

УДК 528.7; 528.711.1

КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, АЭРОФОТОСЪЕМКА И ФОТОГРАММЕТРИЯ

МЕТОД ОРТОТРАНСФОРМИРОВАНИЯ ПО РЕГУЛЯРНОЙ СЕТКЕ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ, ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОТОРЫХ ПРЕДСТАВЛЕНА В ВИДЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДРОБНО РАЦИОНАЛЬНОГО МНОГОЧЛЕНА

Профессор, доктор техн. наук **А.Г. Чибуничев**, соискатель **А.В. Солюшкин**
Московский государственный университет геодезии и картографии
agchib@mail.ru; a.sonyushkin@scanex.ru

Аннотация. Предложен оригинальный метод ортотрансформирования космической сканерной съемки высокого разрешения, основанный на алгоритмах построения регулярной сетки трансформирования по коэффициентам обратной дробно-рациональной функции (RPC), а также топологической коррекции узлов сетки трансформирования в «мертвых зонах». По результатам проведенной оценки установлено, что предложенный метод аппроксимирует исходную геометрическую модель с субпиксельной точностью.

Ключевые слова: космическая съемка, автоматизированная обработка, ортофотоплан, ортотрансформирование, RPC

Abstract. An original method is proposed for orthorectification of VHR satellite imagery based on algorithms for computing regular transformation grid using the inverse rational function coefficients (RPC), as well as correction of topology of the grid nodes in the occluded zones. According to evaluation results, the proposed method approximates the original geometric model with sub-pixel accuracy.

Keywords: space imaging, automated processing, orthophoto, ortho-transformation, RPC

Введение. Ортотрансформирование по регулярной сетке является часто используемым приемом при обработке космических снимков. Так, для некоторых типов данных ДЗЗ (ASTER, MODIS, RADARSAT-1 и др.), в качестве геометрической модели в составе служебной информации предоставляется предрасчитанная сетка широт и долгот соответствующих пиксельным координатам изображения, взятым с некоторым регулярным шагом, которая затем может быть использована при преобразовании снимка в требуемую систему координат. Подобный прием применяется в программном обеспечении для увеличения скорости обработки за счет сокращения количества вычислений, при этом координаты пикселей, лежащих в узлах сетки, используются непосредственно, а значения координат, лежащих между узлами сетки, интерполируются, как правило линейно. Кроме того, использование регулярной сетки актуально при интерактивной обработке снимков, когда

трансформирование происходит в режиме реального времени непосредственно на экране компьютера без этапа формирования нового изображения, что, в свою очередь, позволяет сохранить фотометрические характеристики исходного изображения, являющиеся наиболее критическим фактором при автоматизированном дешифрировании.

Построение регулярной сетки трансформирования с использованием коэффициентов RFM-модели. В случае если для описания геометрической модели снимка используются элементы внешнего и внутреннего ориентирования, для вычисления узлов сетки решается прямая задача путем восстановления связки проецирующих лучей с некоторым определенным шагом вдоль и поперек направления сканирования. Так же задача решается прямым методом, если геометрическая модель снимка описывается обратной (Inverse) дробно-рациональной функцией [1], предрасчи-

танные коэффициенты которой позволяют при заданной высоте местности h получить координаты объекта (φ, λ) по координатам снимка (x, y) . Однако на практике, особенно в случае данных сверхвысокого пространственного разрешения, элементы внешнего и внутреннего ориентирования конечному пользователю не предоставляются, а геометрическая модель снимка описывается прямой (Forward) дробно-рациональной функцией (RPC), коэффициенты которой позволяют получить координаты снимка (x, y) по известным координатам объекта (φ, λ) и высоте местности h . Таким образом, задача сводится к получению координат объекта (φ, λ) соответствующих координатам снимка (x, y) , взятым с некоторым регулярным шагом. Для решения задачи необходимо иметь коэффициенты RPC, цифровую модель рельефа и начальное приближение широты и долготы в узлах сетки, которое, в случае если снимок уже трансформирован (например, стандартные продукты компании DigitalGlobe уровня обработки OrthoReady Standard), может быть найдено относительно координаты верхнего левого угла изображения либо при трансформировании на среднюю высоту местности по имеющимся коэффициентам RPC. Тогда решение задачи математически можно записать следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} x &= p(\varphi, \lambda, h); \\ y &= r(\varphi, \lambda, h); \\ h &= H(\varphi, \lambda), \end{aligned}$$

