

УДК 004.932.2

В.В. Еремеев, Е.П. Козлов**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КООРДИНАТНОЙ ПРИВЯЗКИ СНИМКОВ ОТ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ ПО ЭЛЕКТРОННЫМ КАРТАМ**

Рассматриваются алгоритмы повышения качества геодезической привязки космических изображений на основе анализа характеристик эталонных объектов электронной карты и соответствующих им зон поиска на снимке. Алгоритмы позволяют скомпенсировать влияние основных мешающих факторов: закрытие опорного сюжета облаками, неполное соответствие береговых линий на снимке и карте, неравномерное распределение опорных фрагментов по снимку. Представлены результаты выполненных экспериментов.

Ключевые слова: геодезическая привязка, обработка изображений, электронные карты, бинарная маска, опорная точка местности.

Введение. Снимки от геостационарных спутников, содержащие изображение всего диска Земли на фоне окружающего космоса, в исходном виде не могут быть использованы по назначению, поскольку содержат значительные геометрические искажения по отношению к наблюдаемой сцене. Искажения проявляются, главным образом, в виде смещения, поворота и изменения масштаба изображения диска земной поверхности, что приводит к неточности геодезической привязки. Стоит задача приведения полученных изображений Земли к стандартным положению и масштабу, т.е. геодезической привязки каждой точки снимка.

В работе [1] рассматривается технология координатной привязки изображений на основе автоматического совмещения уникальных фрагментов береговых линий, изображаемых на космических снимках, с одноименными участками электронных карт (ЭК). На основе смещений, найденных для множества одноименных фрагментов, строятся функции геометрического совмещения всего снимка с картой. Надежному и точному решению этой задачи мешают следующие факторы:

- наличие облачности, частично или полностью закрывающей опорные фрагменты береговых линий;

- неполное соответствие геометрии береговой линии на изображении электронной карте, это может быть вызвано неточностью составления карт, а также временными изменениями береговых линий;

- неравномерное распределение уникальных

фрагментов береговых линий, используемых для решения поставленной задачи.

Для нейтрализации действия этих отрицательных явлений в настоящей работе представлены два направления исследований. Во-первых, рассматривается алгоритм определения степени ценности опорного фрагмента с точки зрения уникальности его геометрии, что позволяет значительно расширить набор опорных фрагментов и покрыть всю область определения снимка. Во-вторых, предлагается подход по оценке степени несовпадения береговых линий снимка и карты, что может быть обусловлено наличием облачности и неточностью карт на момент съемки. Эта оценка позволяет решить задачу полной отбраковки либо частичного использования опорного фрагмента.

Оценка информативности опорных фрагментов. В работе [1] рассматривается технология координатной привязки изображений от геостационарных спутников, основанная на сопоставлении одноименных объектов снимка и ЭК. На ЭК, выступающей в качестве эталона, выделяются фрагменты E_q , $q = \overline{1, Q}$, которые имеют характерную геометрическую форму, устойчивы во времени и имеют небольшие размеры, в пределах которых рассогласование между снимком и эталоном описывается смещением. На снимке формируются зоны поиска B_q , $q = \overline{1, Q}$. Для всех возможных положений E_q внутри B_q определяется мера сходства M_q . Ко-

ординаты точки (x_q, y_q) , при которых M_q принимает максимальное значение, определяют плоскопараллельное смещение фрагмента E_q относительно зоны поиска B_q с точностью до одного пикселя. Для повышения точности поиска эти координаты уточняются до долей пикселя

$$x_q = x_q + \delta x_q, \quad y_q = y_q + \delta y_q, \quad q = \overline{1, Q}, \quad (1)$$

где δx_q и δy_q - поправки по столбцу и строке, полученные на основе аппроксимации окрестности пика меры сходства фрагментов. Уточненные (x_q, y_q) и эталонные (x_q^*, y_q^*) координаты образуют множество одноименных точек (ОТМ) $O = \{(x_q, y_q, x_q^*, y_q^*); q = \overline{1, Q}\}$, которое используется для определения функций геометрического соответствия P_x, P_y снимка и карты:

$$P_x(x_q, y_q) = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^i a_{j,i-j} x_q^j y_q^{i-j},$$

$$P_y(x_q, y_q) = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^i b_{j,i-j} x_q^j y_q^{i-j}, \quad q = \overline{1, Q}, \quad (2)$$

