 %.

### Заключение

Предложенная методика построения ЦМР позволяет повысить точность построения ЦМР за счёт привлечения архивных ЦМР различной физической природы, а также измерений космических лазерных высотомеров.

Таблица 3

Результаты оценки точности различных вариантов совместной обработки исходных ЦМР

ЦМР	Параметр	Варианты совместной обработки				
		2Δ	3Δ	4Δ	5Δ	6Δ
		Знач.	Знач.	Знач.	Знач.	Знач.
S-C	$\delta$ (м)	-0,34	-0,34	-0,31	-0,39	-0,36
	$m_{\Delta}$ (м)	0,74	0,76	0,81	0,81	0,84
	$m_H = \sqrt{m_{\Delta}^2 + \delta^2}$ (м)	0,81	0,83	0,87	0,90	0,92
S-A	$\delta$ (м)	-0,21	-0,19	-0,20	-0,21	-0,26
	$m_{\Delta}$ (м)	0,78	0,83	0,86	0,87	0,93
	$m_H = \sqrt{m_{\Delta}^2 + \delta^2}$ (м)	0,81	0,85	0,88	0,89	0,97
C-A	$\delta$ (м)	-0,03	-0,01	+0,01	0,00	0,00
	$m_{\Delta}$ (м)	0,74	0,79	0,84	0,85	0,90
	$m_H = \sqrt{m_{\Delta}^2 + \delta^2}$ (м)	0,74	0,79	0,84	0,85	0,90
S-C-A	$\delta$ (м)	-0,16	-0,14	-0,11	-0,18	-0,16
	$m_{\Delta}$ (м)	0,59	0,65	0,71	0,72	0,80
	$m_H = \sqrt{m_{\Delta}^2 + \delta^2}$ (м)	0,61	0,67	0,72	0,75	0,82

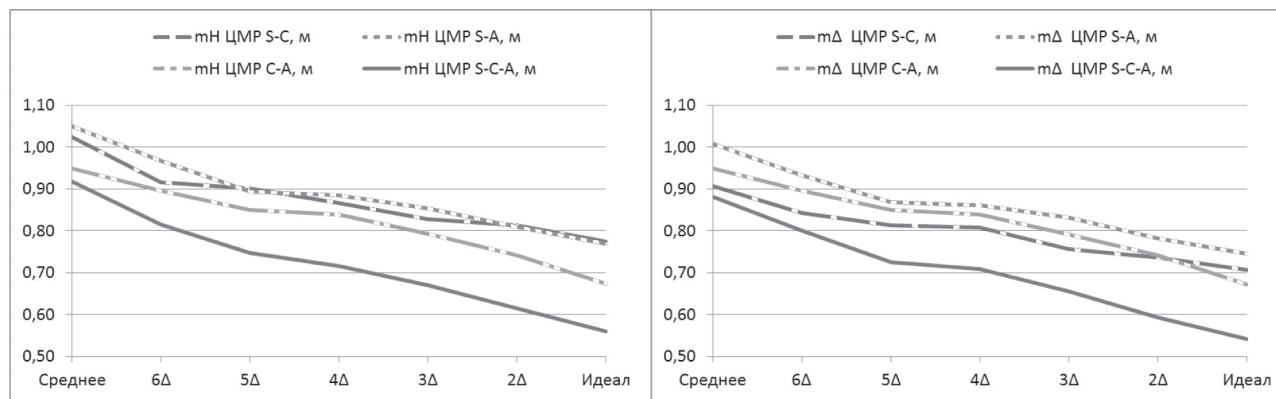


Рис. 2. Результаты оценки точности различных вариантов совместной обработки исходных ЦМР

Таблица 4

Оценки систематических ошибок объединённых ЦМР

ЦМР	Параметр	Дискретность контрольных точек				
		2Δ	3Δ	4Δ	5Δ	6Δ
		Знач.	Знач.	Знач.	Знач.	Знач.
S-C	$\delta$ (м)	-0,34	-0,34	-0,31	-0,39	-0,36
S-A	$\delta$ (м)	-0,21	-0,19	-0,20	-0,21	-0,26
C-A	$\delta$ (м)	-0,03	-0,01	+0,01	0,00	0,00
S-C-A	$\delta$ (м)	-0,16	-0,14	-0,11	-0,18	-0,16

Отличительной особенностью данной методики является использование значений высот точек лазерного отражения, которые могут быть получены с помощью космических лидаров. Значения высот точек лазерного отражения предлагается использовать для оценки точности и компенсации систематических ошибок фотограмметрических и интерферометрических ЦМР.

Данная методика применима для совместной обработки двух и более ЦМР сопоставимой точности, полученных со средств ДЗЗ космического и/или воздушного базирования, с произвольным сочетанием методов съёмки (оптико-электронная стереосъёмка, радиолокационная интерферометрия). Обязательным условием для исключения остаточной систематической ошибки в объединённой ЦМР является наличие измерений с космического лазерного высотомера.

К сожалению, отечественные лазерные космические высотомерные комплексы находятся в стадии разработки. Однако при совместной обработке ЦМР предложенным способом для доступных территорий

возможно использовать иные высотные отметки, например, пункты государственной геодезической сети или съёмочные точки.

Экспериментальные исследования выявили повышение точности построения ЦМР с помощью предлагаемой методики до 24 %. Повышение точности достигнуто за счёт объединения имеющихся в наличии архивных данных.

Таким образом, предлагаемая методика может быть полезна для решения прикладных задач.

Литература

1. Модель рельефа недоступной территории, построенная по результатам комплексирования разнородной спутниковой информации / А.В. Астапович, К.К. Жбанов, Д.О. Медяников, А.И. Яковлев // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 677. – С. 75–83.
2. Маркузе, Ю. И. Алгоритмы для уравнивания геодезических сетей на ЭВМ / Ю.И. Маркузе. – Москва : Недра, 1989. – 248 с.