где φ, λ, h — геодезические широта, долгота и высота на эллипсоиде WGS84; x, y — координаты снимка; p, r — денормализованная дробная рациональная функция; H — значение высоты местности h по широте и долготе в системе координат объекта.

Пусть имеются начальные долгота, широта и высота $\varphi_0, \lambda_0, h_0$, для которых вычислены строка и столбец y_0, x_0 , в то время как координаты узлов сетки равны x_{GGT}, y_{GGT} . Нам нужно найти такие поправки для φ_0, λ_0 , равные $\Delta\varphi, \Delta\lambda$, что

$$\begin{aligned} x_{GGT} &= p(\varphi_0 + \Delta\varphi, \lambda_0 + \Delta\lambda, H(\varphi_0 + \Delta\varphi, \lambda_0 + \Delta\lambda)); \\ y_{GGT} &= r(\varphi_0 + \Delta\varphi, \lambda_0 + \Delta\lambda, H(\varphi_0 + \Delta\varphi, \lambda_0 + \Delta\lambda)). \end{aligned}$$

Используя разложение первого порядка в окрестностях точки $\varphi_0, \lambda_0, h_0$, получаем

$$\begin{aligned} x_{GGT} &\approx x_0 + \frac{dp}{d\varphi} \Delta\varphi + \frac{dp}{d\lambda} \Delta\lambda + \frac{dp}{dh} \Delta h(\Delta\varphi, \Delta\lambda); \\ y_{GGT} &\approx y_0 + \frac{dr}{d\varphi} \Delta\varphi + \frac{dr}{d\lambda} \Delta\lambda + \frac{dr}{dh} \Delta h(\Delta\varphi, \Delta\lambda); \\ \Delta h(\Delta\varphi, \Delta\lambda) &\approx \frac{dh}{d\varphi} \Delta\varphi + \frac{dh}{d\lambda} \Delta\lambda. \end{aligned}$$

Поправки $\Delta h(\Delta\varphi, \Delta\lambda)$ вычисляются по цифровой модели рельефа. В итоге уравнения принимают вид

$$\begin{aligned} x_{GGT} &\approx x_0 + \left(\frac{dp}{d\varphi} + \frac{dp}{dh} \frac{dh}{d\varphi} \right) \Delta\varphi + \left(\frac{dp}{d\lambda} + \frac{dp}{dh} \frac{dh}{d\lambda} \right) \Delta\lambda; \\ y_{GGT} &\approx y_0 + \left(\frac{dr}{d\varphi} + \frac{dr}{dh} \frac{dh}{d\varphi} \right) \Delta\varphi + \left(\frac{dr}{d\lambda} + \frac{dr}{dh} \frac{dh}{d\lambda} \right) \Delta\lambda. \end{aligned}$$

Значения производных от $p(\varphi, \lambda, h), r(\varphi, \lambda, h)$ вычисляются аналитически, а значения производных $\frac{dh}{d\varphi}, \frac{dh}{d\lambda}$ — численно, по модели рельефа. Для этого используется двухточечная аппроксимация, основанная на численном вычислении проекции и получении высот из модели рельефа линейной аппроксимацией. При наличии всех производных поиск поправок сводится к решению системы линейных уравнений относительно $\Delta\varphi, \Delta\lambda$:

