

УДК 004.932.2

**А.Е. Кузнецов, О.А. Пресняков, П.Н. Светелкин**  
**МОДЕЛИ КООРДИНАТНОГО СООТВЕТСТВИЯ**  
**СПЕКТРОЗОНАЛЬНЫХ СНИМКОВ**  
**СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

*Рассматриваются математические модели, на основе которых выполняется геометрическое совмещение спектрозональных видеоданных при формировании цветосинтезированных изображений. Аналитико-регрессионная модель используется для начального совмещения изображений, а затем применяется триангуляционная модель для устранения остаточных искажений и прецизионного геометрического комплексирования снимков. Предлагается комплекс проверок по отбраковке ложных результатов идентификации одноименных точек, используемых при формировании моделей.*

**Ключевые слова:** «Ресурс-ДК», спектрозональный снимок, координатное соответствие, углы ориентации, триангуляционная модель, одноименные точки.

**Введение.** На космических аппаратах (КА) сверхвысокого пространственного разрешения для формирования изображений земной поверхности используется принцип пространственного разделения поступающего потока лучистой энергии по оптико-электронным преобразователям (ОЭП). В соответствии с этим принципом в фокальной плоскости съемочного устройства устанавливаются последовательно друг за другом три ОЭП поперек направления полета КА. При такой схеме съемки формируются спектрозональные снимки  $B = \{b(m_b, n_b)\}$ ,  $G = \{g(m_g, n_g)\}$ ,

$R = \{r(m_r, n_r)\}$ ,  $m_\varepsilon = \overline{1, M_\varepsilon}$ ,  $n_\varepsilon = \overline{1, N_\varepsilon}$ ,  $\varepsilon \in \{b, g, r\}$ , где  $m_\varepsilon$  – номер столбца,  $n_\varepsilon$  – номер строки, на которых одноименные объекты наблюдаются в разное время и под разными углами. Установлено, что взаимные искажения снимков вызваны, главным образом, временной разницей регистрации данных, вращением Земли, рельефом местности и не описываются плоскопараллельным сдвигом. Поэтому для формирования цветосинтезированных изображений (ЦСИ) необходимо получить модели координатного соответствия спектрозональных снимков, учитывающие перечисленные искажения.

Опыт создания систем обработки спутниковых изображений показал, что формирование ЦСИ должно происходить в два этапа. На первом этапе, выполняемом при каталогизации и визуализации, оперативно должны синтезироваться цветные снимки с использованием урав-

нений, учитывающих основные геометрические искажения за исключением искажений из-за перепадов высот снимаемых объектов. На втором этапе должно выполняться прецизионное геометрическое совмещение снимков с устранением искажений, вызванных рельефом местности.

**Цель работы.** С учетом вышеуказанных требований разработать адекватные модели координатного соответствия для оперативного и прецизионного совмещения снимков, а также высоконадежных алгоритмов отождествления одноименных точек.

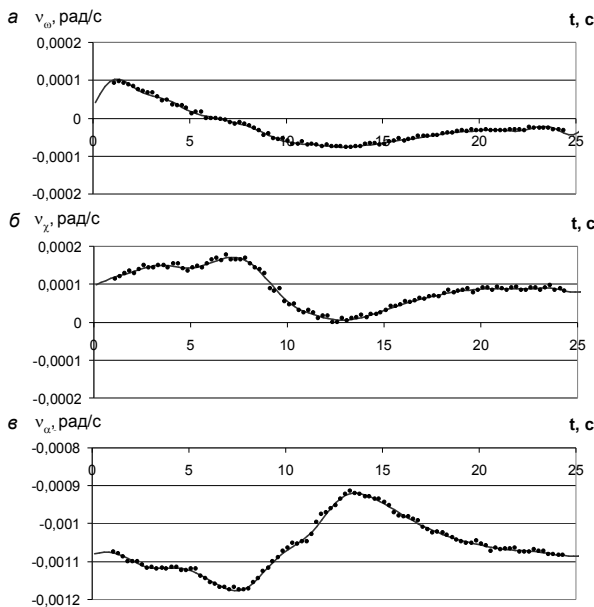
**Аналитико-регрессионная модель координатного соответствия.** В работе [1] показано, что из-за ошибок входных данных установить координатное соответствие между спектрозональными изображениями по уравнениям геопривязки не удастся. Поэтому координатное соответствие между снимками (снимок  $G$  выбирается в качестве базового и остается геометрически неизменным) ищется в виде регрессионных зависимостей вида