где $a_{j,i-j}$ и $b_{j,i-j}$, $i = \overline{0, p}$, $j = \overline{0, i}$, - искомые коэффициенты, определяемые по методу наименьших квадратов из условий:

$$\begin{aligned} \sum_q (P_x(x_q, y_q) - x_q)^2 &= \min, \\ \sum_q (P_y(x_q, y_q) - y_q)^2 &= \min. \end{aligned} \quad (3)$$

В такой технологии все ОТМ рассматриваются как равно надежные измерения. При поиске ОТМ и уточнении координат (x_q, y_q) предполагается, что мера сходства M_q имеет выраженный максимум и направление поиска не имеет значения. При минимизации суммы квадратов расстояний между ОТМ вектор, соединяющий каждую пару точек, всегда разлагается на пару векторов по x и y . Таким образом, определение полиномов P_x и P_y методом взвешенного МНК осуществляется независимо друг от друга, а вовлекаемые веса равны между собой. На практике береговые линии на изображениях часто имеют линейный характер (рисунок 1, а), расположение же уникальных фрагментов по снимку неравномерно. Установлено, что изолинии автокорреляционных функций (АКФ) опорных фрагментов имеют форму, близкую к эллипсу, в котором направления осей m и n определяются ориентацией береговой линии и обычно не совпадают с направлениями осей x и y (рисунок 1, б).

В этих случаях из-за неопределенности положения точки максимума АКФ вдоль линейно-

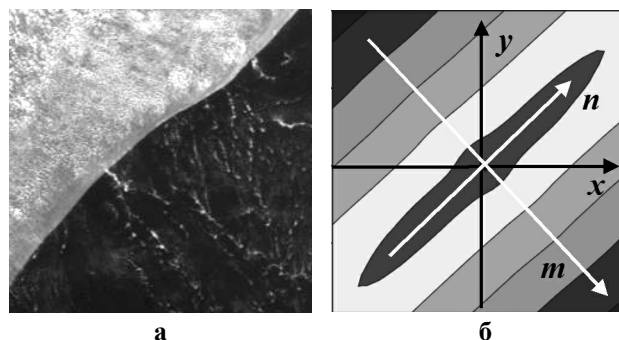


Рисунок 1 – Фрагмент снимка с линейно-ориентированной линией (а) и изолиния его АКФ (б)

го участка береговой линии по осям x и y возникают ошибки в оценке положения ОТМ. Предлагается учитывать направления наилучшего (ось m) и наихудшего (ось n) поиска для каждого опорного фрагмента и к найденным ОТМ относиться с разной степенью доверия по осям.

Очевидно, что плоскопараллельное смещение и поворот опорного фрагмента относительно любой точки на угол α не приводят к изменению расстояния между двумя любыми его точками. Тогда искомые параметры геометрического соответствия можно определить из условий:

$$\sum_q (K_{nq} \Delta n_q^2) = \min,$$

$$\sum_q (K_{mq} \Delta m_q^2) = \min, \quad q = \overline{1, Q}, \quad (4)$$

где K_{nq} , K_{mq} - коэффициенты вдоль осей m и n ,

$$\begin{aligned} \Delta n_q &= \cos \alpha_q [P_x(x_q, y_q) - x_q] - \\ &\quad - \sin \alpha_q [P_y(x_q, y_q) - y_q], \\ \Delta m_q &= \sin \alpha_q [P_x(x_q, y_q) - x_q] + \\ &\quad + \cos \alpha_q [P_y(x_q, y_q) - y_q], \end{aligned} \quad (5)$$

α_q - угол между системами координат xu и mn . Уточнение координат максимума до долей пикселя по аналогии с (1) производится как

$$x_q = x_q + \delta n_q, \quad y_q = y_q + \delta m_q, \quad q = \overline{1, Q}, \quad (6)$$

где δn_q и δm_q - поправки по столбцу и строке, учитывающие форму и положение M_q . Вычисления весовых коэффициентов и угла ориентации изолинии АКФ можно выполнить во время подготовки эталонных фрагментов.

Таким образом, учет ориентации изолиний АКФ позволяет, во-первых, использовать опорные фрагменты с линейными направлениями береговых линий, во-вторых, повысить надежность поиска ОТМ.

Определение ориентации изолинии АКФ.