$$\begin{cases} \left(\frac{dp}{d\varphi} + \frac{dp}{dh} \frac{dh}{d\varphi} \right) \Delta\varphi + \left(\frac{dp}{d\lambda} + \frac{dp}{dh} \frac{dh}{d\lambda} \right) \Delta\lambda = x_{GGT} - x_0; \\ \left(\frac{dr}{d\varphi} + \frac{dr}{dh} \frac{dh}{d\varphi} \right) \Delta\varphi + \left(\frac{dr}{d\lambda} + \frac{dr}{dh} \frac{dh}{d\lambda} \right) \Delta\lambda = y_{GGT} - y_0. \end{cases} \quad (1)$$

Однако в некоторых случаях полученные по приведенному выше алгоритму значения координат узлов могут привести к самопересечениям сетки в «мертвых зонах». Такие ситуации возникают, при съемке с отклонением камеры от надира, при этом проецирующий луч, проходящий через точку m исходного снимка (см. рис. 1, а и 2), может пересечь несколько точек местности М1, М2 и М3, а на снимке будет изображена только точка М1, поскольку точки М2 и М3 попадают в «мертвую зону».

В случае ортотрансформирования традиционным способом (с формированием нового изображения) эта проблема разрешается путем помещения яркости точки m снимка по координатам точек М1, М2 и М3 объекта, в координа-

ты ортофотоснимка m'_1 , m'_2 и m'_3 . Это приводит к «дублированию» изображения (см. рис. 2, б, продублирована линия обрыва). В случае ортотрансформирования по регулярной сетке «дублировать» аналогичным образом яркости невозможно, что может привести к растяжению и разрывам изображения (см. рис. 2, в).

В то же время, несколько точек исходного снимка пересекающие соответствующие им точки местности могут отобразиться на ортофотоснимке как одна точка (см. рис. 1, б и 3), что приводит к сжатию участков ортофотоснимка и самопересечениям узлов сетки. Так точкам a и b исходного снимка соответствуют точки A и B в системе координат объекта и точки ab' в системе координат ортофотоснимка.

Для исключения подобных самопересече-

ний и разрывов, для полученных в результате решения уравнения (1) координат узлов сетки выполняется обратная проверка. По значениям координат узлов сетки (в системе координат объекта) и соответствующих им высот местности при помощи исходных RPC-коэффициентов вычисляются координаты снимка (x, y) , и сравниваются со значениями координат снимка, записанными в сетке. В случае если ошибка (разница значений координат снимка) превышает некоторое установленное пороговое значение, в нашем случае пороговое значение равнялось 0,025 пикселя, такие узлы интерполируют следующим способом.

По координатам, для которых ошибка не превышает заданного порогового значения, строится линейная модель долготы, широты