$$\begin{aligned} \hat{B} &= \{\hat{b}(m, n) = b(m_b, n_b)\}, \\ m_b &= C_{mb}(m, n) = c_{0b} + c_{1b}m + c_{2b}n, \\ n_b &= C_{nb}(m, n) = c_{3b} + c_{4b}m + c_{5b}n, \\ \hat{R} &= \{\hat{r}(m, n) = r(m_r, n_r)\}, \\ m_r &= C_{mr}(m, n) = c_{0r} + c_{1r}m + c_{2r}n, \\ n_r &= C_{nr}(m, n) = c_{3r} + c_{4r}m + c_{5r}n, \\ m &= m_g, \quad n = n_g, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\hat{B}$ ,  $\hat{R}$  – геометрически преобразованные в систему координат  $(m, n)$  снимки  $B$  и  $R$ . При этом коэффициенты полиномов  $C_{mk}$ ,  $C_{nk}$ ,  $k \in \{b, r\}$ , определяются по идентифицированным координатам одноименных точек с использованием метода наименьших квадратов.

В ходе практических испытаний изложенной в [1] технологии оперативного совмещения снимков от КА «Ресурс-ДК» было установлено, что не для всех сюжетов модель вида (1) обеспечивает требуемую точность координатного соответствия. Причем увеличение степени полинома не позволяет достичь требуемой точности геометрического совмещения. Было высказано предположение, что на взаимное рассогласование снимков влияют изменения углов ориентации КА за время съемки одного и того же объекта разными ОЭП. Эти изменения можно оценить с использованием служебной информации, включающей кватернионы ориентации и измерения угловых скоростей. Выполним оценку взаимных деформаций спектрональных снимков с учетом угловых скоростей движения КА, поскольку они измеряются с более высокими точностью и частотой.

Введем обозначение углов ориентации КА:  $\omega$  – угол крена,  $\chi$  – угол рысканья,  $\alpha$  – угол тангажа. На рисунке 1 приведен пример углового движения КА при съемке маршрута «Париж»,  $v_\omega(t)$ ,  $v_\chi(t)$ ,  $v_\alpha(t)$  – соответствующие скорости. На графиках (рисунок 1) точками показаны данные из паспорта маршрута.



**Рисунок 1 – Графики угловых скоростей КА:**  
***a* – скорость по крену, *b* – скорость по рысканью,**  
***в* – скорость по тангажу**

Пусть расстояние между соседними ОЭП  $d$ , тогда при высоте орбиты КА «Ресурс-ДК»  $H = 600$  км и фокусном расстоянии съемочного устройства  $f$  расстояние между точками орбиты, в которых соседние ОЭП снимут одноименные точки земной поверхности, составляет величину

$$L = \frac{Hd}{f} \cdot \frac{R+H}{R}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус Земли.

Соответственно при скорости КА  $v \approx 7$  км/с соседние ОЭП снимают земную поверхность с разницей во времени

$$\Delta T = \frac{L}{v} \approx 1,98 \text{ с}. \quad (3)$$

Из графиков на рисунке 1 видно, что в измерениях угловых скоростей присутствуют шумы измерений и квантования. Для устранения влияния этих шумов, которые имеют высокочастотный характер, выполняется низкочастотная фильтрация результатов измерений. Шум квантования присутствует также и в измерениях времени, поэтому перед фильтрацией восстанавливаются измерения угловых скоростей в равноотстоящей решетке отсчетов по формуле

$$v_\omega^*(j) = v_\omega(i_j) + (t_p(j) - t(i_j)) \frac{v_\omega(i_{j+1}) - v_\omega(i_j)}{t(i_{j+1}) - t(i_j)}, \quad (4)$$

$$t_p(j) = t(0) + j\tau, \quad i_j = \max\{i | t(i) < t(j)\},$$

$$i, j = \overline{0, Q-1},$$

где  $Q$  – количество измерений углового положения в паспорте маршрута,  $t_p(j)$  – время в  $j$ -м узле равноотстоящей решетки,  $t(i)$  – измеренное время в  $i$ -м отсчете,  $\tau$  – дискрета равноотстоящей решетки,  $\tau = 0,25$  с.