Для определения оси, вдоль которой ориентирована береговая линия, можно выбрать ось минимального второго момента [2]. В этом случае

необходимо найти прямую, для которой

$$E = \sum_x \sum_y r^2(x, y) F(x, y) = \min, \quad (7)$$

где $F(x, y)$ - изолинии АКФ эталонного фрагмента, $r(x, y)$ - расстояние вдоль перпендикуляра от точки (x, y) до искомой прямой. Запишем уравнение этой прямой в виде $x \sin \alpha - y \cos \alpha + \rho = 0$, где ρ - расстояние от начала координат до прямой, α - угол между прямой и осью x против часовой стрелки. Подставив это выражение в (7), продифференцировав по ρ и приравняв результат к нулю, получим $x_0 \sin \alpha - y_0 \cos \alpha + \rho = 0$, где x_0, y_0 - координаты максимума АКФ. Сделав замену $x - x_0 = x_c, y - y_0 = y_c$, получим $x \sin \alpha - y \cos \alpha + \rho = x_c \sin \alpha - y_c \cos \alpha$ и

$$E = a \sin^2 \alpha - b \sin \alpha \cos \alpha + c \cos^2 \alpha, \quad (8)$$

где $a = \sum_x \sum_y x_c^2 F(x, y), b = \sum_x \sum_y x_c y_c F(x, y), c = \sum_x \sum_y y_c^2 F(x, y)$.

Решив (8) относительно α , найдем

$$\alpha = 0.5 \arctg \frac{b}{a - c}, \sin \alpha > 0, \cos \alpha > 0. \quad (9)$$

Левая часть выражения (8) достигает максимума при $\sin \alpha \leq 0$ или $\cos \alpha \leq 0$. Если $b = 0$ и (или) $a = c$, то E не зависит от α ; в этом случае АКФ симметрична относительно обеих осей и выражение (4) эквивалентно (3).

Найденный таким образом угол α используется в выражении (5), на основе которого минимизируется ошибка определения положения ОТМ.

Определение весовых коэффициентов. Отношение наименьшего значения E к наибольшему характеризует, насколько изолиния АКФ в форме эллипса приближается к окружности. Это отношение равно нулю при эллипсе, вырожденном в прямую, и единице для окружности. Эксцессы $\varepsilon_m = \mu_{m4} / \sigma_m^4 - 3$ и $\varepsilon_n = \mu_{n4} / \sigma_n^4 - 3$ вдоль осей m и n (μ_{m4}, μ_{n4} - центральные моменты четвертого порядка; σ_m и σ_n - СКО) определяют больший или меньший подъем сечений по сравнению с гауссоидой и выражают остроту вершин вдоль осей m и n . СКО σ_m и σ_n , в свою очередь, определяют форму нормального распределения и позволяют сравнить остроту вершин всех АКФ эталонных фрагментов между собой (рисунок 2).

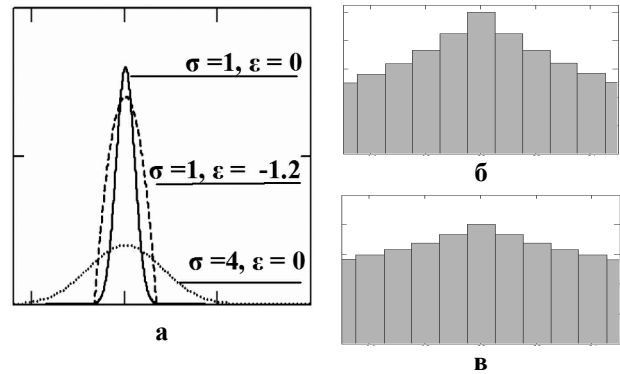


Рисунок 2 – АКФ с различными параметрами (а) и срез АКФ вдоль лучшего (б) и худшего (в) направлений

Конкретные значения коэффициентов остроконечности АКФ вдоль осей m и n , используемые в (4), находятся как

$$K_m = (\varepsilon_m + 3) \sigma_m \lambda_m, K_n = (\varepsilon_n + 3) \sigma_n \lambda_n, \quad (10)$$

где λ_n и λ_m - минимальное и максимальное значения E .