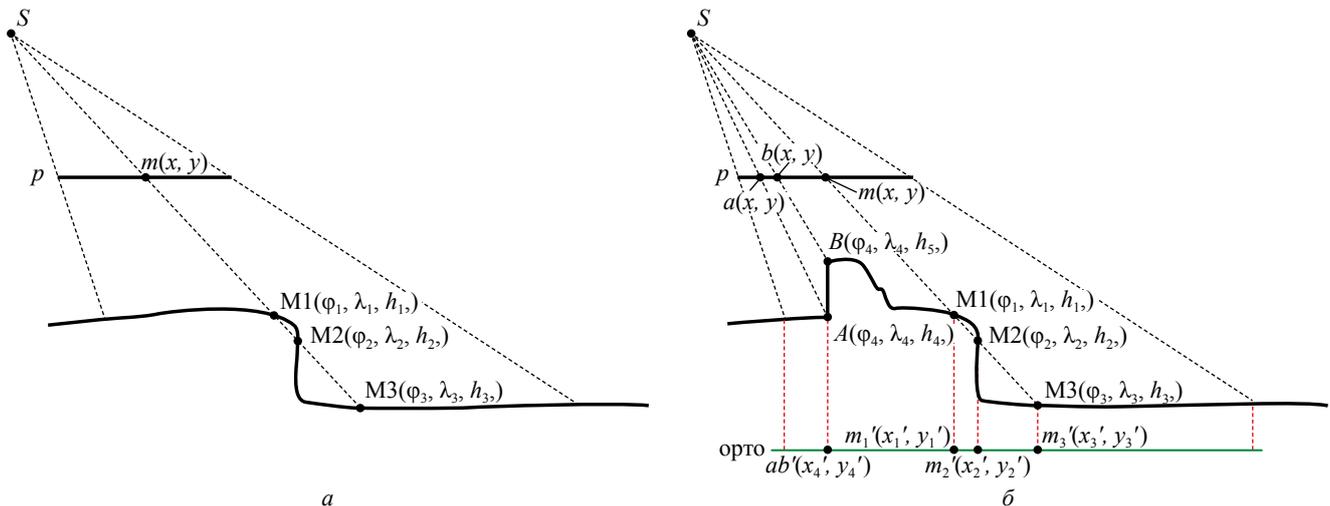


Рис. 1. Положение точек местности на снимке при съемке с отклонением от надира (а) и на ортофотоснимке (б)

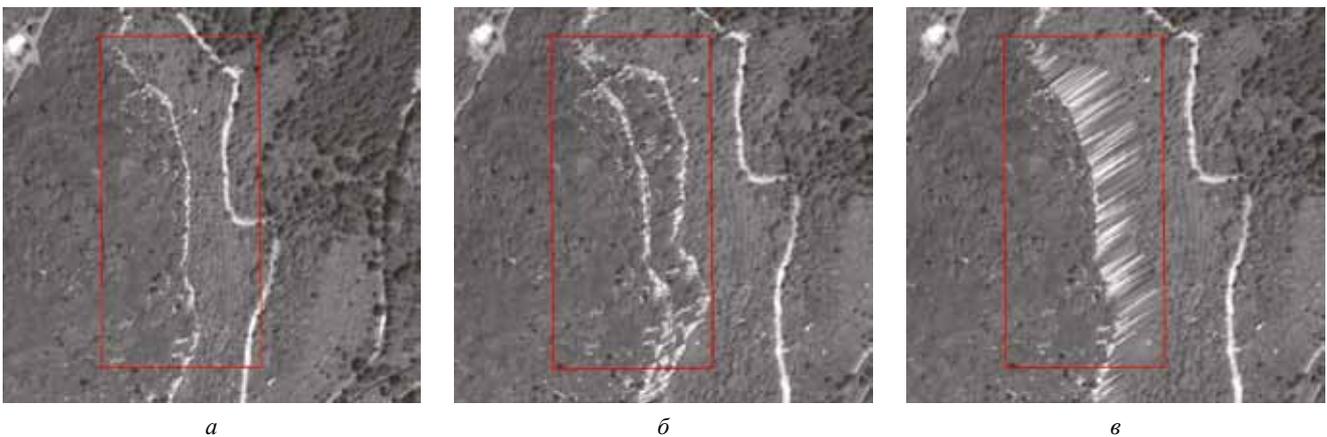


Рис. 2. «Дублирование» яркостей, возникающее при ортотрансформировании снимка с большим углом отклонения от надира:

a — исходный снимок, угол отклонения от надира 35.3° ; $б$ — ортотрансформированный традиционным методом снимок; $в$ — ортотрансформированный по регулярной сетке снимок