Процедура фильтрации предполагает вычисление коэффициентов дискретного преобразования Фурье (ДПФ) для фильтруемой последовательности  $v_\omega$  по формулам

$$Re S_\omega(k) = \sum_{j=0}^{Q-1} v_\omega^*(j) \cos(jw(k)),$$

$$Im S_\omega(k) = \sum_{j=0}^{Q-1} (-v_\omega^*(j) \sin(jw(k))), \quad (5)$$

$$w(k) = 2\pi k / Q, \quad k = \overline{0, Q-1}.$$

Отфильтрованную последовательность получаем применением обратного ДПФ к коэффициентам прямого, умноженным на низкочастотное прямоугольное окно шириной 0,4 Гц [2]. Аналогично получим отфильтрованные значения  $\tilde{v}_\chi$  и  $\tilde{v}_\alpha$ . Графики отфильтрованных и линейно

аппроксимированных значений угловых скоростей показаны на рисунке 1 сплошной линией.

По отфильтрованным отсчетам оценим максимальное влияние изменения углов ориентации на взаимные рассогласования снимков.

Изменение угла крена за время  $\Delta t$  можно определить по формуле

$$\Delta\omega(t, \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} \tilde{v}_\omega(t) dt. \quad (6)$$

При этом смещение между одноименными объектами, представленными на базовом и совмещаемом снимках, составит в пикселях величину

$$d_\omega(t, \Delta t) = \frac{f \operatorname{tg}(\Delta\omega(t, \Delta t))}{r} \approx \frac{f \Delta\omega(t, \Delta t)}{r}, \quad (7)$$

где  $r$  – размер фотоэлемента линейки ПЗС.

Движение аппарата закладывается в программу съемки таким образом, чтобы изображения от ОЭП максимально перекрывались. Поэтому для оценки взаимных рассогласований эффективно использовать величину

$$\Delta d_\omega(t, \Delta t) = d_\omega(t, \Delta t) - d_\omega(t_0, \Delta t) \approx \frac{f(\Delta\omega(t, \Delta t) - \Delta\omega(t_0, \Delta t))}{r}, \quad (8)$$

где  $t_0$  – момент времени формирования первой строки изображения базового ОЭП.

Изменение угла крена приводит к смещению совмещаемого снимка относительно базового в строчном направлении.

Аналогично определим влияние изменения угла тангажа:

$$\Delta d_\alpha(t, \Delta t) \approx \frac{f(\Delta\alpha(t, \Delta t) - \Delta\alpha(t_0, \Delta t))}{r}. \quad (9)$$

Изменение угла тангажа приводит к смещению совмещаемого снимка относительно базового в кадровом направлении.

Изменение угла рысканья приводит к повороту строк,

$$\begin{aligned} d_{\chi n}(m, t, \Delta t) &= (m - m_y) \sin(\Delta\chi(t, \Delta t)) \approx \\ &\approx (m - m_y) \Delta\chi(t, \Delta t), \\ \Delta d_{\chi n}(m, t, \Delta t) &\approx (m - m_y) (\Delta\chi(t, \Delta t) - \Delta\chi(t_0, \Delta t)), \quad (10) \\ d_{\chi m}(m, t, \Delta t) &= \\ &= (m - m_y) \sin(\Delta\chi(t, \Delta t)) \operatorname{tg}\left(\frac{\Delta\chi(t, \Delta t)}{2}\right) \approx 0, \end{aligned}$$

где  $m_y$  – координата центра строки изображения.

Таким образом, взаимные смещения совмещаемых снимков относительно базового в строчном  $D_{mk}(n)$  и кадровом  $D_{nk}(m, n)$  направлениях можно оценить по формулам:

$$D_{mk}(n) = \Delta d_\omega(t(n), \Delta t_k), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} D_{nk}(m, n) &= \Delta d_\alpha(t(n), \Delta t_k) + \\ &+ \Delta d_{\chi n}(m, t(n), \Delta t_k), \end{aligned}$$

где  $\Delta t_k$  – разность времени съемки одноименных объектов соседними ОЭП,  $\Delta t_b = -\Delta T$ ,  $\Delta t_r = \Delta T$ .