Углы ориентации АКФ и параметры «округлости» можно также найти методом главных компонент. Для этого определяются собственные числа $\lambda_i, i, j \in \{1, 2\}, \lambda_1 \geq \lambda_2$, и собственные векторы e_{ij} матрицы вторых моментов. После этого осуществляется переход к ортогональным некоррелированным координатам m и n :

$$\begin{bmatrix} n \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Итак, коэффициенты K_m и K_n , найденные по (10), учитывают различие поведения АКФ по направлениям поиска максимума m и n и в конечном счете определяют различную степень доверия по направлениям m и n при оценке функций геодезической привязки по множеству найденных ОТМ.

Компенсация несовпадения береговой линии на снимке и карте. На практике фрагменты ЭК и соответствующие им очертания береговых линий на снимках абсолютно точно не совпадают (рисунок 3), что приводит к некоторой неопределенности при оценке координат точки наилучшего совмещения фрагментов.

Поскольку геостационарные спутники обеспечивают периодическую съемку одного и того же района поверхности Земли, ошибки определения координат ОТМ, связанные с несовпадением береговой линии снимка и карты, от сеанса к сеансу повторяются, т.е. носят систематический характер.

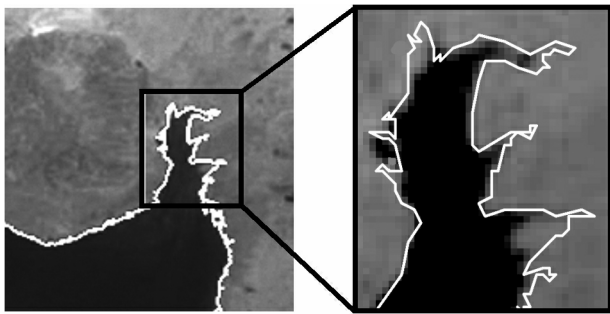


Рисунок 3 – Несовпадение береговой линии на снимке и карте

Технология оценки систематических погрешностей в определении всех опорных точек включает 3 этапа. На первом этапе по описанной выше технологии (см. раздел «Оценка информативности опорных фрагментов») с использованием исходного изображения $B(x, y)$ для его опорных фрагментов B_q , $q = \overline{1, Q}$, определяются координаты (x_q, y_q) , $q = \overline{1, Q}$, на основе которых формируются полиномы геопривязки P_x, P_y .

На втором этапе в полиномы P_x, P_y вводятся искажения Ω_{xs}, Ω_{ys} , $s = \overline{1, S}$, определяющие общий поворот и смещение изображения по отношению к ЭК, т.е. формируется набор полиномов $P_{xs} = P_x + \Omega_{xs}$, $P_{ys} = P_y + \Omega_{ys}$, $s = \overline{1, S}$. По этим полиномам изображение $B(x, y)$ преобразуется в серию изображений $B_s(x, y)$, $s = \overline{1, S}$, при этом P_x, P_y «работают» на совмещение одноименных фрагментов снимка и карты, а Ω_{xs}, Ω_{ys} , $s = \overline{1, S}$, - вносят рассогласования.

На третьем этапе каждое из изображений $B_s(x, y)$, $s = \overline{1, S}$, совмещается с ЭК. В результате формируется множество координат ОТМ (x_{qs}, y_{qs}) , $q = \overline{1, Q}$, $s = \overline{1, S}$. По обратным полиномам $\Omega_{xs}^{-1}, \Omega_{ys}^{-1}$, $s = \overline{1, S}$, найденные точки пересчитываются в плоскость изображения $B(x, y)$, образуя множество (x_{qs}^*, y_{qs}^*) , $q = \overline{1, Q}$, $s = \overline{1, S}$. В результате формируются смещения $\Delta x_{qs} = x_{qs} - x_{qs}^*$, $\Delta y_{qs} = y_{qs} - y_{qs}^*$, $q = \overline{1, Q}$, $s = \overline{1, S}$, средние значения $\Delta x_q = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \Delta x_{qs}$,

$\Delta y_q = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \Delta y_{qs}$ и СКО $\sigma_{xq} = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \Delta x_{qs}^2 - (\Delta x_q)^2}$,

$$\sigma_{yq} = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \Delta y_{qs}^2 - (\Delta y_q)^2}, \quad q = \overline{1, Q}.$$

Величины $\Delta x_q, \Delta y_q$, $q = \overline{1, Q}$, характеризуют систематические ошибки по осям x и y , обусловленные несовпадением по геометрии береговых линий снимка и карты, и могут служить поправками к координатам x_q, y_q , $q = \overline{1, Q}$. Величины σ_{xq} и σ_{yq} , $q = \overline{1, Q}$, характеризуют случайные составляющие ошибки совмещения одноименных фрагментов.