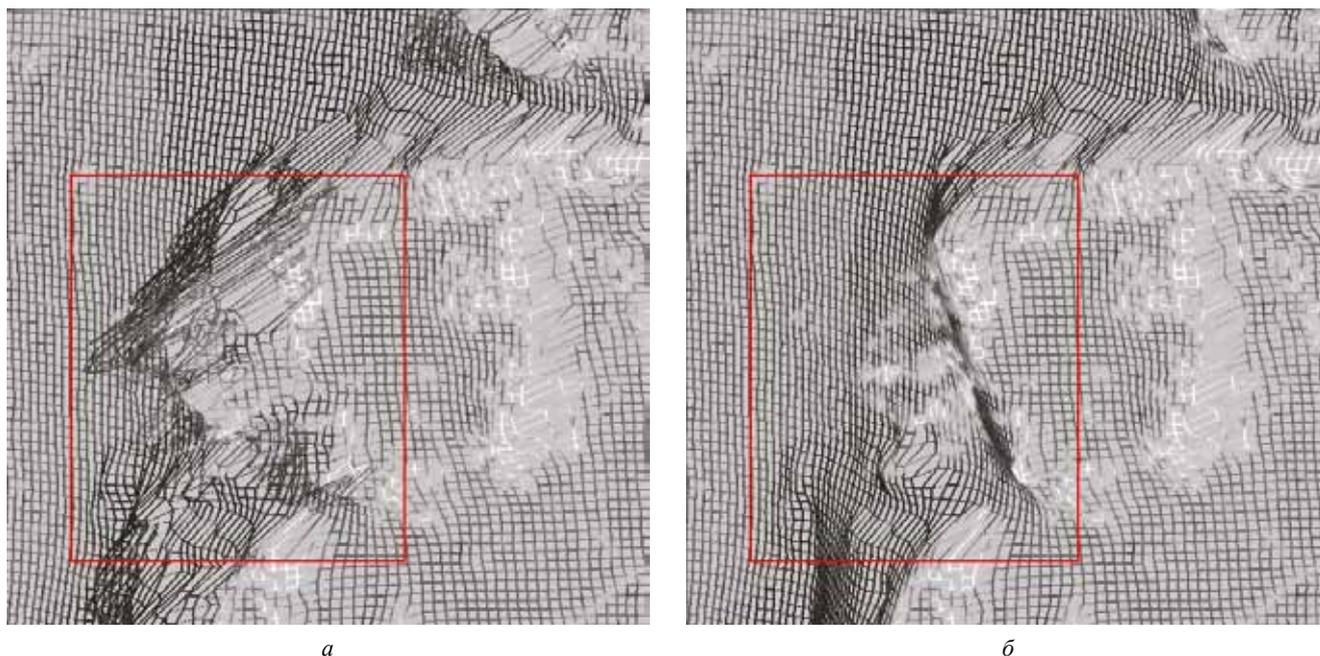


Рис. 3. Коррекция топологии узлов сетки трансформирования:

a — до коррекции; *б* — после коррекции

и высоты в зависимости от пиксельных координат:

$$\varphi(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y;$$

$$\lambda(x, y) = b_0 + b_1x + b_2y;$$

$$H(x, y) = c_0 + c_1x + c_2y.$$

Затем, для ошибок линейной модели, на том же множестве «хороших» (ошибка не превышает порогового значения) узлов строится многоуровневый сплайн:

$$\varphi_{GGT}(x, y) - \varphi(x, y) = A_{mba}(x, y);$$

$$\lambda_{GGT}(x, y) - \lambda(x, y) = B_{mba}(x, y);$$

$$H_{GGT}(x, y) - H(x, y) = C_{mba}(x, y).$$

Полученные таким образом значения интерполируют и заменяют «плохие» (ошибка превышает пороговое значение) узлы:

$$\varphi_{GGT}^{new}(x, y) - \varphi(x, y) = A_{mba}(x, y);$$

$$\lambda_{GGT}^{new}(x, y) - \lambda(x, y) = B_{mba}(x, y);$$

$$H_{GGT}^{new}(x, y) - H(x, y) = C_{mba}(x, y).$$

Коррекция сетки трансформации показана на рис. 3, результатом этой процедуры является топологически корректная сетка, описывающая геометрию снимка с учетом искажений, связанных с изменением рельефа местности.

Оценка точности предложенной модели.