Анализ маршрутов, снятых за время эксплуатации КА, показывает, что значимыми составляющими являются сдвиги  $\Delta d_\omega$  и  $\Delta d_\alpha$ . Например, на маршруте «Париж» были получены следующие максимальные значения сдвигов в пикселях:

$$\max|\Delta d_\omega| = 94, \quad \max|\Delta d_{\chi n}| = 2,7, \quad \max|\Delta d_\alpha| = 142,8.$$

Видно, что  $\max|\Delta d_\alpha| \gg \max|\Delta d_{\chi n}|$ , а также величина  $\max|\Delta d_{\chi n}|$  находится в пределах рассогласования за счет рельефа местности (при перепаде высот в 10 км рассогласование составляет 157,4 пикселя). Поэтому членом  $\Delta d_{\chi n}$  в (11) можно пренебречь:

$$\begin{aligned} D_{mk}(n) &= \Delta d_\omega(t(n), \Delta t_k), \\ D_{nk}(n) &= \Delta d_\alpha(t(n), \Delta t_k). \end{aligned} \quad (12)$$

При этом выражения для соответствующих координатных поправок принимают вид

$$\hat{m}_k = m - D_{mk}(n), \quad \hat{n}_k = n - D_{nk}(n). \quad (13)$$

После компенсации взаимных искажений снимков  $B$  и  $R$ , вызванных изменением углового движения КА во время съемки, остаточные взаимные рассогласования (за исключением искажений из-за рельефа местности) компенсируются линейной моделью (1). Таким образом, аналитико-регрессионную модель для оперативного совмещения снимков можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \hat{m}_k &= c_{k0} + c_{k1} \hat{m}_k + c_{k2} \hat{n}_k \\ \hat{n}_k &= c_{k3} + c_{k4} \hat{m}_k + c_{k5} \hat{n}_k. \end{aligned} \quad (14)$$

**Триангуляционная модель координатного соответствия.** После выполнения совмещения по аналитико-регрессионной модели могут остаться геометрические рассогласования, обусловленные главным образом перепадом высот местности в пределах снимка. На уменьшенных в 8-80 раз обзорных ЦСИ, используемых при каталогизации, эти искажения визуально незаметны. Устранение указанных искажений на ЦСИ исходного разрешения выполняется с помощью кусочно-линейной модели, аппроксимирующей рельефные искажения. Для этого плоскость совмещаемого снимка разбивается на треугольные фрагменты, в пределах которых координатная обработка выполняется по линейному закону. Например, для изображения  $B$  в пределах треугольника с порядковым номером  $u$  со-

отношения выглядят следующим образом:

$$m_b = a_{i0} + a_{i1}m + a_{i2}n, \quad n_b = a_{i3} + a_{i4}m + a_{i5}n. \quad (15)$$

Вершинами триангуляционной решетки являются идентифицированные на изображениях  $\hat{B}$ ,  $G$ ,  $\hat{R}$  одноименные точки. Изначально точки на базовом снимке формируются в узлах регулярной прямоугольной решетки с шагом, позволяющим аппроксимировать с заданной точностью соотношения (14). При этом их образы на изображениях  $\hat{B}$  и  $\hat{R}$  определяются с использованием аналитико-регрессионной модели, а потом уточняются с использованием аппарата корреляционно-экстремального отождествления (КЭО). Разбиение плоскости на треугольники выполняется по критерию Делоне.

Полученная триангуляционная решетка загущается [3] до достижения точности аппроксимации истинных функций геометрического соответствия изображений, равной 0,5 пикселя. Предложен следующий итерационный алгоритм загущения сети. Треугольники разделяются на три группы:

- 1) площадь которых менее порога  $S$ ;
- 2) площадь которых более  $2S$ ;
- 3) оставшиеся треугольники.

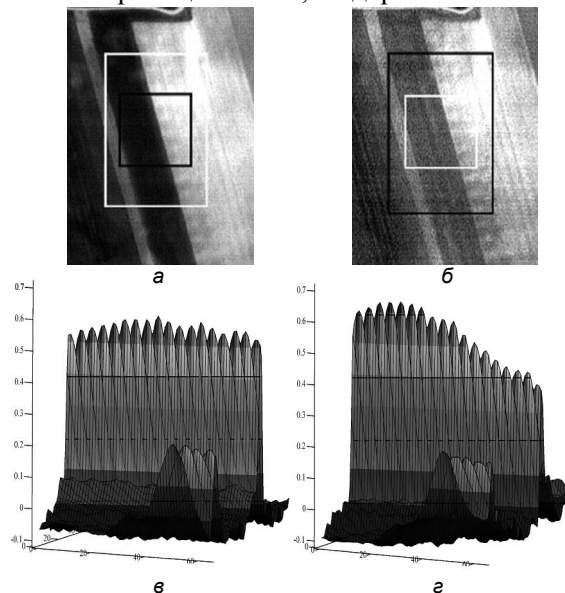
Порог  $S$  определяется по формуле  $S = \max(\bar{S}, S_{min})$ , где  $\bar{S}$  – среднее значение площади всех треугольников,  $S_{min}$  – пороговое значение площади треугольника, при котором дальнейшая детализация не выполняется. Расчет  $S_{min}$  выполняется на основе размера фрагмента  $L_{\sigma}$ , используемого при КЭО:  $S_{min} = L_{\sigma}^2/2$ .