Как показали экспериментальные исследования на реальных изображениях, рассмотренная методика позволяет практически полностью исключить систематические ошибки совмещения одноименных фрагментов.

Отбраковка искаженных участков береговых линий. Несовпадение снимка с картой может быть обусловлено как неточностью ЭК, так и частичным закрытием совмещаемых фрагментов облачными образованиями. На практике используются фрагменты, содержащие достаточно протяженные береговые линии (200 – 300 пикселей). В то же время участки фрагмента, на которых береговые линии не совпадают с картой, и области, закрытые облаками, обычно имеют значительно меньшие размеры (до 10 пикселей). В этом случае повысить точность совмещения одноименных фрагментов можно путем разбиения фрагментов на несколько подфрагментов и отбраковки сбойных участков (рисунок 4, а, участок 2).

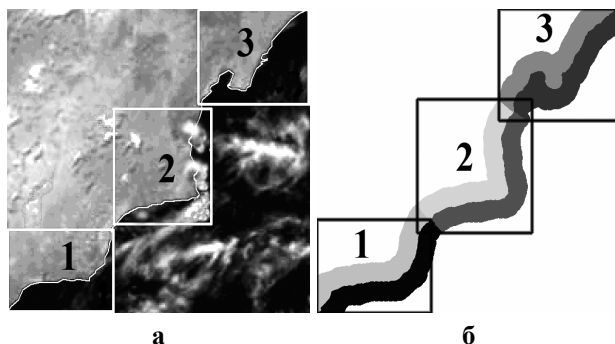


Рисунок 4 – Разбиение фрагмента снимка (а) и карты (б) на подфрагменты

Технология геодезической привязки изображений в этом случае претерпевает некоторые изменения и включает следующие этапы.

Этап 1. Каждый эталонный участок E_q , $q = \overline{1, Q}$, карты E разбивается на L участков $E_q = \{E_q^1, E_q^2, \dots, E_q^L\}$, $\overline{1, Q}$, равномерно покрывающих береговую линию (рисунок 4, б).

Этап 2. Бинарная маска всего фрагмента разбивается границами подфрагментов на набор бинарных масок (см. рисунок 4, б).

Этап 3. Для всех комбинаций подфрагментов, число которых равно $C = \sum_{l=1}^L \frac{L!}{l!(L-l)!}$, на основе АКФ формируется набор характеристик: α_{qc} - угол между системами координат xu и mn ; K_{nqc} , K_{mqc} - весовые коэффициенты по осям m и n , $q = \overline{1, Q}$, $c = \overline{1, C}$.

Этап 4. Вычисляется корреляционная функция для каждого подфрагмента [1]:

$$\rho_l = \frac{\overline{B_{1l}} - \overline{B_{0l}}}{\sigma_l} \cdot \frac{\sqrt{q_{1l} q_{0l}}}{q_{1l} + q_{0l}}, \quad l = \overline{1, L}, \quad (12)$$

где $\overline{B_{1l}}$, $\overline{B_{0l}}$ и q_{1l} , q_{0l} - соответственно средние яркости и число точек под единичной и нулевой областями маски l , σ_l - СКО яркости.

Итоговая мера сходства одноименных фрагментов рассчитывается только по не отброшенным подфрагментам с номерами $j = \overline{1, J}$:

$$\rho = \frac{\sum_{j=1}^J (\overline{B_{1j}} - \overline{B_{0j}})}{\sum_{j=1}^J \sigma_j} \cdot \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^J q_{1j} \sum_{j=1}^J q_{0j}}}{\sum_{j=1}^J (q_{1j} + q_{0j})}. \quad (13)$$

За счет фильтрации сбойных участков береговых линий до 40% повышается общее число фрагментов, используемых для координатной привязки изображения, тем самым повышается точность решения этой задачи.

Идентификация облачности в зоне поиска. Одним из основных мешающих факторов при поиске одноименных фрагментов является облачность (рисунок 5, а).