Для оценки точности аппроксимации геометрической модели снимка при помощи регулярной сетки трансформирования была проведена серия экспериментов с панхроматическими снимками КА QuickBird (пространственное разрешение 0,6 м в надире), полученными на одну территорию при различных (от 2 до 35,3°) углах отклонения от надира. Район исследования располагается на территории Франции рядом с городом Моссан-Лес-Альпий, площадь района составляет 134 км². Перепад высот для данной территории составляет 325 м, при этом для 36% территории углы наклона поверхности превышают 6°, в том числе для 4% углы наклона поверхности превышают 45°. Данный район обеспечен 33-я, измеренными инструментально точками планово-высотной подготовки и ЦМР с шагом 2 м и точностью по высоте 0,75 м.

Для исключения при оценке точности модели систематической составляющей была выполнена предварительная фотограмметрическая обработка. Сначала были проведены эксперименты, нацеленные на оценку точности аппроксимации геометрической модели снимка при помощи регулярной сетки трансформирования. При этом ставилась задача попиксельно оценить разницу в координатах,

полученных по сетке и при помощи дробно-рациональной функции. Для этого каждому снимку, описанным выше методом, был построен набор сеток с шагом кратным степени числа 2 (2 пикселя, 4 пикселя, 8 пикселей, 16 пикселей и 32 пикселя), такой выбор обосновывается попыткой установить связь между ошибками трансформирования и шагом дискретизации сетки. В качестве источника высот местности использовалась ЦМР с шагом 2 м. Затем для каждого снимка традиционным методом были построены ортофотопланы и созданы вспомогательные растровые матрицы, хранящие в качестве значений координаты пикселей исходных снимков (отдельно координаты строк и столбцов по каждому ортофотоплану), которые затем были сопоставлены с координатами, полученными при помощи дробно-рациональной функции (эталонное значение). В результате сопоставления для удобства интерпретации было получено 25 (по количеству тестируемых сеток — по 5 на каждый из снимков) растровых изображений («карты ошибок трансформирования») размерностью соответствующей исходным снимкам, значения яркости пикселей которых содержат разницу пространственных координат (де-

картово расстояние), полученных при помощи дробно-рациональной функции и по сетке трансформирования. Данные были проанализированы и получены следующие характеристики точности в метрах: среднеквадратическая погрешность (СКП); абсолютное среднее значение (АС); максимальное абсолютное значение (Max); процент пикселей с ошибкой менее 0,5 м (<0,5); процент пикселей с ошибкой менее 1 м (<1); процент пикселей с ошибкой менее 2,5 м (<2,5) и процент пикселей с ошибкой менее 5 м (<5). В выборке участвовало 287 млн значений. Результаты анализа представлены в таблице.

Как хорошо видно из таблицы, точность модели трансформирования меняется в зависимости от угла, под которым проводилась съемка, и шага сетки. При этом абсолютные средние значения разницы координат, полученных по сетке и традиционным методом, во всех случаях не превышают размера пикселя исходного изображения. Значение СКП для самого сложного случая (изображение получено при угле отклонения от надира 35.3° и использовании сетки с шагом 32 пикселя) не превышает 1,2 м, в остальных случаях СКП не превышает 1 м. Количество пикселей с ошиб-