Треугольники первой группы в загущении не участвуют. В треугольниках второй группы намечаются точки посередине трех сторон, а также намечаются точки в центрах масс треугольников. В треугольниках третьей группы намечаются точки посередине наибольшей по длине стороны и точки в центрах масс. Далее выполняется корреляционно-экстремальное уточнение координат намеченных одноименных точек. Описанная итерация повторяется до тех пор, пока в 95% намеченных точек будет определено смещение менее 1 пикселя, а в 99% точек – менее 0,5 пикселя (контрольные точки). Пороги в 95% и 99% – эмпирические.

**Комплекс проверок для алгоритма поиска одноименных точек.** Важной задачей построения моделей координатного соответствия является надежный поиск одноименных точек на спектрональных снимках. В [1] описан алгоритмический комплекс, обеспечивающий надежное КЭО, включающий подбор информатив-

ных сюжетов, анализ вида взаимной корреляционной функции (ВКФ), уточнение области поиска и др. Однако результаты практической эксплуатации созданного программного обеспечения формирования ЦСИ показали, что встречаются ситуации, при которых нарушается координатное соответствие совмещаемых снимков. Это происходит в двух случаях, когда сюжеты содержат границы полей и дороги, а также когда в процесс отождествления вовлекаются движущиеся объекты. Для проверки точности отождествления комбинированных сюжетов используется метод обратного поиска. Суть метода заключается в том, что на совмещаемом изображении выделяется базовый фрагмент, а на базовом снимке – область поиска. Смещения, полученные при прямом и обратном поиске, должны быть равны по модулю и противоположны по знаку. На практике если разница смещений более 0,5 пикселя, то результат корреляции отбраковывается. На рисунке 2 описанный метод проиллюстрирован. При прямом поиске ВКФ имеет пик в центре, слева и справа от него располагаются меньшие по амплитуде пики (рисунок 2, в). При обратном поиске слева от найденного при прямом поиске пика располагается несколько больших по амплитуде пиков (рисунок 2, г), что свидетельствует о ложном результате идентификации.

Указанный метод позволяет отбраковать результаты КЭО сюжетов, центр которых располагается на границах полей, на дороге и т.п.



**Рисунок 2 – Пример выполнения идентификации с применением алгоритма обратного поиска. Черным цветом выделены фрагменты для прямого поиска, белым – для обратного:**  
**а – фрагмент базового снимка;**  
**б – фрагмент совмещаемого снимка;**  
**в – ВКФ прямого поиска;**  
**г – ВКФ обратного поиска**

Вследствие того, что снимки от ОЭП являются разновременными, движущиеся объекты на ЦСИ представляются в виде трех разноцветных копий этого объекта. Расстояние между разноспектральными копиями движущегося объекта зависит от его скорости. При совмещении по триангуляционной модели одноименные точки могут идентифицироваться на движущемся объекте, т.о. в треугольниках, вершины которых находятся в такой точке, будут значительные взаимные рассогласования. Для отбраковки таких точек предложен следующий алгоритм.

Установлено, что перепады высот снимаемых объектов влияют на рассогласования в кадровом направлении и практически не оказывают влияния на рассогласования в строчном направлении. Соответственно строчные смещения совмещаемого снимка относительно базового в одноименных точках местности распределены по нормальному закону, а одноименные точки, попавшие на движущиеся объекты, можно отбраковать по их строчным смещениям по критерию «3 $\sigma$ ». На рисунке 3 приведен пример смещений  $\Delta m$  в строчном направлении. На рисунке 3, а видно два пика, которые образованы точками, попавшими на движущиеся объекты. На рисунке 3, б показан результат отбраковки одноименных точек, попавших на движущиеся объекты.