Зоны поиска, формируемые по снимкам, характеризуются единственной береговой линией, разделяющей воду и сушу. Причем от сеанса к сеансу съемки положение зоны поиска претерпевает главным образом плоско-параллельное смещение, которое намного меньше размеров самих зон. То есть зоны поиска гарантированно содержат области, принадлежащие воде и суше, в то время как облака представляют собой связанные области, яркость которых всегда выше яркости пикселей водной поверхности.

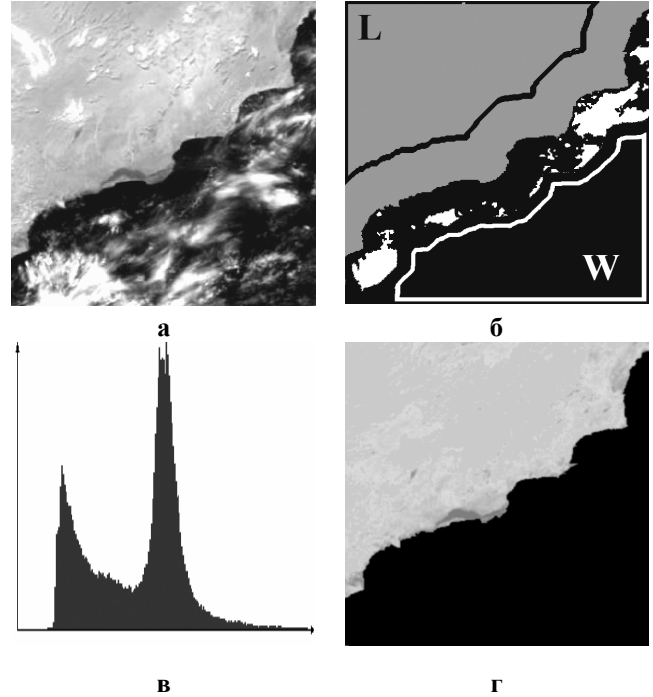


Рисунок 5 – Зона поиска, покрытая облаками (а), участки воды и суши (б), гистограмма зоны поиска (в), результат обработки (г)

С учетом этих соображений построен следующий алгоритм идентификации облачности.

Этап 1. В зоне поиска определяются три области: L – область гарантированного участка суши; W – область гарантированного участка водной поверхности; U – область, непосредственно прилегающая к береговой линии и содержащая как участки суши, так и участки воды. Эти области строятся на основе знаний о допустимых диапазонах смещения береговой линии по осям x и y путем расширения области определения береговой линии ЭК (рисунок 5, б). Область L помечается как суша, область W как вода, а в области U решается задача выделения элементов, соответствующих водной поверхности. По этим областям оценивается допустимый диапазон процентного содержания точек водной поверхности $D = [d_{\min}, d_{\max}]$ как $d_{\min} = N_w / N$, $d_{\max} = (N_w + N_u) / N$, где N_w , N_u , N - число элементов, принадлежащих областям W , L и фрагменту в целом.

Этап 2. На основе анализа гистограммы $w(B)$, построенной по области U , определяется порог p для гарантированной идентификации точек водной поверхности. Как правило, гидрографическим объектам соответствует крайний

левый «горб» гистограммы (рисунок 5, в). В результате бинаризации области U по порогу p формируются две подобласти [3]: U_0 - при $B(x, y) \leq p$ (элементы водной поверхности) и U_1 при $B(x, y) > p$. После сегментации должно выполняться условие $d_{\min} \leq N_{U_0} / N \leq d_{\max}$, где N_{U_0} - число элементов подобласти U_0 .

Этап 3. Формируется объединенная область гарантированных элементов водной поверхности $W^* = W \cup U_0$ (рисунок 5, б, область черных элементов). Далее находятся элементы, принадлежащие облачным образованиям (см. рисунок 5, б, образования из белых элементов) и окруженные элементами области W^* . Это выполняется путем плоско-параллельного перемещения области W по всей зоне поиска. «Белые» элементы преобразуются в «черные», если они почти полностью окружены «черными» элементами из области W . При этом участки береговых линий, закрытые облаками, не восстанавливаются.

Результат обработки изображения с помощью рассмотренного алгоритма представлен на рисунке 5, г. Его главным достоинством является то, что области водной поверхности, закрытые облаками, полностью восстанавливаются, при этом береговые линии не искажаются, что в конечном итоге приводит к повышению точности и надежности идентификации одноименных фрагментов.