Точность модели трансформирования

Угол отклонения от надира	Шаг	АС	СКП	Max	< 0,5	< 1	< 2,5	< 5
2°	2	0,002	0,005	4,545	100	100	100	100
	4	0,003	0,008	2,053	100	100	100	100
	8	0,007	0,017	2,848	100	100	100	100
	16	0,014	0,036	4,545	99,995	100	100	100
	32	0,024	0,057	2,22	99,95	100	100	100
8.4°	2	0,007	0,022	8,207	99,989	99,997	100	100
	4	0,012	0,035	8,167	99,962	99,995	100	100
	8	0,026	0,07	8,056	99,717	99,979	99,999	100
	16	0,054	0,138	7,665	98,197	99,798	99,999	100
	32	0,092	0,218	7,52	95,265	99,086	99,993	100
16.1°	2	0,016	0,1	17,469	99,754	99,903	99,975	99,994
	4	0,026	0,114	16,843	99,451	99,841	99,977	99,995
	8	0,054	0,168	17,018	98,138	99,544	99,967	99,995
	16	0,109	0,286	17,328	94,104	98,185	99,892	99,994
	32	0,183	0,434	15,614	88,601	95,389	99,606	99,989
25.5°	2	0,043	0,348	34,902	98,873	99,387	99,746	99,906
	4	0,064	0,357	34,897	97,888	99,074	99,733	99,921
	8	0,116	0,42	34,834	94,589	97,855	99,593	99,925
	16	0,211	0,584	34,785	87,97	94,452	98,971	99,882
	32	0,332	0,794	34,768	81,269	89,699	97,619	99,747
35.3°	2	0,107	0,797	47,581	97,379	98,216	98,965	99,45
	4	0,129	0,787	47,506	96,167	97,709	98,911	99,499
	8	0,186	0,813	47,265	92,598	96,155	98,621	99,518
	16	0,298	0,941	47,673	85,439	92,202	97,619	99,384
	32	0,455	1,173	47,36	78,394	86,564	95,486	98,939

кой более 0,5 м не превышает 22% (при угле отклонения от надира $35,3^\circ$) от общего количества пикселей, и 5% — при ошибке более 2,5 м. В то же время были получены высокие значения максимальной ошибки (более 47 м при угле отклонения от надира $35,3^\circ$), что может быть связано с особенностями использованного метода трансформирования по регулярной сетке, не допускающими «дублирования» пикселей исходного изображения в «мертвых зонах».

Для выяснения причин появления таких ошибок был проведен дополнительный анализ, в рамках которого по «карте ошибок трансформирования», полученной для снимка с углом отклонения от надира $35,3^\circ$, были выделены участки с абсолютным значением погрешности более 0,5; 1; 2,5 и 5 м. Затем, по использованной при ортотрансформировании и вычислении узлов сетки ЦМР, и значениям азимута и угла возвышения в момент получения снимка методом трассировки лучей, была построена модель «мертвых зон». Кроме того, была построена карта углов наклона поверхности.

На первом этапе была проведена оценка зависимости ошибки трансформирования от угла наклона поверхности. Для этого значения ошибки в каждом из выделенных по «карте ошибок трансформирования» интервале были пространственно сопоставлены со значениями углов наклона поверхности и получены

условные вероятности увеличения ошибки в зависимости от угла наклона поверхности. Как хорошо видно на рис. 4, а во всех случаях вероятность возникновения ошибок трансформирования близка к нулю при уклонах менее 6° , и увеличивается с увеличением угла наклона поверхности, при этом отчетливо видно, что большие ошибки (более 2,5 м) распространены в основном на участках с углами наклона поверхности более 45° .

Затем в пределах тех же интервалов было проведено пространственное сопоставление «карты ошибок трансформирования» и модели «мертвых зон». Для этого была проведена бинаризация «карты ошибок трансформирования» по заданным интервалам и последующее пересечение полученных бинарных масок и маски, полученной по модели «мертвых зон». В результате проведенных операций по каждому из интервалов было получено общее количество пикселей с ошибкой и количество пикселей с ошибками, лежащими в «мертвых зонах». Результат сопоставления представлен на рис. 5. Как хорошо видно на рис. 5, основная часть пикселей с ошибками более 2,5 м приурочена к «мертвым зонам».