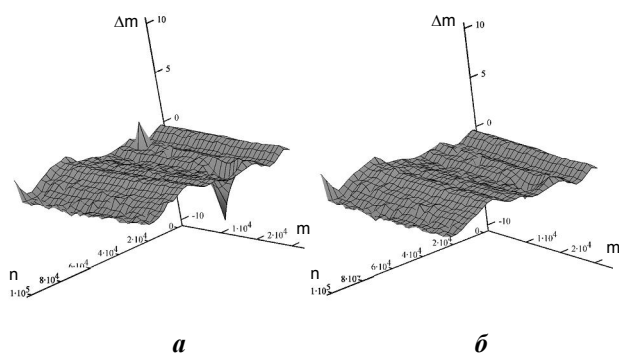


Рисунок 3 – Графики строчных смещений одноименных точек: а – смещения до отбраковки движущихся объектов, б – после отбраковки

Указанный алгоритм позволяет отбраковать одноименные точки, идентифицированные на движущихся объектах, с ненулевой проекцией строчного смещения на ось  $O_m$  ЦСИ. В противном случае характеристики отождествленной точки будут неотличимы от характеристик точки, идентифицированной на высотном объекте.

При построении триангуляционной модели и ее загрузке на ЦСИ размером  $36000 \times 105000$  пикселей, которое занимает 21,1 Гб дискового пространства, было идентифицировано 889389 точек, из них:

- 112521 точка была использована для построения триангуляционной сети;
- 450797 – использовано в качестве контрольных;
- 62820 – отбраковано по минимальному значению СКО базового фрагмента КЭО;
- 260634 – отбраковано по критерию минимального значения ВКФ;
- 526 – отбраковано по критерию СКО пика КФ в окрестности максимума;
- 267 – отбраковано по критерию эксцесса ВКФ;
- 1584 – отбраковано с использованием алгоритма обратного поиска;
- 240 – идентифицированы как движущиеся объекты и отбракованы.

Эксперименты выполнялись на ЭВМ IBM x3850 с 4-мя двоядерными процессорами Intel Xeon 7120N 4x3.0GHz с оперативной памятью объемом 8 Гбайт. На получение ЦСИ затрачено 124,7 минуты, из них:

- 5,7 минуты – начальное совмещение;
- 14,2 минуты – построение триангуляционной сети;
- 104,8 минуты – загрузка триангуляционной сети.

**Заключение.** На рисунке 4 приведен пример – фрагмент результата совмещения двух снимков маршрута «Париж» по модели (1). Фрагмент вырезан из центра изображения совмещенного маршрута. Снимки хорошо совмещаются сверху и снизу, а ближе к центру снимка (рисунке 4, а) становятся отчетливо видны искажения – «двоение» объектов, вызванные изменениями углов ориентации КА. На рисунке 4, б, совмещенном по модели (14), это искажение устранено.

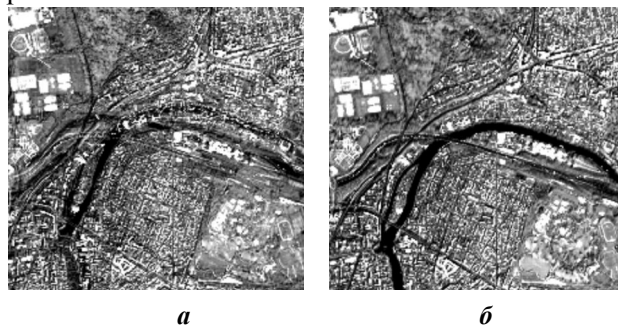


Рисунок 4 – Пример совмещения двух снимков: а – без учета изменения углов ориентации КА, б – с учетом изменения углов ориентации

Таким образом, разработанная аналитико-регрессионная модель позволяет оперативно совмещать обзорные и детальные спектрально-зональные снимки, при этом на детальных снимках остаются рассогласования, обусловленные главным образом перепадами высот снимаемых объ-

ектов. Остаточные рассогласования устраняются с использованием триангуляционной модели координатного соответствия. При КЭО добавлены алгоритмы проверки точек, позволяющие отбраковать результаты отождествления сюжетов, попавших на границы полей, дорог и т.п., а также одноименные точки, идентифицированные на движущихся объектах. Это позволило создать эффективное программное обеспечение, которое позволяет получать ЦСИ по данным от КА «Ресурс-ДК» без участия оператора.

#### **Библиографический список**

1. Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н. Оперативное совмещение спектрональных изображений при цветосинтезе // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Вып. 22, 2007. – С. 3–7.
2. Голд Б., Рэйдер Ч. Цифровая обработка сигналов / пер. с англ. под ред. А. М. Трахтмана. – М.: Сов. радио, 1973. – 368 с.
3. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 128 с.