Отбраковка участков береговых линий, закрытых облаками. Рассмотренный алгоритм восстановления участков водной поверхности, закрытых облаками, не распространяется на случай попадания облаков на береговые линии. В последнем случае закрытый участок береговой линии восстановить не представляется возможным и задача состоит в исключении этого участка при решении задачи совмещения одноименных фрагментов.

Алгоритм решения этой задачи основан на использовании изменяющегося порога сегментации облачных образований в зависимости от положения бинарной маски в зоне поиска. Конкретно алгоритм включает 3 этапа.

Этап 1. Для изображения $G(x, y)$, находящегося в процессе поиска под бинарной маской, вычисляется медианное значение яркости $med G(x, y)$ и формируется изображение $G_0(x, y)$, элементы которого строго совпадают с нулевой частью бинарной маски.

Этап 2. $G_0(x, y)$ сегментируется на основании того, что яркость точек, принадлежащих об-

лакам, больше яркости точек, соответствующих водной поверхности:

$$G_0^*(x, y) = \begin{cases} 0, & G_0(x, y) \leq med G(x, y); \\ 1, & G_0(x, y) > med G(x, y). \end{cases} \quad (14)$$

В силу симметричности бинарной маски медиана является разделяющим порогом воды и суши, а долю облаков достаточно оценить под нулевой частью маски.

Этап 3. Опорная точка, найденная в процессе совмещения фрагментов, отбраковывается, если

$$q_{\text{обл},0} / q_0 > K_{\text{обл}}, \quad (15)$$

где $q_{\text{обл},0}$ - число нулевых точек $G_0^*(x, y)$, q_0 - число нулевых точек бинарной маски, $K_{\text{обл}}$ - пороговое значение доли облачности.

Исследования показали, что при использовании критерия (18) число ложных совмещений значительно убывает на участках береговых линий, частично закрытых облаками.

Экспериментальные исследования. Выполнены исследования точности, надежности и быстродействия рассмотренных алгоритмов в рамках технологии геодезической привязки изображений от геостационарных спутников по ЭК. Работа алгоритмов проверялась на сериях изображений (более 30 снимков) от геостационарных спутников Meteosat5 и Meteosat8. В качестве координатной основы использовалась векторная карта GSHHS. По результатам выполненных исследований можно сделать следующие основные выводы.

1. Рассмотренные алгоритмы обеспечивают:
 - значительное увеличение числа опорных фрагментов (примерно на 30%) за счет использования линейных участков береговых линий;
 - целенаправленный поиск максимума ВКФ по направлению с минимальным СКО измерения координат ОМТ;
 - повышение более чем в два раза точности определения полиномов геопривязки за счет вовлечения в регрессию ОМТ с разными весами по двум направлениям координат;
 - координатную привязку изображений с СКО порядка 0.2 - 0.4 пикселя;
 - повышение примерно на 40% числа опорных фрагментов за счет использования участков береговых линий, частично закрытых облаками.

2. Алгоритм компенсации несовпадения береговой линии на снимке и карте позволяет значительно уменьшить связанные с этим систематические ошибки до уровня 0,5-0,6 пикселя.

Эксперименты по оценке точности проводились на выборке изображений $B_s(x, y)$, $s = \overline{1, S}$,

$S = 30$, в каждом из которых было выделено $Q = 72$ опорных фрагмента.

q	Δx_q	Δy_q	σ_{xq}	σ_{yq}
6	0,38	-0,43	0,20	0,25
8	0,35	1,11	0,18	0,31
17	0,70	0,83	0,33	0,21
22	1,28	0,98	0,27	0,30
28	0,78	0,74	0,20	0,23
34	0,08	0,68	0,22	0,34
50	-0,26	0,55	0,15	0,19

В таблице в пикселях представлены оценки систематических ошибок Δx_q , Δy_q , $q = \overline{1, Q}$, и

оценки случайных ошибок σ_{xq} , σ_{yq} , $q = \overline{1, Q}$, для некоторых значений q .

Библиографический список

1. Еремеев В.В., Козлов Е.П.. Автоматическая координатная привязка изображений от геостационарных космических систем наблюдений Земли по электронным картам // Вестник РГРТУ. – Вып. 23. 2008. – С. 14 – 20.
2. Хорн Б.К.П. Зрение роботов: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 487 с.
3. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. – М.: Физматлит, 2006. – 288 с.