Выводы. Предложенные алгоритмы построения регулярной сетки трансформирования и коррекции топологии узлов сетки в «мертвых зонах» легли в основу метода, по-

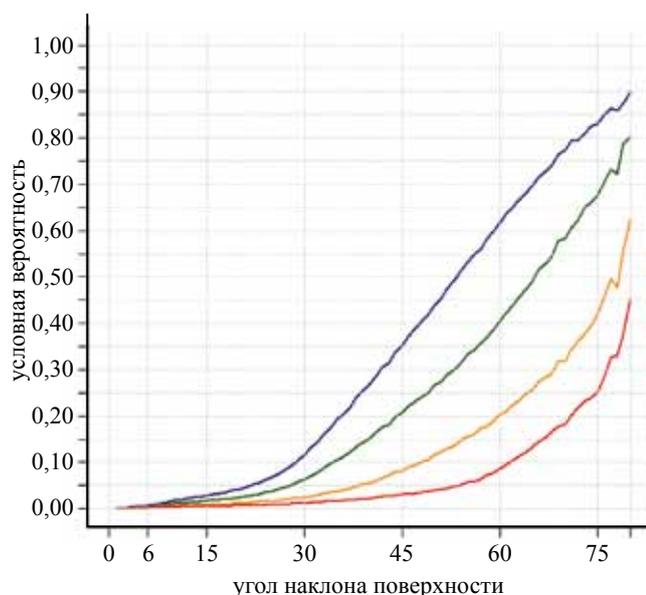


Рис. 4. Изменение ошибки в зависимости от угла наклона поверхности, ошибка более:

— 0,5 м; — 1 м; — 2,5 м; — 5 м

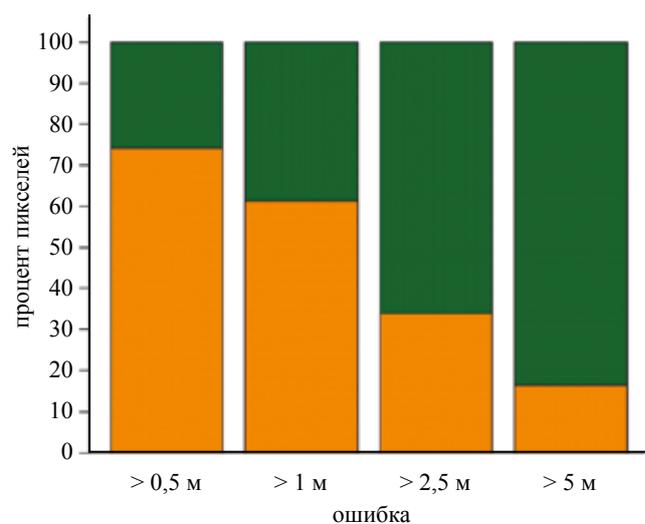


Рис. 5. Пространственное сопоставление пикселей с ошибками и выделенных «мертвых зон»:

■ — ошибка в «мертвых зонах»; ■ — ошибка вне «мертвых зон»

звляющего выполнять ортотрансформирование космической сканерной съемки в режиме близком к реальному времени. В результате проведенного анализа было установлено, что предложенный метод с вероятностью 95% обеспечивает субпиксельную точность аппроксимации исходной геометрической модели снимков при углах отклонения от надира более 25° (при меньших углах вероятность увеличивается до 99%), при условии, что шаг сетки трансформирования (в метрах), соответствует плотности ЦМР, использованной при ортотрансформировании. При уменьшении угла отклонения от надира допускается увеличить

шаг сетки в два и четыре раза. В то же время при использовании ЦМР с плотностью узлов соответствующей размеру пикселя обрабатываемого снимка, точность аппроксимации снижается. Показано, что наибольшие значения ошибки приурочены к «мертвым» зонам.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tao, C.V., and Y. Hu*, 2002. 3D reconstruction methods based on the rational function model, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(7):705–714.
2. *Grodecki J., Dial G.* Block adjustment of high resolution satellite images described by rational functions, *PE&RS*, 2003, 69(1), pp. 59–69.

Принята к печати 24 сентября 2015 г.

Рекомендована кафедрой фотограмметрии МИИГАиК